

Freie Universität Berlin  
Fachbereich Geowissenschaften  
Institut für Physische Geographie

**Auswirkungen des Einsatzes von Biokohlesubstraten  
auf die Bodenfruchtbarkeit ertragsschwacher sandiger  
Ackerböden am Beispiel der Niederlausitz**

Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Dr. rer. nat.

vorgelegt von Dipl.-Ing. agr. Anne Rademacher

Berlin, Juni 2018

Erstgutachter: Professor Dr. mult. Dr. h. c. Konstantin Terytze

Zweitgutachter: Professor Dr. Michael Schneider

Datum der Disputation: 01.06.2018

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Dissertation „Auswirkungen des Einsatzes von Biokohlesubstraten auf die Bodenfruchtbarkeit ertragsschwacher sandiger Ackerböden am Beispiel der Niederlausitz“ selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Berlin, den 11.06.2018

Dipl.-Ing. agr. Anne Rademacher

## **Curriculum Vitae**

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.

# Publikationen

## Monographien

Rademacher, A. (2010): Auswirkungen von Kieselgurbeimengungen zu einem schwach schluffigen Sand auf bodenphysikalische und -mechanische Eigenschaften sowie den pH-Wert, Diplomarbeit. Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg, Halle.

## Veröffentlichungen mit Peer-Review-Verfahren

Rücknagel, J., Rademacher, A., Götze, P., Hofmann, B. und Christen, O. (2017): Uniaxial compression behaviour and soil physical quality of topsoils under conventional and conservation tillage. In: *Geoderma* 286, 1-7.

## Veröffentlichungen ohne Peer-Review-Verfahren

## Vorträge

Rademacher, A. und Haubold-Rosar, M. (2015a): Auswirkungen von Biokohlesubstrat-Gaben zu ertragsschwachen Ackerböden auf das Sickerwasser und die Nährstofffrachten in einem mehrjährigen Lysimeterversuch. 16. Gumpensteiner Lysimetertagung, 21. und 22. April 2015. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, A-8952 Irnding.

Weiß, U., Rademacher, A. und Haubold-Rosar, M. (2014): Effects of biochar substrates in agriculture and reclamation on poor sandy soils of Northeastern Germany - results of field and pot experiments. 19th International Conference for Renewable Resources and Plant Biotechnology NAROSSA, Vol. Proceedings No. 2.1, Poznan, Poland.

Rademacher, A., Haubold-Rosar, M. und Weiß, U. (2014): Gefäßversuche zum Einsatz von Biokohle-Substraten in der Lausitz. LaTerra Feldtag Zinnitz am 10.07.2014.

Rademacher, A., Haubold-Rosar, M. und Weiß, U. (2013): Gefäß- und Lysimeterversuche zum Einsatz von Biokohle-Substraten in der Lausitz. LaTerra Feldtag Welzow am 23.07.2013.

## Poster

Rademacher, A. und Haubold-Rosar, M. (2015b): Auswirkungen von Biokohlesubstrat-Gaben zu ertragsschwachen Ackerböden auf das Sickerwasser und die Nährstofffrachten in einem vierjährigen Lysimeterversuch. Berichte der DBG; Jahrestagung der DBG, Unsere Böden – Unser Leben; 05.-10.09.2015 in München. <http://eprints.dbges.de/id/eprint/1140>.

Rademacher, A. und Haubold-Rosar, M. (2014): Gefäßversuche zur Wirkung von Biokohle-Substraten mit unterschiedlichen Kohlegehalten und Inputstoffen auf den Pflanzenaufwuchs und ausgewählte Bodenparameter von ertragsschwachen Acker- und Kippböden der Lausitz. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. 16.-18.09.2014 in Wien. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 26, 66 - 67.

Haubold-Rosar, M., Rademacher, A., Krollig, S. und Stöhr, C. (2013): Einsatz regionaler Inputstoffe zur Herstellung von Biokohle-Substraten und deren Einfluss auf die Stickstofffreisetzung. Berichte der DBG; Jahrestagung der DBG, Böden - Lebensgrundlage und Verantwortung; 07.-12.09.2013 in Rostock, <http://eprints.dbges.de/id/eprint/970>.

- Rademacher, A., und Haubold-Rosar, M. (2013): Gefäßversuch zur Wirkung von Biokohle-Substraten mit unterschiedlichen Kohlegehalten auf Eigenschaften ertragsschwacher Acker- und Kippböden der Lausitz. Berichte der DBG; Jahrestagung der DBG, Böden - Lebensgrundlage und Verantwortung; 07.-12.09.2013 in Rostock, <http://eprints.dbges.de/id/eprint/929>.
- Weiß, U., Drabkin, D., Rademacher, A., Weinfurtner, K. und Haubold-Rosar, M. (2013): LaTerra – Anwendung von Biokohle-Substraten im Pflanzenbau auf ertragsschwachen Standorten (Lausitz) und im Waldmanagement (Hochsauerlandkreis); Statusseminar 17.-19.04.13 Berlin.
- Rademacher, A. und Haubold-Rosar, M. (2012): Gefäßversuch zur Düngewirkung von Terra Preta Substraten mit unterschiedlichen Kohlegehalten auf ertragsschwachen sandigen Acker- und Kippböden der Lausitz. 55. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. 24.-27.09.2012 in Berlin. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 24, 226-227.
- Rademacher, A. und Haubold-Rosar, M. (2012): Fertilizing effects of “Terra Preta Materials” on poor sandy soils of northeastern germany – results of pot experiments. Eurosoil, Bari, Italy, Abstract, S05.01-P-32, 1362.
- Terytze, K., Vogel, I., Friede, K., Worzyk, F., Schatten, R., Haubold-Rosar, M., Weiß, U., Rademacher, A., Weinfurtner, K., Drabin, D., Zundel, S., Trabelsi, S. (2012) Sustainable land-use by regional energy and material flow management using “Terra Preta Technology” on military conversation areas and low-yield-locations (La Terra). Eurosoil, Bari, Italy, Abstract, S05.02-P-6, 1399.
- Rücknagel, J., Rademacher, A., Christen, O. (2012) Structural change in aggregated soils during the compaction process based on variations in initial structure. 9th ISTRO Conference. Montevideo, Uruguay. 24 - 28.09.2012.
- Rademacher, A., Rücknagel, J. und Christen, O. (2011): Untersuchungen zur Veränderung des Gefüges in aggregierten Böden während des Verdichtungsprozesses bei unterschiedlicher Ausgangsstruktur. Berichte der DBG; Jahrestagung der DBG, Böden verstehen - Böden nutzen - Böden fit machen; 3. - 9. September 2011 in Berlin. <http://eprints.dbges.de/667>.
- Rademacher, A., Rücknagel, J., Wagner, B. und Christen, O. (2010): Auswirkungen von Kieselgurbeimengungen zu einem schwach schluffigen Sand auf Wasserhaushaltsgrößen, die gesättigte Wasserleitfähigkeit und den pH -Wert. 53. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. 24.-27.09.2012 in Hohenheim. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 22, 213-214.

#### Forschungsberichte

- Haubold-Rosar, M., Kern, J., Reinhold, J., Dicke, C. Funke, A., Germer, S., Heinkele, T., Karagöz, Y., Lanza, G., Libra, J., Medick, J., Meyer-Aurich, A., Mumme, J., Neubauer, Y., Teichmann, I., Theobald, A. und Rademacher, A. (2016): Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA).
- Lukas, S., Weiß, U., Rademacher, A. und Haubold-Rosar, M. (2017): Anwendung von Terra Preta im Pflanzenbau auf ertragsschwachen Standorten der Lausitz als integraler Bestandteil eines innovativen, nachhaltigen Land- und Stoffstrommanagement. Bonn: Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Technologie.

- Haubold-Rosar, M., Rademacher, A. und Lukas, S. (2015): Landwirtschaftlicher Dauerversuch zum Einsatz von NOVIHUM® im Tagebau Welzow-Süd (Fläche WW 034). Dresden: Novihum Technologies GmbH.
- Haubold-Rosar, M. und Rademacher, A. (2015): Feldversuche zum Einsatz von MAP im Energiepflanzenanbau auf Rekultivierungsflächen. Abschlussbericht. Potsdam: Leibnitz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB).
- Haubold-Rosar, M. und Rademacher, A. (2014): Landwirtschaftlicher Dauerversuch zum Einsatz von NOVIHUM® im Tagebau Welzow-Süd (Fläche WW 034). Bericht 2014. Dresden: Novihum Technologies GmbH.
- Haubold-Rosar, M. und Rademacher, A. (2013): Feldversuche zum Einsatz von MAP im Energiepflanzenanbau auf Rekultivierungsflächen. Zwischenbericht für das Jahr 2013. Potsdam: Leibnitz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB).
- Haubold-Rosar, M., Weiß, U. und Rademacher, A. (2013): Feldversuche zum Einsatz von MAP im Energiepflanzenanbau auf Rekultivierungsflächen. Zwischenbericht für das Jahr 2012. Potsdam: Leibnitz-Institut für Agrartechnik Potsdam Barnim e.V. (ATB).

Für Paul und Vincent





## Danksagung

Meinem Doktorvater Prof. Dr. mult. Dr. h. c. Konstantin Terytze danke ich sehr für die Unterstützung, Betreuung und Begutachtung dieser Dissertation.

Prof. Dr. Michael Schneider danke ich vielmals für die Begutachtung meiner Dissertation.

Ein ganz besonderer Dank geht an das Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften (FIB) in Finsterwalde. Mein Betreuer vor Ort, Dr. Haubold-Rosar, stand stets für fachliche Fragestellungen zur Verfügung und konnte kompetente Hilfestellungen geben.

Mein herzlicher Dank geht an meine Kollegen vom FIB:

Dr. Dirk Knoche, der immer einen guten Ratschlag hatte. Dr. Beate Zimmermann, die stets Lösungen für knifflige statistische Fragestellungen fand. Dr. Ursula Weiß, mit der ich unzählige Gespräche „über den Schreibtisch“ zu Versuchsabläufen, Auswertungsansätzen, etc. führte. Dr. Thomas Heinkele, der zu allen Fragen rund um den Boden kompetente Antworten wusste. Dr. Christian Hildmann, der mich auf wertvolle Artikel zum Thema Biokohle hinwies und vielschichtige Zukunftsvisionen für Biokohle in der Mittagspause „malen“ konnte. Lydia Rösel, die so manchen Hinweis zur Optimierung der Ergebnisdarstellung gab.

Viel Unterstützung bei der Versuchsdurchführung habe ich durch Petra Krause, Ulf Goltz, Gerd Walther, Reinhard Brauer, Helmut Kocket, und Gerd Lindner erfahren. Darüber hinaus haben im Laufe der Jahre viele Studierenden, Mitarbeitende des Freiwilligen ökologischen Jahres (FÖJ) und Praktikanten die Versuche begleitet.

Ohne die unzähligen Analysen in dem hauseigenen akkreditierten Labor des FIB wäre die Dissertation in dieser Form nicht möglich geworden. Ein herzliches Dankeschön geht daher an das gesamte Laborteam: Dr. Marika Burghardt, Ramona Wilks, Antje Linder, Maria Mehnert und Klaus Sawinski.

Auch Dr. Ines Vogel sowie dem gesamten Team der AG Geoökologie der FU Berlin möchte ich für die Unterstützung danken.

Für die unermüdliche Korrektur danke ich Dr. Sabine Kathke, Sandra Dohnke und Ines Rademacher. Ohne euch wäre die Arbeit nur halb ausgereift.

Großen Rückhalt gab mir in dem gesamten Promotionsprozess meine Familie, der selbstverständlich auch an dieser Stelle mein herzlichster Dank gebührt.

Bedanken möchte ich mich auch bei Judith Königsdörfer für die unzähligen Motivations-Nachrichten.

Darüber hinaus danke ich allen Personen, die diese Arbeit im Laufe der Zeit konstruktiv begleitet haben und an dieser Stelle nicht namentlich aufgeführt sind.



## Zusammenfassung

Unter dem Gesichtspunkt eines wachsenden Bedarfs an agrarischen Produkten sind die Erhaltung und Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit essentiell. Nach dem Vorbild der Terra Preta do Indio (Glaser und Birk, 2012) ist eine Aufwertung von ertragsschwachen, sandigen Böden mit neuentwickelten Biokohlesubstraten (BKS) hinsichtlich ihrer Bodenfruchtbarkeit und Ertragsfähigkeit denkbar.

Die Auswirkungen des Einsatzes von BKS auf die Bodenfruchtbarkeit wurden in ertragsschwachen sandigen Acker- und Kippböden der Niederlausitz (Nordostdeutschland) mit mehrjährigen Gefäß-, Bodensäulen- und Lysimeterversuchen geprüft. In den Gefäßversuchen wurden BKS mit Biokohleanteilen von 15 Vol.-% und 30 Vol.-% und Aufwandmengen von 30 t/ha bis 240 t/ha untersucht. Zudem erfolgte die pflanzenbauliche Prüfung von BKS, die mit verschiedenen Rezepturen aus regionalen Inputstoffen hergestellt wurden. In den Bodensäulen- und Lysimeterversuchen wurden BKS mit 15 Vol.-% Biokohle hinsichtlich ihres Einflusses auf die Sickerwassermenge und -qualität über drei Vegetationsperioden geprüft. Diese wurden im Zusammenhang mit den Erträgen und Entzügen der angebauten Kulturen Knautgras (*Dactylis glomerata* L.), Senf (*Sinapis alba* L.), Sommergerste (*Hordeum distichum* L.), Mais (*Zea mays* L.) und Winterroggen (*Secale cereale* L.) sowie einer umfangreichen Bodenanalytik ausgewertet.

Die Ergebnisse zeigen eine positive Beeinflussung der Bodenparameter in Abhängigkeit vom Ausgangszustand der Böden. Neben der Erhöhung des Gesamtporenvolumens auf 116 % (Kippboden) bzw. 124 % (Ackerboden) wird in dem Kippboden auch die nutzbare Feldkapazität auf 172 % angehoben. Die BKS-Düngung führt zu einer Verbesserung des Humushaushaltes einhergehend mit der Erhöhung der  $KAK_{pot}$ , der Nährstoffvorräte und der P-, K- und Mg-Verfügbarkeit. Die BKS weisen ein geringes N-Mineraldüngeräquivalent von < 10 % auf. Die  $N_{min}$ -Austräge mit dem Sickerwasser können um 40 % (Kippboden) bzw. 69 % (Ackerboden) mit einer Gabe von 30 t/ha BKS (15 Vol.-% Biokohle) signifikant reduziert werden. Gestaffelte BKS-Gaben (3x30 t/ha) reduzieren den  $N_{min}$ -Austrag des Kippbodens stärker als eine einmalige hohe Gabe von 90 t/ha. In einem sandigen Braunerde-Podsol bewirkt die Düngung mit den BKS erhöhte  $N_{min}$ -Austräge auf bis zu 157 % (90 t/ha). Die K- und P-Austräge sind in allen geprüften Böden gering bzw. sehr gering.

Die Anwendung von Biokohlesubstraten verbessert die ökologischen Bodenfunktionen sowie die Flächenproduktivität auf ertragsschwachen sandigen Böden und stellt eine vielversprechende Option für Grenzertragsstandorte und für die landwirtschaftliche Rekultivierung von Kippböden dar.

Schlagwörter: Biokohlesubstrat, Bodenverbesserung, Bodenfunktionen, Grenzertragsboden, Rekultivierung, Mineraldüngeräquivalent, Nährstoffauswaschung, Lausitz

## Abstract

Facing an increasing need of agronomic products, the conservation and improvement of soil fertility is essential. Following the archetype of the Terra Preta do Indio (Glaser und Birk, 2012) an improvement concerning soil fertility and crop productivity of low-yielding sandy soils is possible with the new technology of biochar substrates.

The impact of biochar substrates on soil fertility has been investigated on low-yielding sandy arable land and dumped soil of Lusatia in North-Eastern Germany with perennial pot, soil column and lysimeter experiments. Biochar substrates with 15 vol.-% and 30 vol.-% of biochar and amounts of 30 t/ha up to 240 t/ha were tested in pot experiments. Furthermore, biochar substrates, which were produced with different recipes depending on regional input materials, were also agronomically tested. In the soil column and lysimeter experiments biochar substrate with 15 vol.-% biochar was tested on its impact on the amount and quality of seepage water for three growing seasons. The results were interpreted together with the yields of orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.), mustard (*Sinapis alba* L.), spring barley (*Hordeum distichum* L.), corn (*Zea mays* L.) und winter rye (*Secale cereale* L.), the removal of the grown crops and a considerable soil analytics.

The results show a positive impact on physical and chemical parameters of the soils depending on their initial condition. Besides an increasing total pore volume of 116 % (dumped soil) and 124 % (arable land), there is also an increase of 172 % of the usable field capacity in the dumped soil. The fertilization with biochar substrates induces an improvement of the humus budget accompanied with an increase of the cation exchange capacity, the nutrient reserves and the availability of phosphorus, potassium and magnesium. The biochar substrates have a low nitrogen mineral fertilizer equivalent of only < 10 %.

The nitrogen leaching with the seepage water has been reduced significantly by 40 % (dumped soil) and by 69 % (arable land) with an amount of 30 t/ha biochar substrate (15 vol.-% biochar). The nitrogen leaching on dumped soil has been reduced more by a staggered fertilization (3x30 t/ha) than by a fertilization with one high amount of 90 t/ha. In a sandy cambisol the fertilization with biochar substrates induced an increasing nitrogen leaching of up to 157 % (90 t/ha). The leaching of potassium and phosphorus in all examined soils is low and very low, respectively.

The application of biochar substrates on low-yielding sandy soils improves the ecological soil functions and its crop productivity. The use of biochar substrates is a promising option for marginal land and the agricultural reclamation of dumped soil.

Key words: biochar substrate, soil amendment, soil functions, marginal land, reclamation, mineral fertilizer equivalent, nutrient leaching, Lusatia

# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	ii
Curriculum Vitae.....	iii
Publikationen.....	iv
Danksagung.....	ix
Zusammenfassung.....	xi
Abstract.....	xiii
Inhaltsverzeichnis.....	xv
Abbildungsverzeichnis.....	xxi
Tabellenverzeichnis.....	xxvii
Abkürzungsverzeichnis .....	xxxii
Glossar.....	xxxiv
1 Einleitung und Zielstellung.....	1
2 Stand des Wissens.....	5
2.1 Ertragsschwache Standorte und Rekultivierungsflächen der Lausitz .....	5
2.1.1 Grenzertragsstandorte der Lausitz aus landwirtschaftlicher Sicht .....	5
2.1.2 Landwirtschaftliche Rekultivierung von Kippstandorten im Lausitzer Braunkohlenrevier .....	7
2.2 Organische Dünge- und Bodenverbesserungsmittel und Stoffstrommanagement .....	10
2.2.1 Organische Düngung und Bodenverbesserung .....	10
2.2.2 Eigenschaften sowie Qualitätskriterien von Komposten und deren Eignung zur landwirtschaftlichen Nutzung .....	11
2.2.3 Stoffstrommanagement.....	16
2.3 Biokohle .....	18
2.3.1 Definition des Begriffs Biokohle .....	18
2.3.2 Pyrolyse – ein Verfahren zur Herstellung von Biokohle.....	19
2.3.3 Nährstoffgehalte der Biokohle.....	20
2.3.4 Schadstoffgehalte der Biokohle .....	21
2.4 Biokohlesubstrate .....	23
2.4.1 Biokohle als Additiv in der Kompostierung .....	23
2.4.2 Nährstoffgehalte von Biokohlekomposten und deren Wirkung auf die Bodenfruchtbarkeit und das Pflanzenwachstum .....	25
2.4.3 Einfluss der BKS auf die Nährstoffausträge mit dem Sickerwasser.....	30
3 Material und Methoden.....	32
3.1 Gefäßversuch I „BKS – Anwendungsmengen und Biokohleanteil“.....	32

3.1.1 Böden .....	32
3.1.2 Biokohlesubstrate (BKS15 und BKS30) .....	35
3.1.3 Versuchsaufbau und Bewirtschaftung .....	38
3.1.4 Probenahme und -lagerung .....	42
3.2 Gefäßversuch II „Regionale Inputstoffe und Herstellungsmodifikationen“ .....	43
3.2.1 Böden .....	43
3.2.2 Biokohlesubstrate (BKS Q1 bis Q15) .....	43
3.2.2.1 Regionale Inputstoffe .....	43
3.2.2.2 Herstellung der BKS Q1 bis 15 .....	47
3.2.3 Versuchsaufbau und Bewirtschaftung .....	50
3.2.4 Probenahme und -lagerung .....	55
3.3 Bodensäulenversuch .....	56
3.3.1 Beschreibung der Bodensäulenanlage .....	56
3.3.2 Böden .....	59
3.3.3 Biokohlesubstrat .....	60
3.3.4 Versuchsaufbau und Bewirtschaftung .....	60
3.3.5 Probenahme und -lagerung .....	65
3.4 Lysimeterversuch .....	66
3.4.1 Beschreibung der Lysimeteranlagen .....	66
3.4.2 Böden .....	68
3.4.3 Biokohlesubstrate .....	71
3.4.4 Versuchsaufbau und Bewirtschaftung .....	71
3.4.5 Probenahme und -lagerung .....	75
3.5 Analysemethoden .....	76
3.5.1 Biokohlesubstrate und Böden .....	76
3.5.2 Pflanzenmaterial .....	78
3.5.3 Wasser .....	79
3.6 Statistische Auswertungen .....	80
4 Ergebnisse .....	81
4.1 Gefäßversuch I .....	81
4.1.1 Bodenparameter .....	81
4.1.1.1 Physikalische Bodenkennwerte .....	81
4.1.1.2 Chemische Bodenkennwerte .....	85
4.1.2 Pflanzenaufwuchs .....	97
4.1.2.1 Entwicklung des Pflanzenaufwuchses .....	97
4.1.2.2 Erträge .....	98



4.1.2.3 N-Mineraldüngeräquivalente .....	101
4.1.2.4 Gehalte und Entzüge der Makronährstoffe N, P und K mit dem Pflanzenaufwuchs.....	102
4.1.2.4.1 Welzow.....	102
4.1.2.4.2 Zinnitz.....	112
4.1.2.5 Schwermetallgehalte in dem Pflanzenaufwuchs.....	121
4.2 Gefäßversuch II.....	123
4.2.1 Eigenschaften der Biokohlesubstrate Q1 bis Q15 .....	123
4.2.2 Bodenparameter .....	126
4.2.2.1 Physikalische Bodenkennwerte.....	126
4.2.2.2 Chemische Bodenkennwerte .....	132
4.2.3 Pflanzenaufwuchs.....	144
4.2.3.1 Entwicklung des Pflanzenaufwuchses.....	144
4.2.3.2 Erträge.....	146
4.2.3.3 Nährstoffgehalte und Entzüge mit dem Pflanzenaufwuchs.....	151
4.2.3.4 Schwermetallgehalte in dem Pflanzenaufwuchs.....	163
4.3 Bodensäulen .....	165
4.3.1 Bodenparameter .....	165
4.3.1.1 Physikalische Bodenkennwerte.....	165
4.3.1.2 Chemische Bodenkennwerte .....	171
4.3.2 Pflanzenaufwuchs.....	176
4.3.2.1 Entwicklung des Pflanzenaufwuchses.....	176
4.3.2.2 Erträge.....	180
4.3.2.3 Gehalte und Entzüge .....	184
4.3.3 Sickerwasser .....	189
4.3.3.1 Sickerwasseraufkommen in den Böden Welzow und Zinnitz.....	189
4.3.3.2 Sickerwasserqualität des Bodens Welzow .....	195
4.3.3.3 Sickerwasserqualität des Bodens Zinnitz .....	210
4.3.3.4 Nährstofffrachten bzw. -austräge mit dem Sickerwasser für die Bodensäulen Welzow und Zinnitz .....	225
4.3.4 N-, P- und K-Bilanzen des Bodensäulenversuches 2011 - 2013.....	231
4.4 Lysimeter.....	234
4.4.1 Bodenparameter .....	234
4.4.1.1 Physikalische Bodenkennwerte.....	234
4.4.1.2 Chemische Bodenkennwerte .....	235
4.4.2 Pflanzenaufwuchs.....	239

4.4.2.1 Entwicklung des Pflanzenaufwuchses.....	239
4.4.2.2 Erträge.....	242
4.4.2.3 Gehalte und Entzüge .....	244
4.4.3 Sickerwasser .....	248
4.4.3.1 Sickerwasseraufkommen .....	248
4.4.3.2 Sickerwasserqualität der Lysimeter Welzow und Braunerde-Podsol ..	250
4.4.3.2 Nährstoffausträge mit dem Sickerwasser für die Lysimeter Welzow und Braunerde-Podsol.....	266
4.4.4 N-, P- und K-Bilanzen des Lysimeterversuches von 2011 - 2013.....	269
5 Diskussion.....	271
5.1 Auswirkungen der Anwendung von Biokohlesubstraten auf die physikalischen Eigenschaften der Böden .....	271
5.1.1 Trockenrohdichte.....	271
5.1.2 Gesamtporenvolumen und Luftkapazität.....	272
5.1.3 Nutzbare Feldkapazität und Feldkapazität .....	274
5.1.4 Totwassergehalt .....	276
5.1.5 Fazit.....	277
5.2 Beeinflussung von Bodenreaktionen, Austauschkapazität und Basensättigung der Böden durch den Einsatz von Biokohlesubstraten.....	278
5.2.1 Bodenreaktion .....	278
5.2.2 Austauschkapazität und Basensättigung .....	279
5.2.3 Fazit.....	279
5.3 Beeinflussung der Humusgehalte und -eigenschaften der Böden durch den Einsatz von Biokohlesubstraten.....	280
5.3.1 Organische Bodensubstanz.....	280
5.3.2 Organischer Kohlenstoff .....	281
5.3.3 Kohlenstofffraktionen .....	283
5.3.4 Gesamtstickstoff .....	284
5.3.5 Stickstofffraktionen .....	286
5.3.6 C/N-Verhältnisse.....	288
5.3.7 Fazit.....	289
5.4 Nährstoffgehalte und -verfügbarkeit in Böden.....	290
5.4.1 Stickstoff.....	290
5.4.2 Phosphor .....	291
5.4.3 Kalium .....	292
5.4.4 Weitere Nährstoffe.....	293
5.4.5 Fazit.....	294

5.5 Pflanzenerträge und Nährstoffgehalte/-entzüge.....	294
5.5.1 Pflanzenerträge .....	294
5.6.2 Nährstoffgehalte und -entzüge.....	297
5.6.3 Fazit.....	304
5.6 Schwermetallgehalte in Böden und Pflanzenaufwüchsen .....	305
5.6.1 Schwermetallgehalte in Böden.....	305
5.6.2 Schwermetallgehalte in den Pflanzenaufwüchsen .....	306
5.6.3 Fazit.....	306
5.7 Stoffausträge mit dem Sickerwasser.....	306
5.7.1 Stickstoff.....	306
5.7.2 Phosphor .....	308
5.7.3 Kalium .....	308
5.7.4 Fazit.....	309
5.8 Fehlerbetrachtung .....	309
6 Schlussfolgerungen und Ausblick.....	311
6.1 Wasserhaushalt der Böden .....	311
6.2 C-Haushalt und Humusgehalt.....	311
6.3 Nährstoffspeicherung und -verfügbarkeit insbesondere der Makronährstoffe Stickstoff und Phosphor.....	312
6.4 Flächenproduktivität und Ertragseffekte.....	313
6.5 Sickerwasserqualität.....	314
6.6 Eignung von Inputstoffe für die Herstellung von Biokohlesubstraten aus pflanzenbaulicher Sicht .....	315
6.7 Empfehlungen für die praktische Anwendung von BKS .....	316
6.8 Ausblick.....	317
7 Zusammenfassende Bewertung .....	318
8 Literaturverzeichnis .....	321
Gesetze, Normen und Richtlinien .....	341
9 Anhang.....	I
A 1 Ergänzende Angaben zu dem Gefäßversuch I.....	I
A 2 Ergänzende Angaben zu dem Bodensäulenversuch .....	XI
A 3 Ergänzende Angaben zu dem Lysimeterversuch .....	XXVI



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schema für die BKS-Herstellung am Hengstbacherhof (Daum und Böttcher, 2011).....	36
Abbildung 2:	Links: Aufstellung des Gefäßversuchs I im Garten des FIB. Rechts: Aufstellung in Rollcontainern im Gewächshaus, Schönborn. Fotos: A. Rademacher.....	40
Abbildung 3:	Witterungsverlauf für den Versuchszeitraum des Gefäßversuches I; Monate mit *: Wintermonate in einem frostfreien Gewächshaus.....	41
Abbildung 4:	Ursprungsort des GPM nahe Stechau. Links: Genaue Lage der Entnahmestelle. Quelle: www.maps.google.de; rechts: Blick auf den Vorflutgraben Fichtwald mit abgelegtem GPM. Foto: A. Rademacher ..	44
Abbildung 5:	Links: Versuchsboxenanlage der Firma Areal. Rechts: BKS nach durchlaufenem Produktionsprozess. Fotos: Fa. Areal.....	47
Abbildung 6:	Links: Aufstellung des Gefäßversuchs II in der Kleingartenanlage, Finsterwalde. Rechts: Aufstellung in dem Gewächshaus in Schönborn. Fotos: A. Rademacher.....	51
Abbildung 7:	Witterungsverlauf für den Versuchszeitraum des Gefäßversuches II; Monate mit *: Wintermonate im frostfreien Gewächshaus.....	54
Abbildung 8:	Links: Rollwagen mit Bodensäulen; Rechts: Unteres Säulensegment mit TDR-Sonden (Fotos: A. Rademacher).....	56
Abbildung 9:	Schematische Darstellung der Bodensäulenanlage, verändert nach UP GmbH (2011).....	58
Abbildung 10:	Überblick über die Bodensäulenanlage (links 3 Säulen Welzow, rechts 3 Säulen Zinnitz), jeweils von links nach rechts die Varianten MIN, 30 BKS15, 90 BKS15. Foto: A. Rademacher.....	61
Abbildung 11:	Monatliche Bewässerungsgaben je Säule im Bodensäulenversuch.....	64
Abbildung 12:	Ansicht der Lysimeteranlagen. Oben: A2 - Braunerde-Podsol. Unten: A3 - Welzow. Fotos: A. Rademacher.....	67
Abbildung 13:	Klimadiagramm für den Zeitraum vom 01.01.2011 bis 31.12.2013 der Lysimeterstation Grünwalde (FIB e.V.) und Cottbus (DWD) im Vergleich zum langjährigen Mittel der Station Cottbus (1981 - 2010; DWD) .....	74
Abbildung 14:	Trockenrohdichte (Rt) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max.) .....	81
Abbildung 15:	Gesamtporenvolumen (GPV) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max.) .....	82
Abbildung 16:	Luftkapazität (LK) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max.) .....	82
Abbildung 17:	Nutzbare Feldkapazität (nFK) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max.) .....	83
Abbildung 18:	Totwasser (TW) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max.) .....	84
Abbildung 19:	C <sub>org</sub> -Gehalt der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; Nemenyi-Test p < 0,05) .....	86

Abbildung 20: Kohlenstofffraktionen der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1; links Welzow, rechts Zinnitz) .....	87
Abbildung 21: N <sub>r</sub> -Gehalt der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; Nemenyi-Test p < 0,05) .....	88
Abbildung 22: Stickstofffraktionen der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1; links Welzow, rechts Zinnitz) .....	89
Abbildung 23: N <sub>min</sub> -Werte der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max.) .....	92
Abbildung 24: P <sub>DL</sub> -Gehalte der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; Nemenyi-Test p < 0,05) .....	93
Abbildung 25: K <sub>DL</sub> -Gehalte der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; Nemenyi-Test p < 0,05) .....	94
Abbildung 26: Mg <sub>PV</sub> -Gehalte der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1) .....	95
Abbildung 27: Knaulgraserträge (TM <sub>atro</sub> ) des ersten und zweiten Schnittes auf dem Boden Welzow (BKS [t/ha], Mineraldünger N/P/K [kg/ha]; Median, Min., Max., n = 4) .....	98
Abbildung 28: Knaulgraserträge des ersten und zweiten Schnittes auf dem Boden Zinnitz (BKS [t/ha], Mineraldünger N/P/K [kg/ha]; Median, Min., Max., n = 4) .....	100
Abbildung 29: Summierte Trockenmasseerträge in Abhängigkeit der Gesamt-N-Gaben auf dem Boden Welzow (MIN = Mineraldünger) .....	101
Abbildung 30: Summierte Trockenmasseerträge in Abhängigkeit der Gesamt-N-Gaben auf dem Boden Zinnitz (MIN = Mineraldünger) .....	102
Abbildung 31: N-Gehalte des Knaulgrasaufwuchses des ersten und zweiten Schnittes auf dem Boden Welzow (BKS [t/ha], Mineraldünger N/P/K [kg/ha]; Median, Min., Max., n = 4) .....	103
Abbildung 32: P-Gehalte des Knaulgrasaufwuchses des ersten und zweiten Schnittes auf dem Boden Welzow (BKS [t/ha], Mineraldünger N/P/K [kg/ha]; Median, Min., Max., n = 4) .....	105
Abbildung 33: K-Gehalte des Knaulgrasaufwuchses des ersten und zweiten Schnittes auf dem Boden Welzow (BKS [t/ha], Mineraldünger N/P/K [kg/ha]; Median, Min., Max., n = 4) .....	106
Abbildung 34: N-Gehalte des Knaulgrasaufwuchses des ersten und zweiten Schnittes auf dem Boden Zinnitz (BKS [t/ha], Mineraldünger N/P/K [kg/ha]; Median, Min., Max., n = 4) .....	112
Abbildung 35: P-Gehalte des Knaulgrasaufwuchses des ersten und zweiten Schnittes auf dem Boden Zinnitz (BKS [t/ha], Mineraldünger N/P/K [kg/ha]; Median, Min., Max., n = 4) .....	113
Abbildung 36: K-Gehalte des Knaulgrasaufwuchses des ersten und zweiten Schnittes auf dem Boden Zinnitz (BKS [t/ha], Mineraldünger N/P/K [kg/ha]; Median, Min., Max., n = 4) .....	115

Abbildung 37: Trockenrohdichte ( $R_t$ ) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende ( $n = 4$ , Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; NEMENYI-Test $p < 0,05$ ) .....	127
Abbildung 38: Gesamtporenvolumen (GPV) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende ( $n = 4$ , Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; NEMENYI-Test $p < 0,05$ ) .....	128
Abbildung 39: Luftkapazität (LK) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende ( $n = 4$ , Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; NEMENYI-Test $p < 0,05$ ) .....	129
Abbildung 40: Nutzbare Feldkapazität ( $nFK$ ) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende ( $n = 4$ , Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; NEMENYI-Test $p < 0,05$ ) .....	130
Abbildung 41: Totwasser der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende ( $n = 4$ , Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; NEMENYI-Test $p < 0,05$ ) .....	131
Abbildung 42: $C_{org}$ -Gehalt der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende ( $n = 1$ ) .....	135
Abbildung 43: Kohlenstofffraktionen der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende ( $n = 1$ ; links Welzow, rechts Zinnitz) .....	136
Abbildung 44: $N_t$ -Gehalt der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende ( $n = 1$ ) .....	137
Abbildung 45: Stickstofffraktionen der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende ( $n = 1$ ; links Welzow, rechts Zinnitz) .....	138
Abbildung 46: Knaulgraserträge ( $TM_{atro}$ ) der vier Schnitte auf dem Boden Welzow (Mineraldünger N/P/K [kg/ha], Q+N = 30 t/ha BKS + 60 kg N/ha, Q = 90 t/ha BKS; Median, Min., Max., $n = 4$ ) .....	148
Abbildung 47: Knaulgraserträge ( $TM_{atro}$ ) der vier Schnitte auf dem Boden Zinnitz (Mineraldünger N/P/K [kg/ha], Q+N = 30 t/ha BKS + 60 kg N/ha, Q = 90 t/ha BKS; Median, Min., Max., $n = 4$ ) .....	149
Abbildung 48: Trockenrohdichten ( $R_t$ ) der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (Median, Min., Max., $n = 4$ , unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Standorte und Tiefenstufen; NEMENYI-Test $p < 0,05$ ) .....	165
Abbildung 49: Luftkapazität (LK) der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (Median, Min., Max., $n = 4$ , unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Standorte und Tiefenstufen; NEMENYI-Test $p < 0,05$ ) .....	167

Abbildung 50: Feldkapazität (FK) der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (Median, Min., Max., n = 4, unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Standorte und Tiefenstufen; NEMENYI-Test $p < 0,05$ ) .....	168
Abbildung 51: Nutzbare Feldkapazität (nFK) der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (Median, Min., Max., n = 4, unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Standorte und Tiefenstufen; NEMENYI-Test $p < 0,05$ ) .....	169
Abbildung 52: Totwasser der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (Median, Min., Max., n = 4, unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Standorte und Tiefenstufen; NEMENYI-Test $p < 0,05$ ) .....	170
Abbildung 53: $C_{org}$ -Gehalte der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (n = 1) .....	172
Abbildung 54: $N_t$ -Gehalte der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (n = 1) .....	172
Abbildung 55: $N_{min}$ -Gehalte der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (n = 1) .....	175
Abbildung 56: Ertragssumme der vier Knautgrasernten in dem Zeitraum 07/2011 - 07/2012 auf den Böden Welzow und Zinnitz (n = 1) .....	180
Abbildung 57: Ertrag des Senfes (Ganzpflanze) im Dezember 2012 auf den Böden Welzow und Zinnitz (n = 1) .....	181
Abbildung 58: Ertrag der Sommergerste (Ganzpflanze) im Juni 2013 auf den Böden Welzow und Zinnitz (n = 1) .....	181
Abbildung 59: Ertragssumme von zwei Knautgrasernten im Oktober 2013 und Januar 2014 auf den Böden Welzow und Zinnitz (n = 1) .....	182
Abbildung 60: Ertragssumme aller Kulturen über den Versuchszeitraum 2011 - 2014 auf den Böden Welzow und Zinnitz (n = 1) .....	183
Abbildung 61: Sickerwasseraustrag der Bodensäulen Welzow der Tiefenstufen 1 (15 cm, oben) und 2 (45 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1) .....	191
Abbildung 62: Sickerwasseraustrag der Bodensäulen Welzow der Tiefenstufe 3 (100 cm) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1) .....	192
Abbildung 63: Sickerwasseraustrag der Bodensäulen Zinnitz der Tiefenstufen 1 (15 cm, oben) und 2 (45 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1) .....	193
Abbildung 64: Sickerwasseraustrag der Bodensäulen Zinnitz der Tiefenstufe 3 (100 cm) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1) .....	194
Abbildung 65: Elektrische Leitfähigkeit des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in den Tiefenstufen 1 (15 cm, oben) und 2 (45 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1).....	200



Abbildung 66: Elektrische Leitfähigkeit des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in der Tiefenstufe 3 (100 cm) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1) .....	201
Abbildung 67: NO <sub>3</sub> -N-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in den Tiefenstufen 1 (15 cm, oben) und 2 (45 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1).....	202
Abbildung 68: NO <sub>3</sub> -N-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in der Tiefenstufe 3 (100 cm) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1) .....	203
Abbildung 69: NPOC(D)-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in den Tiefenstufen 2 (45 cm, oben) und 3 (100 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1).....	204
Abbildung 70: DN <sub>b</sub> -Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in den Tiefenstufen 2 (45 cm, oben) und 3 (100 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1).....	205
Abbildung 71: o-PO <sub>4</sub> -Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in den Tiefenstufen 2 (45 cm, oben) und 3 (100 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1).....	208
Abbildung 72: K-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in den Tiefenstufen 2 (45 cm, oben) und 3 (100 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1).....	209
Abbildung 73: Elektrische Leitfähigkeit des Sickerwassers der Bodensäulen Zinnitz in den Tiefenstufen 1 (15 cm, oben) und 2 (45 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1).....	215
Abbildung 74: Elektrische Leitfähigkeit des Sickerwassers der Bodensäulen Zinnitz in der Tiefenstufe 3 (100 cm) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1) .....	216
Abbildung 75: NO <sub>3</sub> -N-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Zinnitz in den Tiefenstufen 1 (15 cm, oben) und 2 (45 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1).....	217
Abbildung 76: NO <sub>3</sub> -N-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Zinnitz in der Tiefenstufe 3 (100 cm) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1).....	218
Abbildung 77: NPOC(D)-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Zinnitz in der Tiefenstufe 2 (45 cm, oben) und 3 (100 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1).....	219
Abbildung 78: DN <sub>b</sub> -Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Zinnitz in der Tiefenstufe 2 (45 cm, oben) und 3 (100 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1).....	220

Abbildung 79: o-PO <sub>4</sub> -Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Zinnitz in den Tiefenstufen 2 (45 cm, oben) und 3 (100 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1).....	223
Abbildung 80: K-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in den Tiefenstufen 2 (45 cm, oben) und 3 (100 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1).....	224
Abbildung 81: pF-WG-Kurve für den Oberboden Welzow im Juli 2012 (n = 6), Bereich der nutzbaren Feldkapazität (nFK) ist grau hervorgehoben. ....	234
Abbildung 82: N <sub>min</sub> -Werte [kg/ha] des Bodens Welzow (W) und des Braunerde-Podsols (P) im Versuchszeitraum (arith. Mittel, n = 2).....	238
Abbildung 83: Maisertrag (atro) [t/ha] im Jahr 2011 für die Böden Welzow und Braunerde-Podsol (n = 2, arith. Mittel ± SD) .....	242
Abbildung 84: Winterroggen-Kornertrag (86 %TS) (links) und Strohertrag (atro) (rechts) [dt/ha] im Jahr 2012 für die Böden Welzow und Braunerde-Podsol (n = 2, arith. Mittel ± SD).....	243
Abbildung 85: Winterroggen-Kornertrag (86 %TS) (links) und Strohertrag (atro) (rechts) [dt/ha] im Jahr 2013 für die Böden Welzow und Braunerde-Podsol (n = 2, arith. Mittel ± SD).....	243
Abbildung 86: Sickerwasseraustrag und erfasster Niederschlag der Lysimeter Welzow (oben) und Braunerde-Podsol (unten) im Versuchszeitraum von 06/2011 bis 07/2013 (n = 2, arith. Mittel mit Standardabweichung, Pfeile markieren Düngergaben).....	249
Abbildung 87: pH-Werte im Sickerwasser der Lysimeter Welzow (oben) und Braunerde-Podsol (unten) im Versuchszeitraum von 06/2011 bis 07/2013 (n = 2, arith. Mittel mit Standardabweichung, Pfeile markieren Düngergaben) .....	253
Abbildung 88: Elektrische Leitfähigkeit im Sickerwasser der Lysimeter Welzow (oben) und Braunerde-Podsol (unten) im Versuchszeitraum von 06/2011 bis 07/2013 (n = 2, arith. Mittel mit Standardabweichung, Pfeile markieren Düngergaben) .....	254
Abbildung 89: NO <sub>3</sub> -N-Konzentration im Sickerwasser der Lysimeter Welzow (oben) und Braunerde-Podsol (unten) im Versuchszeitraum von 06/2011 bis 07/2013 (n = 2, arith. Mittel mit Standardabweichung, Pfeile markieren Düngergaben) .....	255
Abbildung 90: o-PO <sub>4</sub> -Konzentration im Sickerwasser der Lysimeter Welzow (oben) und Braunerde-Podsol (unten) im Versuchszeitraum von 06/2011 bis 07/2013 (n = 2, arith. Mittel mit Standardabweichung, Pfeile markieren Düngergaben) .....	263
Abbildung 91: K-Konzentration im Sickerwasser der Lysimeter Welzow (oben) und Braunerde-Podsol (unten) im Versuchszeitraum von 06/2011 bis 07/2013 (n = 2, arith. Mittel mit Standardabweichung, Pfeile markieren Düngergaben) .....	264
Abbildung 92: P-Austräge mit dem Sickerwasser der Lysimeter Welzow und Braunerde-Podsol im Versuchszeitraum (n = 2, arith. Mittel; SD) .....	268

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gliederung der Landbaugebiete im Land Brandenburg.....	6
Tabelle 2:	Wertgebende Eigenschaften und Inhaltsstoffe von Komposten im Land Brandenburg (Medianwerte) verändert nach LUA (2001) und Einordnung nach LAGA (1995).....	14
Tabelle 3:	Wertmindernde Eigenschaften und Schwermetallgehalte von Komposten im Land Brandenburg (Medianwerte) verändert nach LUA (2001) mit Einordnung zur BioAbfV (2012) .....	15
Tabelle 4:	Gesamtgehalte an N, P und K von Biokohlen unterschiedlicher Ausgangsstoffe verändert nach Haubold-Rosar et al. (2016).....	21
Tabelle 5:	Textur der im Gefäßversuch I eingesetzten Böden .....	32
Tabelle 6:	Bodenphysikalische und -chemische Kennwerte der im Gefäßversuch I eingesetzten Böden.....	34
Tabelle 7:	Schwermetallgehalte der im Gefäßversuch I eingesetzten Böden im Vergleich zu den Hintergrund- und Vorsorgewerten .....	35
Tabelle 8:	Eigenschaften und Inhaltsstoffe der im Gefäßversuch I eingesetzten Biokohlesubstrate .....	37
Tabelle 9:	Gehalte an Spurennährstoffen und Schwermetallen der im Gefäßversuch I eingesetzten Biokohlesubstrate .....	38
Tabelle 10:	Variantenübersicht des Gefäßversuches I .....	39
Tabelle 11:	Bewirtschaftungsmaßnahmen Gefäßversuch I .....	40
Tabelle 12:	Eigenschaften der Inputstoffe für die BKS-Herstellung zu Gefäßversuch II (Elementgehalte in der TM) .....	45
Tabelle 13:	Deklarationsangaben für Nähr- und Mineralstoffe sowie die Schwermetallgehalte des „Simalith“ Basalt-Urgesteinsmehls.....	46
Tabelle 14:	Rezepturen und Produktionsparameter zur Herstellung der BKS Q1 bis Q15 für den Gefäßversuch II .....	48
Tabelle 15:	Dauer der Produktionsphasen zur Herstellung der BKS Q1 bis 15 (verändert nach Krollig (2013) .....	50
Tabelle 16:	Variantenübersicht des Gefäßversuches II .....	52
Tabelle 17:	Bewirtschaftungsmaßnahmen Gefäßversuch II .....	53
Tabelle 18:	Bodenart und Kennwerte der Bodenschichten des Profils Welzow .....	59
Tabelle 19:	Bodenart und Kennwerte der Bodenschichten des Profils Zinnitz .....	59
Tabelle 20:	Bei der Befüllung der Bodensäulen angestrebte Lagerungsdichten .....	60
Tabelle 21:	Düngung des Bodensäulenversuchs .....	62
Tabelle 22:	Fruchtfolge des Bodensäulenversuchs .....	63
Tabelle 23:	Textur der Böden in den Lysimetern .....	68
Tabelle 24:	Bodenphysikalische Kennwerte der Böden in den Lysimetern.....	69
Tabelle 25:	Kennwerte der Lysimeterböden .....	70
Tabelle 26:	Düngung des Lysimeterversuchs.....	72
Tabelle 27:	Fruchtfolge und pflanzenbauliche Termine .....	73
Tabelle 28:	Labormethoden zur Untersuchung der bodenphysikalischen Eigenschaften.....	76
Tabelle 29:	Labormethoden zur Untersuchung der bodenchemischen und bodenbiologischen Eigenschaften .....	77

Tabelle 30:	Labormethoden zur Untersuchung der chemischen Eigenschaften des Pflanzenaufwuchses.....	78
Tabelle 31:	Labormethoden zur Untersuchung der chemischen Eigenschaften des Sickerwassers .....	79
Tabelle 32:	Chemische Kennwerte der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1) .....	85
Tabelle 33:	C/N-Verhältnisse und Gehalte an organischer Bodensubstanz (OBS) in den Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1) .....	90
Tabelle 34:	Gesamtgehalte an Nährstoffen der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (KW-Auszug; n = 1).....	91
Tabelle 35:	Gesamtgehalte an Schwermetallen der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (KW-Auszug; n = 1).....	96
Tabelle 36:	Pflanzenentwicklung zu den Ernteterminen (BBCH-Stadium, Min./Max.) .....	97
Tabelle 37:	Gesamtgehalte der Nährstoffe Mg, Mn, Cu und Zn des Knaulgrasaufwuchses auf dem Boden Welzow zu den beiden Ernteterminen (KW-Auszug; n = 1) .....	108
Tabelle 38:	Entzüge (N, P, K) mit dem Pflanzenaufwuchs auf dem Boden Welzow nach Ernteterminen sowie in der Summe und in Relation zu der mineralischen Referenzvariante .....	110
Tabelle 39:	Gesamtgehalte der Nährstoffe Mg, Mn, Cu und Zn des Knaulgrasaufwuchses auf dem Boden Zinnitz zu den beiden Ernteterminen (KW-Auszug; n = 1) .....	117
Tabelle 40:	Entzüge (N, P, K) mit dem Pflanzenaufwuchs auf dem Boden Zinnitz nach Ernteterminen sowie in der Summe und in Relation zu der mineralischen Referenzvariante .....	119
Tabelle 41:	Gesamtgehalte der Schwermetalle Pb, Cd, Cr und Ni des Knaulgrasaufwuchses auf dem Boden Welzow zu den beiden Ernteterminen (KW-Auszug; n = 1) .....	121
Tabelle 42:	Gesamtgehalte der Schwermetalle Pb, Cd, Cr und Ni des Knaulgrasaufwuchses auf dem Boden Zinnitz zu den beiden Ernteterminen (KW-Auszug; n = 1) .....	122
Tabelle 43:	Eigenschaften der eingesetzten BKS Q1 bis BKS Q15.....	124
Tabelle 44:	Gesamtgehalte nach Königswasseraufschluss der BKS Q1 bis BKS Q15 .....	125
Tabelle 45:	Lösliche C- und N-Fractionen ausgewählter BKS .....	126
Tabelle 46:	Chemische Kennwerte des Bodens Welzow zum Versuchsende (n = 1) .....	132
Tabelle 47:	Chemische Kennwerte des Bodens Zinnitz zum Versuchsende (n = 1) .....	133
Tabelle 48:	Alkalische Phosphatase und Netto-N-Mineralisation ausgewählter Varianten der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1).134	
Tabelle 49:	C/N-Verhältnisse und Gehalte an organischer Bodensubstanz (OBS) in den Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1) .....	139
Tabelle 50:	Gesamtgehalte an Nährstoffen der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (KW-Auszug; n = 1).....	140
Tabelle 51:	Verfügbare Nährstoffgehalte ( $N_{\min}$ , $P_{DL}$ , $K_{DL}$ und $Mg_{PV}$ ) des Bodens Welzow zum Versuchsende (n = 1) .....	141

Tabelle 52:	Verfügbare Nährstoffgehalte ( $N_{\min}$ , $P_{DL}$ , $K_{DL}$ und $Mg_{PV}$ ) des Bodens Zinnitz zum Versuchsende ( $n = 1$ ) .....	142
Tabelle 53:	Gesamtgehalte an Schwermetallen der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (KW-Auszug; $n = 1$ ).....	143
Tabelle 54:	Pflanzenentwicklung (BBCH-Stadium) zu den Ernteterminen auf dem Boden Welzow .....	144
Tabelle 55:	Pflanzenentwicklung (BBCH-Stadium) zu den Ernteterminen auf dem Boden Zinnitz .....	145
Tabelle 56:	Gesamtertrag des Pflanzenaufwuchses der 4 Schnitte in 2012 und 2013 der Böden Welzow und Zinnitz (Median, Min., Max., Relativ zur 150/90/150) .....	150
Tabelle 57:	N-, P- und K-Gehalte des Pflanzenaufwuchses über den Versuchszeitraum auf dem Boden Welzow ( $n = 1$ ) .....	153
Tabelle 58:	Gesamtgehalte der Nährstoffe Mg, Mn, Cu und Zn in dem Knautgrasaufwuchs des Bodens Welzow zu den vier Ernteterminen (KW-Auszug; $n = 1$ ).....	155
Tabelle 59:	N-, P- und K-Gehalte des Pflanzenaufwuchses über den Versuchszeitraum auf dem Boden Zinnitz ( $n = 1$ ) .....	156
Tabelle 60:	Gesamtgehalte der Nährstoffe Mg, Mn, Cu und Zn in dem Knautgrasaufwuchs des Bodens Zinnitz zu den vier Ernteterminen (KW-Auszug; $n = 1$ ).....	159
Tabelle 61:	Gesamtentzug mit dem Pflanzenaufwuchs der 4 Schnitte in 2012 und 2013 der Böden Welzow und Zinnitz .....	162
Tabelle 62:	Gesamtgehalte der Schwermetalle Pb, Cd, Cr und Ni in dem Knautgrasaufwuchs auf dem Boden Welzow zu den vier Ernteterminen (KW-Auszug; $n = 1$ ) .....	163
Tabelle 63:	Gesamtgehalte der Schwermetalle Pb, Cd, Cr und Ni in dem Knautgrasaufwuchs auf dem Boden Zinnitz zu den vier Ernteterminen (KW-Auszug; $n = 1$ ) .....	164
Tabelle 64:	Gesamtporenvolumen (GPV) der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende ( $n = 1$ ) .....	166
Tabelle 65:	pH-Werte der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende ( $n = 1$ ) .....	171
Tabelle 66:	Chemische Kennwerte des Bodens Welzow in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende ( $n = 1$ ) .....	174
Tabelle 67:	Chemische Kennwerte des Bodens Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende ( $n = 1$ ) .....	174
Tabelle 68:	Bestandsentwicklung der Kulturpflanzen im Versuchszeitraum auf den Bodensäulen des Bodens Welzow .....	178
Tabelle 69:	Bestandsentwicklung der Kulturpflanzen im Versuchszeitraum auf den Bodensäulen des Bodens Zinnitz .....	179
Tabelle 70:	Nährstoffgehalte im Pflanzenaufwuchs der vier Knautgrasernten in dem Zeitraum 2011 - 2012 (Median, Min, Max, $n = 1$ ) .....	184
Tabelle 71:	Nährstoffgehalte im Senf-, Sommergerste- und Knautgrasaufwuchs im Zeitraum 2012 - 2013 ( $n = 1$ ) .....	186
Tabelle 72:	Nährstoffentzüge mit dem Pflanzenaufwuchs nach Kulturen und in Summe über den gesamten Versuchszeitraum für die Böden Welzow und Zinnitz ( $n = 1$ ) .....	187

Tabelle 73:	Mittlere pH-Werte für das Sickerwasser aus den einzelnen Tiefenstufen der Bodensäulen Welzow für die Perioden sowie den gesamten Versuchszeitraum.....	195
Tabelle 74:	Mittlere pH-Werte für das Sickerwasser aus den einzelnen Tiefenstufen der Bodensäulen Zinnitz für die Perioden sowie den gesamten Versuchszeitraum.....	211
Tabelle 75:	N <sub>min</sub> -Frachten (Tiefenstufe 1 und 2) und N <sub>min</sub> -Austräge (Tiefenstufe 3) mit dem Sickerwasser der Bodensäulen Welzow nach Perioden und für den gesamten Versuchszeitraum (n = 1, arith. Mittel; SD) .....	226
Tabelle 76:	N <sub>min</sub> -Frachten (Tiefenstufe 1 und 2) und N <sub>min</sub> -Austräge (Tiefenstufe 3) mit dem Sickerwasser der Bodensäulen Zinnitz nach Perioden und für den gesamten Versuchszeitraum (n = 1, arith. Mittel; SD) .....	227
Tabelle 77:	P-Frachten (Tiefenstufe 1 und 2) und P-Austräge (Tiefenstufe 3) mit dem Sickerwasser der Bodensäulen Welzow nach Perioden und für den gesamten Versuchszeitraum (n = 1, arith. Mittel; SD) .....	228
Tabelle 78:	P-Frachten (Tiefenstufe 1 und 2) und P-Austräge (Tiefenstufe 3) mit dem Sickerwasser der Bodensäulen Zinnitz nach Perioden und für den gesamten Versuchszeitraum (n = 1, arith. Mittel; SD) .....	229
Tabelle 79:	K-Frachten (Tiefenstufe 1 und 2) und K-Austräge (Tiefenstufe 3) mit dem Sickerwasser der Bodensäulen Welzow nach Perioden und für den gesamten Versuchszeitraum (n = 1, arith. Mittel; SD) .....	230
Tabelle 80:	K-Frachten (Tiefenstufe 1 und 2) und K-Austräge (Tiefenstufe 3) mit dem Sickerwasser der Bodensäulen Zinnitz nach Perioden und für den gesamten Versuchszeitraum (n = 1, arith. Mittel; SD) .....	231
Tabelle 81:	N-, P- und K-Bilanzen der Böden Welzow und Zinnitz für den gesamten Versuchszeitraum.....	233
Tabelle 82:	Chemische Kennwerte der Oberböden Welzow und Braunerde-Podsol in den Lysimetern im Versuchsverlauf (arith. Mittel, SD = Standardabweichung, n = 2).....	237
Tabelle 83:	Bestandsentwicklung der angebauten Kulturpflanzen Mais und Winterroggen im Versuchszeitraum auf den Lysimetern mit dem Boden Welzow.....	240
Tabelle 84:	Bestandsentwicklung der angebauten Kulturpflanzen Mais und Winterroggen im Versuchszeitraum auf den Lysimetern mit dem Braunerde-Podsol.....	241
Tabelle 85:	N-, P- und K-Gehalte im Pflanzenaufwuchs der Lysimeter im Versuchsverlauf 2011 - 2013 für die Böden Welzow und Braunerde-Podsol (n = 2, arith. Mittel; SD).....	245
Tabelle 86:	N-, P- und K-Entzüge mit dem Pflanzenaufwuchs der Lysimeter im Versuchsverlauf 2011 - 2013 für die Böden Welzow und Braunerde-Podsol (n = 2, arith. Mittel; SD).....	247
Tabelle 87:	Konzentrationen des gesamten und gelösten organischer Kohlenstoffs (TOC/DOC) mit dem Sickerwasser in dem Boden Welzow (n = 2, arith. Mittel; SD).....	256
Tabelle 88:	Konzentrationen des gesamten gebundenen Stickstoffs (TN <sub>b</sub> ) und nach Mikrofiltration (DN <sub>b</sub> ) mit dem Sickerwasser in dem Boden Welzow (n = 2, arith. Mittel; SD).....	257

Tabelle 89:	Konzentrationen des gesamten und gelösten organischer Kohlenstoffs (NPOC (T)/NPOC(D)) mit dem Sickerwasser in dem Braunerde-Podsol (n = 2, arith. Mittel; SD).....	261
Tabelle 90:	Konzentrationen des gesamten gebundenen Stickstoffs (TN <sub>b</sub> ) und nach Mikrofiltration (DN <sub>b</sub> ) mit dem Sickerwasser in dem Braunerde-Podsol (n = 2, arith. Mittel; SD).....	262
Tabelle 91:	N <sub>min</sub> -Austräge mit dem Sickerwasser der Lysimeter Welzow im Versuchszeitraum (n = 2, arith. Mittel; SD) .....	266
Tabelle 92:	N <sub>min</sub> -Austräge mit dem Sickerwasser der Lysimeter Braunerde-Podsol im Versuchszeitraum (n = 2, arith. Mittel; SD) .....	266
Tabelle 93:	K-Austräge mit dem Sickerwasser der Lysimeter Welzow im Versuchszeitraum (n = 2, arith. Mittel; SD) .....	267
Tabelle 94:	K-Austräge mit dem Sickerwasser der Lysimeter Braunerde-Podsol im Versuchszeitraum (n = 2, arith. Mittel; SD) .....	268
Tabelle 95:	N-, P- und K-Bilanzen des Lysimeterversuches.....	269

## Abkürzungsverzeichnis

arith.	arithmetisch
AZ	Ackerzahl
alkal. Phosph.	alkalische Phosphatase
BBCH	Biologische <b>B</b> undesanstalt, <b>B</b> undessortenamt und <b>CH</b> emische Industrie
Bhe	Behandlungseinheit
BK	Biokohle
BKS	Biokohlesubstrat
BKS15	Biokohlesubstrat mit 15 Vol.-% Biokohle
BKS30	Biokohlesubstrat mit 30 Vol.-% Biokohle
BKSQ1 - 15	Biokohlesubstrat der Qualitätsstufen 1 - 15
BrK	Braunkohle
BS	Basensättigung
BWS	Basisch wirksame Stoffe
C <sub>org</sub>	Gehalt an organischem Kohlenstoff
C <sub>t</sub>	Gesamtkohlenstoffgehalt
DL	Doppellaktatauszug
DWD	Deutscher Wetterdienst
elektr. LF	elektrische Leitfähigkeit
EM	effektive Mikroorganismen
FK	Feldkapazität
FM	Frischmasse
GM	Gesteinsmehl
GPM	Gewässerpflegematerial
GPV	Gesamtporenvolumen
hwl	heißwasserlöslich
KAK <sub>pot</sub>	potenzielle Kationenaustauschkapazität
K <sub>f</sub>	gesättigte Wasserleitfähigkeit
KW	Königswasseraufschluss
LBG	Landbaugebiete
LK	Luftkapazität
M.-%	Masseprozent
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
NO <sub>3</sub> -N	Nitrat-Stickstoff
n. b.	nicht bestimmt
nFK	nutzbare Feldkapazität



N <sub>hw</sub>	heißwasserlöslicher Stickstoffgehalt
N <sub>min</sub>	mineralischer Stickstoffgehalt
n. s.	nicht signifikant
N <sub>t</sub>	Gesamtstickstoffgehalt
OBS	organische Bodensubstanz
OS	organische Substanz
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PE	Poly-Ethylen
pyro	pyrophosphatlöslich
RG	Rottegrad
SD	„standard deviation“ bzw. Standardabweichung
SM	„soil moisture“ bzw. Bodenfeuchtigkeit
s. o.	siehe oben
TDR	„Time-Domain-Reflectometry“ bzw. Zeitbereichsreflektometrie
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
TW	Totwassergehalt
% TS	prozentualer Anteil an der Trockensubstanz
s.	signifikant
s. K.	siehe Kapitel
Vol.-%	Volumenprozent
vs.	versus
W	Kippenboden vom Standort Welzow
wl	wasserlöslich
WHK	Wasserhaltekapazität
Z	Braunerde von Standort Zinnitz

## Glossar

Grenzertragsstandort bzw. Grenzstandort	bezeichnet alle landwirtschaftlich genutzte Flächen, deren Faktoreinkommen nicht die Kosten für eingesetzten Faktormengen abdecken bzw. in naher Zukunft abdecken werden (Neander, 1973). Die Variation von technologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen können einen Grenzstandort ohne Einschränkungen wirtschaftlich nutzbar machen und auch umgekehrt (Krug, 2013).
Kippböden	sind anthropogen umgelagerte Substrate als Folge einer bergbaulichen Nutzung. In der Niederlausitz weisen sie in der Regel eine sandige Textur, Nährstoffarmut und hohe Wasserdurchlässigkeit auf (Scherzer, 2004).
Mineraldüngeräquivalent (MDÄ)	ist Mengenangabe eines Nährelementes in kg als Mineraldünger, welches zum optimalen Ausbringungszeitpunkt die gleiche Düngewirkung erzielt wie 100 kg Nährelement aus dem organischen Dünger (Schilling, 2000).
Terra Preta	bezeichnet schwarzerdeartige Böden des Amazonasgebietes, welche durch die anthropogene Zufuhr von Holzkohlen und organischen Abfällen entstanden sind (Glaser und Birk, 2012; Lehmann und Joseph, 2009).

# 1 Einleitung und Zielstellung

Die Grundlage für die menschliche und tierische Ernährung sind unsere agrarisch genutzten Böden. Ihre Produktivität muss unter Berücksichtigung der natürlichen Bodeneigenschaften erhalten und verbessert werden, um der wachsenden Nachfrage nach agrarischen Produkten gerecht zu werden.

Insbesondere die marginalen Agrarstandorte, bei denen es sich häufig um leichte Sandböden handelt, bieten Potenziale für eine ertragswirksame Verbesserung der Bodeneigenschaften. Aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Gehalte an organischer Bodensubstanz wird zudem der Wasser- und Nährstoffhaushalt dieser Standorte durch klimatische Veränderungen stark beeinflusst (Hüttl et al., 2004). Als eine Folge dessen unterliegen die Erträge gerade auf diesen ertragsschwachen sandigen Ackerstandorten einer großen Schwankungsbreite (Christen, 2008). Eine verstärkte Nachfrage nach nachwachsenden Rohstoffen fördert humuszehrende Fruchtfolgen, die einen weiteren Abbau der organischen Bodensubstanz nach sich ziehen (Christen, 2008; Schmelmer und Urban, 2013). Im Weiteren folgt daraus eine vermehrte Freisetzung von CO<sub>2</sub> (Ellmer, 2010). Demgegenüber können die Böden jedoch mit einer Erhöhung der organischen Bodensubstanz widerstandsfähiger gegenüber klimatischen Veränderungen werden und beispielsweise Trockenphasen durch ausbleibende Niederschläge besser puffern, so dass in solch kritischen Phasen länger Wasser für das Pflanzenwachstum und die Ertragsbildung zur Verfügung steht (Blume et al., 2010).

Eine Erhöhung der organischen Bodensubstanz ist nach dem Prinzip der Terra Preta do Indio denkbar. Mit der Terra Preta do Indio werden schwarzerdeartige Böden, die durch die Zufuhr von diversen organischen Abfällen und Holzkohlen im Amazonasgebiet entstanden sind, bezeichnet (Glaser und Birk, 2012). Die anthropogen erzeugte Terra Preta do Indio ist vermutlich mehrere tausend Jahre alt (Glaser und Birk, 2012; Glaser et al., 2001; Lima et al., 2002; Neves et al., 2003). Im Vergleich zu den für die Tropen typischen nährstoffarmen Oxisolen, liefert die Terra Preta do Indio trotz der hohen organischen Umsetzungsraten stabile und hohe Erträge (Lehmann et al., 2003a; Steiner, 2007). Die Terra Preta weist neben höheren Gehalten der Makronährstoffe Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor und Kalium (C, N, P, K), auch höhere pH-Werte, Kationenaustauschkapazitäten (KAK) und einen höheren Anteil an organischer Substanz auf (Glaser, 2007; Lehmann et al., 2003b; Lehmann und Rondon, 2006; Liang et al., 2006; Steiner, 2007; Steiner et al., 2007).

Eine neuentwickelte Technologie zur Herstellung von Biokohlesubstraten (BKS) basiert auf dem Prinzip dieser Terra Preta. Biokohlen mit hoher Abbaustabilität lassen sich

technologisch durch die Pyrolyse von Biomassen herstellen (Hofbauer et al., 2009; Neuling et al., 2016; Schimmelpfennig und Glaser, 2012). Für die Anwendung im Pflanzenbau wird die Erzeugung von BKS empfohlen, die durch Kompostierung (ggf. mit Fermentation) der Biokohlen mit leicht umsetzbarer organischer Substanz, wie Grünschnitt, hergestellt werden können (Glaser und Kammann, 2013; Krieger et al., 2011; Schatten et al., 2015; Terytze et al., 2016a).

Die verwendeten Inputstoffe und deren Qualität sowie die Prozessführung während der Herstellung der BKS, insbesondere die Temperatur, beeinflussen die Qualität der späteren BKS (Amlinger und Götz, 1999; Antal und Gronli, 2003; Fischer und Glaser, 2012; Glaser, 2010; Haubold-Rosar et al., 2013; Krollig, 2013; Libra et al., 2011; Schmidt et al., 2012). Die BKS zeichnen sich als hochwirksame Bodenverbesserungsmittel aus (Böttcher, 2009; Heck et al., 2008; IfaS, 2008; Schatten et al., 2015; Terytze et al., 2016a; Terytze et al., 2015; Vogel et al., 2016).

Die Verwertung der organischen Abfälle erfolgt unter der Berücksichtigung von Klimaschutzziele, wie der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung, sowie innerhalb einer regionalen Verwertungs- und Wertschöpfungskette. Da die in der Region erzeugten Bodenverbesserungsmittel auch auf die dortigen landwirtschaftlichen Nutzflächen ausgebracht werden sollen, wirken sie auch hier ertragssteigernd bzw. -stabilisierend.

Auf diesem Grundgedanken basierend wurde beispielsweise im Botanischen Garten Berlin-Dahlem bereits erfolgreich ein funktionierendes internes Stoffkreislaufsystem etabliert. Die anfallenden Abfall- und Reststoffe des botanischen Gartens werden unter Zusatz von Biokohle mit einer verbesserten Kompostierung zu hochwertigen Biokohlekomposten aufgewertet (Terytze et al., 2015; Terytze et al., 2016b; Wagner et al., 2012). Durch die Biokohlekomposte können Ressourcen eingespart werden, da die Kosten für die Entsorgung von Abfällen und den Zukauf von Komposten entfallen (Terytze et al., 2016b). Die Biokohlekomposte erhöhen und stabilisieren zudem langfristig die organische Bodensubstanz der landwirtschaftlichen Nutzflächen (McHenry, 2009; Steiner, 2007). Darüber hinaus werden die Biokohlekomposte bzw. die Biokohle als Option zur nachhaltigen C-Sequestrierung betrachtet (Lehmann, 2007; Sohi et al., 2009; Terytze et al., 2015; Verheijen et al., 2014).

Die bisherigen Forschungen zeigen, dass die Wirkungen von Biokohlegaben auf Böden und Pflanzen abhängig sind von den Eigenschaften der Biokohle, des Standortes und der angebauten Kultur (Haubold-Rosar et al., 2016; Lorenz und Lal, 2014). Ertragssteigernde Effekte werden insbesondere einer Anhebung der pH-Werte in sauren Böden und einer Verbesserung der Wasserspeicherung in sandigen Böden zugeschrieben (Abel et al., 2013; Jeffery et al., 2011; Tryon, 1948; Ullum, 2017). Zudem wurde in einigen Versuchen eine Verringerung der N-Auswaschung mit dem Sicker-

wasser nach Biokohlegaben festgestellt (Clough et al., 2013). Mehrjährige Untersuchungen zu Effekten von BKS auf das Pflanzenwachstum, den Nährstoff- und Wasserhaushalt sind in der Forschung bisher unterrepräsentiert.

Die Zielstellung der Dissertation ist Effekte von Biokohlesubstraten auf Grenzertragsstandorten in der Niederlausitz im nordostdeutschen Tiefland nachzuweisen. Diese Region ist stark durch die Folgen des Braunkohlenbergbaus geprägt. Eine nachhaltige Beeinträchtigung der landwirtschaftlichen Produktion erfolgt durch die großflächigen Grundwasserabsenkungen (Grünwald, 2001) und den beginnenden Klimawandel in Form von ausgeprägter Vorsommertrockenheit (Gerstengarbe et al., 2003). Wie in anderen Regionen Deutschlands sind auch in der Lausitz die Folgen humuszehrender Fruchtfolgen sowie eine Verengung der Rotationen (Christen, 2008; Eitzinger et al., 2009) spürbar. Eine regionale Besonderheit und eine Herausforderung für die Landwirtschaft sind zudem die Rückgabeflächen des Braunkohlenbergbaus. Die Kipprohböden sind weitgehend frei von rezenter organischer Substanz und ihre mikrobielle Aktivität ist gering (Haubold-Rosar und Gunschera, 2009). In Folge dessen sind die Wasserspeicherung und der Nährstoffumsatz unzureichend. Insbesondere die Makronährstoffe Stickstoff und Phosphor sind neben dem Wasser ertragslimitierend (Gunschera, 1998). Die Bodenfruchtbarkeit dieser Kipprohböden muss daher über lange Zeiträume und mit hohem Aufwand wiederhergestellt werden. Ein wichtiges Rekultivierungsziel stellt die Humusanreicherung dar (Schlenstedt et al., 2014). In diesem Zusammenhang liegt ein verstärkter Einsatz von Bodenverbesserungsmitteln aus organischen Massenabfällen, wie Kompost, Stallmist oder auch Klärschlamm, auf der Hand. Allerdings wurden diese aus verschiedenen Gründen, wie beispielsweise unzureichende Effizienz, geringe Verfügbarkeit, hohe Kosten, aber auch mangelnder Akzeptanz der potenziellen Anwender, bisher kaum verwendet (Döhler, 1996; Mönicke, 2005). Mit einem ganzheitlichen Systemansatz, nach dem Prinzip der Terra Preta do Indio im Amazonasbecken (Glaser et al., 2001; Lehmann et al., 2003c), soll durch die Verwendung von BKS eine attraktive Alternative zu den herkömmlichen Bodenverbesserungsmitteln unter diesen Bedingungen untersucht werden.

Es werden verschiedene BKS in mehrjährigen Gefäß-, Bodensäulen- und Lysimeterversuchen in einem typischen Ackerboden der Lausitz und einem frisch verkippten Rohboden aus dem Tagebau Welzow auf ihre pflanzenbauliche Wirkung sowie ihre Wirkung auf den Boden und die auftretenden Sickerwässer im landwirtschaftlichen Einsatz geprüft. Aus den Versuchen werden Erkenntnisse zum Einfluss von Biokohlesubstraten auf die Bodenfunktionen, den Nährstoffhaushalt und die Ertragsfähigkeit der Böden in der Lausitz unter dem besonderen Aspekt der Eignung für die Rekultivierung

gewonnen. Die Prüfung verschiedener Inputstoffe für die Biokohlesubstrate zeigt zudem Potentiale zur Schließung regionaler Stoffkreisläufe auf. Zudem werden praktische Anwendungsempfehlungen zum Einsatz von Biokohlesubstraten in der Landwirtschaft und der landwirtschaftlichen Rekultivierung gegeben.

Zusammenfassend haben sich in der Vorbereitung des Dissertationsvorhabens folgende Fragestellungen entwickelt, die interdisziplinär geprägt sind:

- Lassen sich durch den Einsatz von Biokohlesubstraten dauerhafte Verbesserungen der Bodenfunktionen und der Flächenproduktivität erreichen?
- Welchen Einfluss haben die Biokohlesubstrate auf den Wasserhaushalt des Bodens?
- Welche Auswirkungen haben die Biokohlesubstrate auf den C-Haushalt und den Humusgehalt?
- Wie beeinflussen die Biokohlesubstrate die Nährstoffspeicherung und die Nährstoffverfügbarkeit insbesondere der Makronährstoffe Stickstoff und Phosphor?
- Welche Inputstoffe sind aus pflanzenbaulicher Sicht besonders für die Herstellung von Biokohlesubstrate geeignet? Wie kann die Prozessführung der Herstellung hinsichtlich Fermentationsgrad, Temperatur und Wassergehalt optimiert werden?
- Welche Empfehlungen für die praktische Anwendung von Biokohlesubstraten lassen sich daraus ableiten?

Die Versuche dieser Dissertation erfolgten im Rahmen des BMBF-Verbundforschungsprojektes LaTerra „Nachhaltige Landnutzung durch regionales Energie- und Stoffstrommanagement bei Nutzung der Terra-Preta-Technologie auf militärischen Konversionsflächen und ertragsschwachen Standorten“ im Regionalprojekt 2 „Anwendung von Terra Preta im Pflanzenbau auf ertragsschwachen Standorten der Lausitz als integraler Bestandteil eines innovativen, nachhaltigen Land- und Stoffstrommanagements“ (FKZ 033L021B) am Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften in Finsterwalde.

## **2 Stand des Wissens**

### **2.1 Ertragsschwache Standorte und Rekultivierungsflächen der Lausitz**

#### **2.1.1 Grenzertragsstandorte der Lausitz aus landwirtschaftlicher Sicht**

Grenzstandorte sind „[...] alle Flächen, deren gegenwärtige landwirtschaftliche Nutzung ein Faktoreinkommen – Wertschöpfung – hervorbringt, das die Kosten der dabei eingesetzten Faktormengen nicht abzudecken vermag bzw. bei gleichbleibender Entwicklung von Produktivität und Preisen in den nächsten Jahren nicht mehr abdecken wird (Neander, 1973: 295).“ Die Produktivität der Faktorkombinationen wird neben den natürlichen Produktionsbedingungen von den agrarstrukturellen und ökonomischen Bedingungen maßgeblich beeinflusst (Neander, 1973). So unterscheidet Niggemann (1972) in relative und absolute Grenzertragsböden. Absolute Grenzertragsböden lassen sich nicht in eine andere landwirtschaftliche Nutzung mit höheren Erträgen überführen und Strukturverbesserungen, wie Meliorationen, sind unmöglich bzw. unwirtschaftlich (Niggemann, 1972). Relative Grenzertragsböden können hingegen ihren Grenzertragscharakter bei günstigeren Preisentwicklungen, Nutzungsänderungen oder Strukturverbesserungen verlieren (Niggemann, 1972). Die Ertragsfähigkeit ist ein wesentlicher Baustein für die ökonomische Bewertung eines Bodens (Hanff und Lau, 2016; Hanff et al., 2008). Jedoch beeinflussen auch weitere Faktoren wie agrarstrukturelle, sozioökonomische und ökonomische Bedingungen sowie das Betriebsmanagement die Einordnung als Grenzstandort (Kurz, 1998; Neander, 1973; Niggemann, 1972). Nach Krug (2013) ist der Begriff Grenzstandort oder Grenzertragsboden nur dynamisch zu betrachten. Die Variation von technologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen können einen Grenzstandort ohne Einschränkungen wirtschaftlich nutzbar machen und auch umgekehrt (Krug, 2013).

Die Lausitz untergliedert sich von Nord nach Süd in Niederlausitz, Oberlausitz und Lausitzer Gebirge. In dieser Dissertation wird das Augenmerk auf die Grenzertragsstandorte der Niederlausitz im Südosten des Landes Brandenburg gelegt. Die Niederlausitz spiegelt die natürlichen Standortverhältnisse des Landes Brandenburg durch überwiegend geringe Bodenwertzahlen in Kombination mit geringen Niederschlägen, die ungünstig im Jahresverlauf verteilt sind, wie regelmäßig auftretende Vorsommertrockenheit, wider (Gerstengarbe et al., 2003; Hanff und Lau, 2016; Hanff et al., 2008; Kurz, 1998). Das langjährige Niederschlagsmittel von 1981 bis 2010 der Wetterstation Cottbus liegt mit 568 mm (DWD, 2016) deutlich unter dem gesamtdeutschen Nieder-

schlagsmittel von 797 mm im gleichen Referenzzeitraum (Schönwiese und Trömel, 2011). Die Ackerflächen des Landes Brandenburg werden anhand ihrer Ackerzahl (AZ) in fünf Landbaugebiete (LBG) gegliedert (Tabelle 1). In Brandenburg ist nur das LBG V als Grenzstandort ausgewiesen (Hanff et al., 2008). Etwa 70 % der landwirtschaftlichen Nutzflächen des Landes Brandenburg weisen Ackerzahlen mit einer Bonität unter 35 auf, die zudem häufig eine Verbesserung des Humushaushaltes bedürfen (Hanff et al., 2008). So liegen die mittleren Ackerzahlen der in der Niederlausitz befindlichen Landkreise Elbe-Elster, Oberspreewald-Lausitz und Spree-Neiße mit 31,0, 29,5 und 30,4 unterhalb des Landesdurchschnittes von 33,0 (Hanff und Lau, 2016).

Tabelle 1: Gliederung der Landbaugebiete im Land Brandenburg

LBG	AZ	Anteil an der Ackerfläche in %	Vorzügliche landwirtschaftliche Nutzung
I	> 45	7,3	Weizen-, Zuckerrüben-fähig
II	36 - 45	22,2	Gersten-, Weizen-, Zuckerrüben-fähig
III	29 - 35	36,4	Roggen- Kartoffel-, bedingt Gersten-, Raps- und Weizen-fähig
IV	23 - 28	27,1	Roggen- Kartoffel- und z.T. Mais-fähig
V	> 23	6,9	Grenzstandorte der lw. Nutzung, Eignung für Roggen (Lupine, Seradella)

Quelle: Eigene Darstellung nach Hanff et al. (2008)

Ein großer Teil des Landes Brandenburg ist zudem nach der EU-Verordnung Nr. 1305/2013 als benachteiligtes Gebiet eingestuft (Werner und Dabbert, 1993). Charakteristisch für die typischen Böden Brandenburgs, die Braunerden und Podsole, sind die Nährstoffarmut, eine starke Versauerungsneigung und ein geringes Wasserspeichervermögen (Liedtke und Marschner, 2003). Humuszehrende Bewirtschaftungsformen und Grundwasserabsenkungen durch den Braunkohlenbergbau verschärfen die ohnehin angespannte Ertragssituation (Christen, 2008; Grünwald, 2001). Durch den Klimawandel wird sich die klimatische Wasserbilanz bzw. die Niederschlagsverteilung für die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion in Südbrandenburg weiter verschlechtern (Christen, 2008; Gerstengarbe et al., 2003; Schönwiese und Trömel, 2011). Im Südosten Brandenburgs finden sich unter dem Gesichtspunkt der natürlichen Standortfaktoren Boden und Klima die vergleichsweise ungünstigsten Standortverhältnisse (Kurz, 1998).

Die Ertragsfähigkeit der sandigen Grenzstandorte, deren Wasser- und Nährstoffhaushalt aufgrund des geringen Gehaltes an organischer Bodensubstanz instabil ist (Hüttl



et al., 2004; Körschens et al., 2004), wird von den Auswirkungen des Klimawandels vermutlich in besonderem Maße beeinträchtigt werden.

Unsere landwirtschaftliche Nutzfläche ist begrenzt. Sie nimmt durch Versiegelung, Degradierung etc. kontinuierlich ab bzw. wird unwiederbringlich verbraucht (Bringezu et al., 2009). Daher müssen Maßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung der Ertragsfähigkeit landwirtschaftlicher Nutzflächen, insbesondere der Grenzstandorte, geprüft werden. Eine Aufwertung der ertragsschwachen Grenzstandorte hinsichtlich ihres Wasser-, Nährstoff- und Humushaushaltes durch geeignete Maßnahmen ist anzustreben, um Ertragsminderungen und -ausfälle abzumildern (Lotze-Campen et al., 2009).

### **2.1.2 Landwirtschaftliche Rekultivierung von Kippstandorten im Lausitzer Braunkohlenrevier**

Die Lausitz ist seit nun mehr fast 100 Jahren durch die Spuren des großflächigen und intensiven Braunkohlenbergbaus gezeichnet. Im Lausitzer Revier, dem zweitgrößten deutschen Braunkohlenfördergebiet mit einer jährlichen Fördermenge von rund 64 Mio. t, wurde bisher eine Fläche von rund 90.000 ha durch den Bergbau direkt beansprucht und devastiert (Kohlenwirtschaft, 2014). Durch die Abtragung der Deckschichten, die auf den Braunkohleflözen lagern, bis in größere Tiefen wird die natürliche Oberflächengestalt der Landschaft zerstört mit dem einhergehenden Verlust von Lebensräumen für Pflanzen und Tieren (Pflug, 1998). Zudem wurde durch die jahrzehntelangen Sumpfungmaßnahmen ein Grundwasserabsenkungstrichter erzeugt, der sich über etwa 2100 km<sup>2</sup> ausgedehnt hat (BMU, 1994; Grünewald, 2001; Hüttl, 2001; Hüttl et al., 1999). Allein durch die Sumpfungmaßnahmen entstand in dieser Region ein geschätztes Grundwasserdefizit von etwa 9 Mrd. m<sup>3</sup>, das nicht aus den jährlichen Niederschlägen von knapp 600 mm befriedigt werden kann (BMU, 1994; Hüttl, 2001).

Der Eingriff in die Landschaft durch die Bergbautreibenden muss vermeidbare Beeinträchtigungen der Natur und Landschaft unterlassen. Unvermeidbare Beeinträchtigungen müssen durch Kompensationsmaßnahmen mit dem Ziel der gleichwertigen Wiederherstellung des betroffenen Naturraumes ausgeglichen werden (BNatSchG, 2009). Der Bergbautreibende ist verpflichtet eine ordnungsgemäße Landschaft unter Absprache mit den lokalen Behörden wieder herzustellen (BBergG, 1980). Diese neu geschaffene Landschaft soll nach verfügbarem kulturfähigem Lockergestein wieder eine land- und forstwirtschaftliche Nutzung ermöglichen. Die Kombination und Durchmischung verschiedener Nutzungssysteme und -intensitäten kann zu einer abwechslungsreichen und attraktiven Landschaft mit einem Naturschutzwert beitragen (Pflug, 1998; Wiedemann et al., 1994).

Unmittelbar auf den Abbau der Braunkohle erfolgt die Herstellung der Bergbaufolgelandschaft. Das Abraummateriale wird wieder aufgeschüttet und mit einer nach der geplanten Nutzung variierenden kulturfähigen Deckschicht überzogen, den sogenannten Kippböden. Diese sind sehr heterogen und können sich aus Quartär bindigen, Quartär sandigen, Tertiär bindigen und Tertiär sandigen Abraumsstraten zusammensetzen (Wünsche et al., 1998). Für die Herstellung landwirtschaftlicher Nutzflächen sollen grundsätzlich nur die wertvollsten Bodensubstrate mit einer Mächtigkeit von mindestens 1 m aufgetragen werden (Illner und Sauer, 1974). Der Kulturwert der Substrate steigt mit Zunahme des Ton- und Schluffgehaltes, der Wasser- und Nährstoffspeicherkapazität, des Vorrates an nährstoffhaltigen Mineralien und Karbonaten sowie des Gehaltes an organischer Substanz (Haubold-Rosar und Gunschera, 2009). Eine Abnahme des Kulturwertes ist mit steigenden Gehalten an Kies und Sand, Metallsulfiden als Säurebildnern sowie abnehmenden Luftkapazitäten (< 10 Vol.-%), abnehmenden nutzbaren Feldkapazitäten (pF 1,8 - 4,2), zunehmender Lagerungsdichte mit paralleler Verringerung des durchwurzelbaren Raumes zu verzeichnen (Haubold-Rosar und Gunschera, 2009).

Im Lausitzer Revier erfolgt für die landwirtschaftliche Rekultivierung eine gezielte Gewinnung der kulturfähigen Substrate, insbesondere aus der Substratgruppe IV - quartäre bindige Substrate (Gunschera, 1996; Haubold-Rosar, 2005; Neumann, 1997, 2008; Rauhut, 1998). Die Kippböden sind weitgehend frei von rezenter organischer Substanz und ihre mikrobielle Aktivität ist zunächst nur gering (Gunschera, 1998). Sie weisen keinen Dauerhumus auf (Wünsche et al., 1998). In Folge dessen sind die Wasserspeicherung und der Nährstoffumsatz unzureichend. Insbesondere die Makronährstoffe Stickstoff und Phosphor sind neben dem Wasser ertragslimitierend (Gunschera, 1998). Zudem treten lokal begrenzt höhere Kohle- und Schwefelgehalte auf (Wünsche et al., 1998). Die Bodenfruchtbarkeit der Kippböden muss daher über lange Zeiträume und mit hohem Aufwand wiederhergestellt werden. In der ersten Rekultivierungsphase sind die Kippböden bezüglich ihrer Ertragsfähigkeit in das LBG IV (Tabelle 1) einzuordnen. Das vorrangige Ziel der landwirtschaftlichen Rekultivierung ist mittels Humusanreicherung eine nachhaltige Entwicklung der Bodenfruchtbarkeit zu fördern, so dass die Agrarflächen bei einer standortgerechten Bodenbewirtschaftung langfristig zur Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln sowie für den Anbau nachwachsender Rohstoffe dienen (Schlenstedt et al., 2014).

Der Prozess der Bodenbildung wird durch eine spezielle Fruchtfolge eingeleitet, in ein Schwerpunkt auf dem Anbau Luzerne bzw. Luzernegras liegt. Die anfallenden ober- und unterirdischen Ernterückstände sollen für die Humusbildung auf der Fläche verbleiben (Gunschera, 1978; Gunschera, 1996; Gunschera, 1998; Vogler, 1981). In den

ersten Rekultivierungsjahren liegen erschwerte Anbaubedingungen durch eine ungünstige Bodenstruktur im Saatbettbereich und ein unausgeglichenes Nährstoffangebot vor, so dass die Saatmenge um 10 - 20 % gegenüber der normalen Empfehlung erhöht werden sollte, um das Auflaufen eines stabilen Feldbestandes zu gewährleisten (Schlenstedt et al., 2014).

Stabile Erträge werden neben den Boden- und Witterungsbedingungen durch die Düngung beeinflusst. Besonders bedeutsam ist der Stickstoff (N), da in den kohle- und humusfreien bis armen Kippböden der N-Gehalt äußerst gering (0,003 bis 0,01 %) ist. Zudem enthalten die Kippböden teilweise fossile Huminstoffe aus der Braunkohle, die durch sehr weite C/N-Verhältnisse gekennzeichnet sind und daher insbesondere zu Beginn der Rekultivierung als N-Senke zu betrachten sind (Katzur, 1998; Laves et al., 1993). Mittels erhöhter N-Gaben, die den Nährstoffentzug durch den Pflanzenaufwuchs übertreffen, kann ein stickstoffreicher Nähr- und Dauerhumus und ein optimaler Nährstoffvorrat vergleichbar zu den unverritzten landwirtschaftlichen Standorten (Ap-Horizont N-Gehalte 0,03 bis 0,5 %) aufgebaut werden (Gunschera, 1998; Haubold-Rosar und Gunschera, 2009).

Phosphor (P) und Kalium (K) werden entsprechend des Pflanzenbedarfs bis zum angestrebten Richtwert mineralisch gedüngt (Haubold-Rosar und Gunschera, 2009; Von Wulffen et al., 2008).

Nach der Rekultivierung können die Kippböden, insbesondere die Kipplehmsand- und Kipsandlehmstandorte der Substratgruppe IV, in die Landbaugebiete II und III eingeordnet werden (Gunschera, 1996; Hanff et al., 2008).

## **2.2 Organische Dünge- und Bodenverbesserungsmittel und Stoffstrommanagement**

### **2.2.1 Organische Düngung und Bodenverbesserung**

Nach Schilling (2000) ist Düngung die Beeinflussung des Angebots an stofflichen Wachstumsfaktoren durch gezielte Maßnahmen. Die Nährstoffträger werden hierbei direkt zu der Pflanze oder dem Nährsubstrat hinzugegeben (Schilling, 2000). Das Düngegesetz (2009) definiert in § 2 Düngemittel als Stoffe, die dazu bestimmt sind, Nutzpflanzen Nährstoffe zuzuführen, um deren Wachstum zu fördern und ihren Ertrag zu erhöhen oder ihre Qualität zu verbessern, oder auch um die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten oder zu verbessern (DüngG, 2009). Zudem gibt es die Gruppe der Bodenhilfsmittel, die ohne wesentliche Nährstoffgehalte die biologischen, chemischen oder physikalischen Eigenschaften des Bodens beeinflussen, um die Wachstumsbedingungen für Nutzpflanzen zu verbessern oder die symbiotische Bindung von Stickstoff zu fördern (DüngG, 2009).

Die Düngemittel werden in organische und mineralische Dünger unterteilt. Unter organischen Düngern versteht man die Wirtschaftsdünger (Stallmist, Jauche, Gülle), die Stroh- und Gründüngung und die Siedlungsabfälle (Komposte und Klärschlamm) (Schilling, 2000). Es handelt sich um eine sehr heterogene Gruppe von Stoffgemischen, die eine Vielzahl von Ausgangsstoffen nutzt (Schilling, 2000). Organische Düngemittel sollen den Bedarf der Böden an organischer Substanz decken, die in den verwendeten Abfällen enthaltenen Nährstoffe nutzen und gleichzeitig eine schadlose Verwertung der Abfallstoffe gewährleisten (Schilling, 2000).

Ein Großteil der Nährelemente, insbesondere bei N und P, liegt in den organischen Düngemitteln in gebundener Form vor. Diese Verbindungen müssen zunächst mineralisiert werden bis die Nährstoffe in pflanzenverfügbarer Form vorliegen. Die dabei entstehenden Zwischenstufen und Verbindungen mikrobieller Herkunft wirken stabilisierend und verbessernd auf das Bodengefüge. Aufgrund der strukturverbessernden Wirkung und der langsamen Nährstofffreisetzung verbessern sie die Bodenfruchtbarkeit und werden daher auch als Bodendünger bezeichnet (Schilling, 2000). Durch die Erhöhung des organischen Materials im Boden werden die Wasserspeicherfähigkeit und die Porosität bzw. Durchlässigkeit verbessert, während die Neigung zur Dichtlagerung abnimmt (Hamblin und Davies, 1977). Speziell für die Rekultivierung der kohlehaltigen sowie der kohle- und humusfreien Kippböden ist eine nachhaltige Verbesserung der Nährstoffverhältnisse nur über eine Humusanreicherung erreichbar (Katzur, 1987).

In diesem Zusammenhang liegt ein verstärkter Einsatz von organischen Düngemitteln

bzw. Bodenverbesserungsmitteln (BVM) aus organischen Massenabfällen wie Kompost, Stallmist oder auch Klärschlamm, auf der Hand. Es können große Mengen organisches Material in den Boden eingebracht werden. Die Nährstoffe liegen organisch gebunden vor und werden langfristig mineralisiert. Auf landwirtschaftlichen Flächen befördern Komposte die weitere Humusbildung und -reproduktion, da sie Nahrung und Energie für die Bodenorganismen liefern (Haubold-Rosar und Gunschera, 2009). Im Bereich der kommunalen Abfallwirtschaft befinden sich große Potenziale an bisher ungenutzten Abfallstoffen wie beispielsweise Grünschnitt (grasartig und holzig) und Gewässerpflegematerial, die in Südbrandenburg in größeren Mengen verfügbar sind (Böhmer et al., 2013).

Allerdings werden organische Düngemittel wie Kompost, Stallmist oder auch Klärschlamm bedingt durch unzureichende Effizienz, geringe Verfügbarkeit, hohe Kosten, aber auch durch mangelnde Akzeptanz der potenziellen Anwender bisher kaum verwendet (Mönicke, 2005).

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Böden bietet die Zufuhr von Kohlen oder Stoffen auf Kohlebasis, wie zum Beispiel der Humusstoffersatzstoff NOVIHUM® (Patentnummer 6695892) (Katzur und Böcker, 2007).

Ein neuerer Ansatz ist die Verbesserung der Böden durch die Verwendung von Biokohlen allein und als Zuschlagstoff zu der Kompostierung nach dem Terra Preta Konzept. Dies wird seit einigen Jahren intensiv wissenschaftlich bearbeitet (Verheijen et al., 2010; Verheijen et al., 2014). Das Terra Preta Konzept geht auf die schwarzerdeartigen Böden des Amazonasgebietes zurück, die durch die Zugabe von Holzkohle und organischen Abfälle vor 500 bis mehreren 1000 Jahren entstanden sind (Glaser, 2007; Glaser und Birk, 2012; Lehmann und Joseph, 2009). Abbaustabile Biokohlen lassen sich mit dem Pyrolyseverfahren aus Biomasse gewinnen (Schimmelpfennig und Glaser, 2012). Die Verwendung der Biokohle als Bodenverbesserungsmittel erfolgt allein und auch als Biokohlesubstrat (BKS), welche durch die gemeinsame Kompostierung und Fermentation der Biokohle mit organischen Abfallstoffen entstehen. Für die Anwendung im Pflanzenbau wird die Erzeugung sogenannter Biokohlesubstrate bzw. Biokohle-Komposte empfohlen (Fischer und Glaser, 2012; Glaser und Kammann, 2013; Krieger et al., 2011; Terytze et al., 2016a; Terytze et al., 2015; Terytze et al., 2016b; Vogel et al., 2016).

### **2.2.2 Eigenschaften sowie Qualitätskriterien von Komposten und deren Eignung zur landwirtschaftlichen Nutzung**

Die Kompostierung ist ein Verfahren zur biologischen Behandlung von vorwiegend organischen Abfällen mit nur sehr geringer Schadstoffbelastung (Bilitewski und Härdtle,

2013). Unter aeroben Bedingungen wird die organische Substanz durch Mikroorganismen, hauptsächlich Bakterien (Actinomyceten) und Pilze, abgebaut (Kämpfer und Weißenfels, 2001). Es handelt sich dabei um einen exothermen Prozess, der zur Selbsterhitzung des Kompostmaterials führt (Kämpfer und Weißenfels, 2001). Nach Bilitewski und Härdtle (2013) ist für die aerobe Rotte ein optimales C/N-Verhältnis von 35 : 1 anzustreben, da die Mikroorganismen dieses Mischungsverhältnis bevorzugen. Das C/N-Verhältnis kann durch diverse Zuschlagstoffe wie beispielsweise Sägemehl (C/N = 500) oder Küchenabfälle (C/N = 25) justiert werden (Bilitewski und Härdtle, 2013). Ein vom Optimum abweichendes C/N-Verhältnis bewirkt eine Verlängerung der Rottezeit, da die Abbaugeschwindigkeit reduziert wird (Kranert und Cord-Landwehr, 2010). Im Laufe des Kompostierungsprozesses findet eine Humifizierung der organischen Substanz statt (Kämpfer und Weißenfels, 2001). Das C/N-Verhältnis sollte nach dem Abschluss der Rotte bei 15 bis 20 entsprechend der Nährstoffzusammensetzung der Kulturböden liegen (Bilitewski und Härdtle, 2013). Nach Bilitewski und Härdtle (2013) entziehen Komposte mit einem C/N-Verhältnis über 20 dem Boden Stickstoff, während Komposte mit Werten unter 15 Stickstoff freisetzen, der dann toxisch auf die Pflanzen wirken kann.

Entscheidend für den Wert von Komposten sind zudem deren Inhaltsstoffe, die maßgeblich von ihren Ausgangsstoffen beeinflusst werden. Es erfolgt daher eine Unterteilung in Grüngut- und Bioabfallkomposte (Gutser und Ebertseder, 2002). Zudem variieren die Eigenschaften von Komposten in Abhängigkeit ihrer Kompostierungsbedingungen, insbesondere des Rottefortschrittes. Der Rottegrad (RG) beschreibt den Abbau-grad der organischen Substanz während der Kompostierung u. a. über die Selbsterhitzungsfähigkeit des Kompostes. Er ist ein wichtiges Kennzeichen für die biologische Stabilität (Reife) des Kompostes (BGK, 1998, 2014). Die Komposte werden in einer Skala von I bis V wie folgt eingeordnet:

Rottegrad I mit einer Maximaltemperatur > 60 °C (Kompostrohstoff),

Rottegrad II bis III im Temperaturbereich von 60 - 50 °C bzw. 50 - 40 °C (Frischkompost)

Rottegrad IV bis V mit einer Temperatur 40 - 30 °C bzw. < 30 °C (Fertigkompost) (BGK, 2014; Kämpfer und Weißenfels, 2001).

Rogasik und Reinhold (2006) sowie BGK (2012b) definieren Frischkompost als hygienisiertes, in intensiver Rotte befindliches oder zu intensiver Rotte fähiges fraktioniertes Rottegut zur Bodenverbesserung und Düngung (Rottegrad II oder III). Der Fertigkompost ist als hygienisierter, biologisch stabilisierter und fraktionierter Kompost zur Bodenverbesserung und Düngung (Rottegrad IV oder V) zu verstehen (BGK, 2012a; Rogasik und Reinhold, 2006). Für beide Komposttypen kommen ausschließlich aus der

getrennten Sammlung geeignete, sortenreine und zulässige organischer Ausgangsstoffe und Qualitäten gemäß RAL GZ-251 zur Verwendung (BGK, 2014; Rogasik und Reinhold, 2006).

Der Tabelle 2 sind die wertgebenden Eigenschaften und Inhaltsstoffe von Grüngutkomposten ohne Biotonnenanteil und Bioabfallkomposten mit Biotonnenanteil des Landes Brandenburg zu entnehmen (LUA, 2001). Die Grüngutkomposte weisen geringere Wassergehalte, geringere Gehalte an organischer Substanz (Glühverlust) sowie eine höhere Rohdichte auf als die Bioabfallkomposte. Auffällig sind zudem die zum Teil sehr geringen Nährstoffgehalte der Grüngutkomposte, die im bundesweiten Vergleich die angegebenen Wertspannen fast aller Makronährstoffe unterschreiten. Die Nährstoffgehalte der Bioabfallkomposte fallen höher aus. Dies ist auf die unterschiedlichen Ausgangsstoffe zurückzuführen. Die Ausgangsstoffe der Grüngutkomposte weisen in der Regel höhere Anteile an holzigen Bestandteilen auf, was ein weiteres C/N-Verhältnis bedingt als bei den Bioabfallkomposten, deren Ausgangsstoffe zumindest anteilig aus der Getrenntsammlung der Haushalte („Küchenabfälle aus der braunen Tonne“) stammen (Gutser und Ebertseder, 2002; Hüttl et al., 2004). Gutser und Ebertseder (2002) sehen die Grenzen zwischen beiden Kompostarten als fließend an. Vogtman et al. (1993) beschreiben, dass der Nährstoffgehalt sowie die Gehalte an organischer Substanz und Kalk von Komposten zudem einem regionalen Gefälle zunehmend von Nord- nach Süddeutschland unterliegen. Zudem sind Komposte aufgrund der Vielzahl an möglichen Ausgangsstoffen eine sehr heterogene Gruppe. Für die Makronährstoffe werden in der Literatur unterschiedliche Gehalte angegeben. Döhler (1996) benennt etwa 5 % des Gesamt-N als löslichen Stickstoff - in etwa 5 - 10 kg N/t FS. Die Gesamt-N-Gehalte der Bioabfallkomposte liegen etwa 20 % über denen der Grüngutkomposte (Döhler, 1996). Laut Rogasik und Reinhold (2006) liegen die N-Gesamtgehalte (TS) in Fertigkomposten bei 1,4 % N und in Frischkompost bei 1,6 % N. Die Gesamtgehalte an P (TS) geben sie in Fertigkomposten mit 0,64 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und in Frischkomposten mit 0,73 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> an. Der K-Gesamtgehalt (TS) wird ebenda mit 1,1 % K<sub>2</sub>O in Fertigkomposten und 1,2 % K<sub>2</sub>O in Frischkomposten ausgewiesen. Gutser und Ebertseder (2002) geben die N-Gesamtgehalte (TS) mit einer Spanne von 0,5 - 1,5 % N für die Grüngutkomposte und 1,0 - 1,8 % N für die Bioabfallkomposte an. Die Nährstoffverfügbarkeit im Fertigkompost bewerten Gutser und Ebertseder (2002) mit einer Anrechnungsfähigkeit von 5 % für N, 35 % für P und über 75 % für K. Nach VDLUFA (1996) sind bei Grüngutkomposten 5 - 10 % N und bei Bioabfallkomposten 10 - 15 % N der N-Gesamtzufuhr als verfügbar anzurechnen. Reinhold (2005) gibt den pflanzenverfügbaren Stickstoff in Komposten als Summe von Ammonium- und Nitratstickstoff zuzüglich 5 % des organisch gebundenen Stickstoffs ohne Berücksichtigung

der hohen Abbaustabilität der kompostierten organischen Substanz an. Haubold-Rosar und Gunschera (2009) gehen von 5 % verfügbarem N bei Grüngutkomposten und 10 % verfügbarem N des Gesamtstickstoffs bei Bioabfallkomposten aus.

Tabelle 2: Wertgebende Eigenschaften und Inhaltsstoffe von Komposten im Land Brandenburg (Medianwerte) verändert nach LUA (2001) und Einordnung nach LAGA (1995)

Parameter	Grüngutkompost (n = 43) <sup>1</sup>	Bioabfallkompost (n = 19) <sup>1</sup>	Mittelwerte (Intervall für 75 % aller Proben) <sup>2</sup>
Rohdichte [g/l FS]	929	740	680 (550 - 850)
Wassergehalt [% FS]	27	48	36 (35 - 50)
Wasserkapazität [% TS]	89	193	-
pH-Wert	7,1	7,2	7,6 (7,0 - 8,3)
OS (Glühverlust) [% TS]	17,4	37,5	35 (25 - 45)
C/N-Verhältnis	15,8	14,9	-
N <sub>gesamt</sub> [% TS]	0,5	1,4	1,1 (0,8 - 1,5)
N <sub>min</sub> [mg/l FS]	68	269	150 (100 - 400)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sub>gesamt</sub> [% TS]	0,2	1	0,7 (0,4 - 1,0)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sub>löslich</sub> [mg/l FS]	303	709	1200 (500 - 2000)
K <sub>2</sub> O <sub>gesamt</sub> [% TS]	0,3	1	1,2 (0,6 - 1,5)
K <sub>2</sub> O <sub>löslich</sub> [mg/l FS]	1130	3565	2500 (1000 - 6000)
MgO <sub>gesamt</sub> [% TS]	0,3	0,6	0,4 (0,2 - 0,7)
MgO <sub>löslich</sub> [mg/l FS]	287	431	250 (150 - 500)
CaO <sub>gesamt</sub> [% TS]	1,8	4,3	3 (2 - 6)

<sup>1</sup>) LUA (2001); <sup>2</sup>) LAGA (1995)

In Tabelle 3 werden die wertmindernden Eigenschaften und die Schwermetalle brandenburgischer Grüngut- und Bioabfallkomposte in Bezug zu den Aufbringungsgrenzwerten der BioAbfV (2012) dargestellt. Die Fremdstoffanteile beider Kompostarten liegen deutlich über den geforderten Grenzwerten der BioAbfV (2012). Der Anteil an Steinen, keimfähigen Samen und austriebsfähigen Pflanzenteilen liegt im Rahmen der gesetzlichen Forderung (BioAbfV, 2012). Der Salzgehalt der Bioabfallkomposte ist deutlich höher als der der Grüngutkomposte, liegt aber innerhalb der Wertspanne, die von LAGA (1995) angegeben wird. Die Schwermetallgehalte der Grüngutkomposte sind größtenteils deutlich geringer als die der Bioabfallkomposte.



Die Bioabfallkomposte weisen tendenziell höhere Gesamtgehalte für Cu und Zn auf. In der Rhizosphäre wird allerdings der Anteil der verfügbaren Gehalte, insbesondere von Cu und Zn, durch den pH-Wert beeinflusst (Schilling, 2000), so dass von geringen Verfügbarkeiten auszugehen ist.

Da Komposte vergleichbar mit organischen Mehrnährstoffdüngern sind, wird die Ausbringungsmenge von dem Nährstoff – in der Regel N und K – begrenzt, dessen Düngbedarf zuerst abgedeckt ist (Severin, 1992), so dass darüber eine zusätzliche Mengenbegrenzung erfolgt. Die Schwermetallgehalte der Grüngut- und Bioabfallkomposte liegen unterhalb der geforderten Grenzwerte der BioAbfV (2012). Sie unterschreiten ebenfalls die Grenzwerte der Aufbringungsbeschränkung von 30 t TM/ha x 3a gemäß § 6 Abs. 1 Satz 1 (BioAbfV, 2012). Döhler et al. (2002) sprechen sich gegen eine langfristig wiederkehrende Anwendung von Bioabfallkomposten aus, da sie zu deutlichen Schwermetallanreicherungen führen kann. Die Kompostanwendung sollte vorzugsweise auf einige Jahre beschränkt zur Verbesserung der Humusversorgung und der physikalischen Bodeneigenschaften erfolgen (Döhler et al., 2002).

Tabelle 3: Wertmindernde Eigenschaften und Schwermetallgehalte von Komposten im Land Brandenburg (Medianwerte) verändert nach LUA (2001) mit Einordnung zur BioAbfV (2012)

Parameter	Grüngutkompost	Bioabfallkompost	BioAbfV <sup>1)</sup>
Fremdstoffe [% TS]	0,99	1,27	0,5
Steine [% TS]	1,55	1,06	5
KSAP <sup>2)</sup> [Anzahl/l FS]	1,8	0	≤ 2
Salzgehalt [g/l FS]	1,9	7,1	2 - 8 <sup>3)</sup>
Chlorid <sup>3)</sup> [mg/l]	24	320	
Sulfat <sup>3)</sup> [mg/l]	99	110	
Fluorid <sup>3)</sup> [mg/l]	0,22	0,10	
<b>Schwermetalle [mg/kg TS]</b>			
Blei (Pb)	40	56	150 (100)
Cadmium (Cd)	0,4	0,5	1,5 (1)
Chrom (Cr)	22	24	100 (70)
Kupfer (Cu)	30	53	100 (70)
Nickel (Ni)	11	11	50 (35)
Quecksilber (Hg)	0,15	0,21	1 (0,7)
Zink (Zn)	155	211	400 (300)

<sup>1)</sup> BioAbfV (2012): Aufbringungsgrenzwerte § 4 Abs. 3 gemäß § 6 Abs. 1 Satz 1; (gemäß § 6 Abs. 1 Satz 2); <sup>2)</sup> KSAP = Keimfähige Samen und austriebsfähige Pflanzenteile; <sup>3)</sup> im S4-Eluat

### 2.2.3 Stoffstrommanagement

Stoffstrommanagement ist eine zielorientierte, ganzheitliche und effiziente Beeinflussung von Stoffsystemen. Die Zielvorgaben kommen aus dem ökologischen und ökonomischen Bereich unter Berücksichtigung von sozialen Aspekten (Enquete-Kommision, 1994). Die Entwicklung der Ziele erfolgt auf betrieblicher Ebene, durch die beteiligten Akteure an einem Stoffstrom wie z. B. Kommunaler Abfallentsorger und Landwirtschaftsbetrieb oder Komposthersteller oder auf der staatlichen Ebene. Die staatliche Ebene vertritt vor allem die Interessen der Allgemeinheit und gibt die gesetzlichen Rahmenbedingungen für die Akteure vor (Enquete-Kommision, 1994; Friege et al., 2013). Aus unternehmerischer Sicht handelt es sich um die Optimierung von Betriebsabläufen bei optimaler Ausnutzung der verfügbaren bzw. eingesetzten Ressourcen durch die Kreislaufführung von Stoffen und Vermeidung von Abfällen. Friege et al. (2013) beschreiben Stoffstrommanagement auch als unvermeidbare Konsequenz auf lokale, regionale und globale Umweltprobleme.

Die Nutzung von u. a. Bioabfällen als Ausgangsstoff für die Kompostierung ist ein Beispiel für die Umsetzung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes. Unvermeidbare Abfälle sollen im Sinne einer Kreislaufwirtschaft verwertet werden, wobei eine stoffliche Verwertung einer thermischen Nutzung vorzuziehen ist (KrWg, 2012). Dies wird durch ein nachhaltiges Stoffstrom- und Ressourcenmanagement ermöglicht, welches den anthropogenen Materialumsatz optimiert (Kranert und Cord-Landwehr, 2010). Eine Anwendung auf alle wirtschaftlichen und abfallwirtschaftlichen Bereiche einer Region über die reine Siedlungsabfallwirtschaft hinaus ist sinnvoll, um alle Ressourceneinsparungspotenziale zu nutzen (Kranert und Cord-Landwehr, 2010).

Brunner (2013) stellt die Ebene des regionalen Stoffhaushaltes dar, wobei er die Region als eine geographische Einheit mit einer maximalen Ausdehnung auf wenige tausend Quadratkilometer definiert. Das gemeinsame Ziel der regionalen Akteure ist es die eigenen Ressourcen zu nutzen, die regionale Umwelt zu schützen, aber auch Stoffströme in der Region zu halten und zu steuern mit dem Ziel einer nachhaltigen regionalen Entwicklung.

Bei dem Terra Preta Konzept handelt es sich um ein System, das sehr gut verschiedene Stoffströme miteinander verbindet (Krieger et al., 2011; Terytze et al., 2015; Terytze et al., 2016b; Wagner et al., 2012). Verschiedene organische Abfallstoffe sollen nach dem Vorbild der Amazonas-Ureinwohner mit Biokohle kompostiert und fermentiert werden (Glaser und Birk, 2012; Lehmann und Joseph, 2009; Terytze et al., 2015; Terytze et al., 2016b). Es entsteht ein hochwertiger Biokohlekompost (BKS), der einen positiven Beitrag zur Bodenverbesserung leisten kann und zusätzlich große Mengen

an CO<sub>2</sub> speichern kann (Heck et al., 2014; Lehmann, 2007). Die Etablierung dieses Systems kann darüber hinaus die Wirtschaftskraft in der durchführenden Region nachhaltig stärken (Krieger et al., 2011; Terytze et al., 2015).

## 2.3 Biokohle

### 2.3.1 Definition des Begriffs Biokohle

Der Begriff Biokohle (engl.: biochar) kann als Oberbegriff für Kohlen aus verschiedenen organischen Biomassen und Herstellungsverfahren verstanden werden (Haubold-Rosar et al., 2016). Das Europäische Pflanzenkohle Zertifikat („European Biochar Certificate“), welches Richtlinien zur Herstellung von hochwertiger Pflanzenkohle vorgibt, definiert Biokohle als durch Pyrolyse (Sauerstoffgehalt  $< 2\%$ , Temperatur  $350 - 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) erzeugte Kohlen (Schmidt et al., 2012). Die Ausgangsstoffe, ausschließlich organische Reststoffe, werden in einer Positivliste aufgeführt (Schmidt et al., 2012). Die Pflanzenkohlen müssen nach Schmidt et al. (2012) u. a. folgende Kriterien erfüllen:

- Kohlenstoffgehalte von mindestens  $50\%$  TM,
- Black-Carbon-Gehalte von  $10$  bis  $40\%$  des Gesamtkohlenstoffgehaltes (Schimmelpfennig und Glaser, 2012),
- ein molares O/C-Verhältnis  $< 0,4$  und ein molares H/C-Verhältnis  $< 0,6$  (Schimmelpfennig und Glaser, 2012).

Durch diese Vorgaben werden Kohlen, die durch die Herstellungsverfahren Torrefizierung, hydrothermale Carbonisierung und Verkokung erzeugt werden, von der Zertifizierung ausgeschlossen (Schmidt et al., 2012).

Dies deckt sich mit der in der Literatur üblichen Betrachtungsweise von Biokohle als ausschließlich pyrolytisch erzeugte Kohle aus organischen Stoffen (Lehmann und Joseph, 2009). Der Einsatz der Biokohle zur Bodenverbesserung und C-Sequestrierung wird vielfach hinsichtlich auf positiver Synergieeffekte empfohlen (Glaser et al., 2009; Ippolito et al., 2012a; Jeffery et al., 2011; Kammann et al., 2010a; Laird, 2008; Lehmann, 2007; Lehmann et al., 2006; Schmidt, 2012; Sohi, 2013; Spokas et al., 2012; Steiner et al., 2007; Verheijen et al., 2010). In der deutschsprachigen Literatur wird zudem häufig der Begriff „Pflanzenkohle“ verwendet, um eine Abgrenzung zur Bezeichnung „Bio“ aus der ökologischen Landwirtschaft zu schaffen (Schmidt, 2011).

Im Rahmen dieser Dissertation wird der Begriff Biokohle für pyrolytisch erzeugte Kohlen aus organischen Stoffen verwendet.

### 2.3.2 Pyrolyse – ein Verfahren zur Herstellung von Biokohle

Pyrolyseprozesse macht sich die Menschheit schon seit Langem zu nutzen, beispielsweise zur Herstellung von Holzkohle, Teer und Pech. Gerade in Entwicklungsländern hat die Holzkohle noch heute einen hohen Stellenwert als Energieträger (Antal und Gronli, 2003; Welling, 2016).

Die pyrolytische Zersetzung von Biomasse erfolgt in einem thermo-chemischen Umwandlungsprozess unter Einwirkung von Wärme (endothermer Prozess) und ohne zusätzliche Sauerstoffzuführung bzw. unter Sauerstoffmangel (Luftüberschusszahl ist null) (Hofbauer et al., 2009). Nach Neuling et al. (2016) ist Pyrolyse der Oberbegriff für Anlagen zur Herstellung von primär flüssigen oder primär festen Sekundärenergieträgern aus biogenen Festbrennstoffen. In derartigen Anlagen werden in der Regel immer drei Produktströme mit unterschiedlichen Anteilen erzeugt; d. h. gasförmige, flüssige (gewünschtes Hauptprodukt der schnellen bzw. der mittelschnellen Pyrolyse) und feste Pyrolyseprodukte (gewünschtes Hauptprodukt bei der langsamen Pyrolyse bzw. der Verkohlung) (Neuling et al., 2016). Die Anteile der Produktströme können über die Temperatur, die Feststoff-Verweilzeit und die Aufheizrate beeinflusst werden (Wilk et al., 2016). Das Verfahren der langsamen Pyrolyse bzw. Verkohlung wandelt die Biomasse durch vollständiges Durchlaufen der pyrolytischen Zersetzung zu einem festen, sehr kohlenstoffreichen Produkt, dem sogenannten (Pyrolyse)-Koks (Holzkohle) um (Neuling et al., 2016; Wilk et al., 2016). Dieser Rückstand kann als Biokohle genutzt werden (Downie, 2011; Löhde, 2014; Quicker, 2012; Quicker und Schulten, 2012; Welling, 2016). Die Menge und Qualität der Biokohle kann durch verschiedene Prozessparameter, insbesondere durch die Prozesstemperatur, beeinflusst werden (Antal und Gronli, 2003; Cantrell et al., 2012; Chan und Xu, 2009; Gaskin et al., 2008; Lang et al., 2005; Libra et al., 2011; Rajkovich et al., 2012; Shinogi, 2004; Shinogi und Kanri, 2003; Yuan et al., 2011; Zheng et al., 2013b).

Es gibt verschiedenste Formen der technischen Umsetzung (Welling, 2016), u. a. die PYREG®-Anlage (Hammond und Rödger, 2010; Löhde, 2014), die Low-Tech-Variante Kon-Tiki (Schmidt und Taylor, 2014) sowie den Schottdorf-Meiler der Firma Carbon Terra, eine Kombination aus Vergasungs- und Pyrolyseprozessen (Krieger, 2015; Neubauer, 2016). Einen Überblick über weitere thermo-chemische Verfahren zur Herstellung von Kohlen geben u. a. Hofbauer et al. (2009), Neuling et al. (2016), Wilk et al. (2016), Libra et al. (2011), Welling (2016) und Haubold-Rosar et al. (2016).

Die geometrische Anordnung bzw. Struktur des Ausgangsstoffes bleibt bei der Pyrolyse weitestgehend erhalten, da komplexere Verbindungen wie bspw. Lignin bestehen bleiben (Downie et al., 2009). Durch die Alterung der Oberflächen der frischen Biokoh-

len bilden sich diverse funktionelle Gruppen, wie Carboxyl-, Phenol-, Carbonyl-, Hydroxyl- oder Aminogruppen (Hammes und Schmidt, 2009). Dadurch nimmt die negative Ladung der Oberflächen zu und erhöht gleichzeitig die Kationenaustauschkapazität (Cheng et al., 2008a; Cheng et al., 2006; Liang et al., 2006; Yuan et al., 2011). Dies ermöglicht die pflanzenverfügbare Bindung von Nährstoffen. Die Zugabe von Biokohle erhöht die Wasserhaltekapazität des Bodens (Glaser et al., 2002). Hilscher und Knicker (2011) beobachten eine Verlagerung der Biokohle mit dem Sicker- und Oberflächenwasser. Die bereits große innere Oberfläche der Biokohle, kann durch die sogenannte Aktivierung der Kohle, bei der Wasserdampf oder Kohlenstoffdioxid durch die glühende Kohle (800 bis 1000 °C) geleitet wird, noch um ein Vielfaches vergrößert werden (Welling, 2016).

### **2.3.3 Nährstoffgehalte der Biokohle**

Die Nährstoffgehalte der Biokohlen sind von den verwendeten Ausgangsstoffen und deren Nährstoffgehalten abhängig und variieren entsprechend (Haubold-Rosar et al., 2016). Darüber hinaus wird die chemische Struktur und die Zusammensetzung der Biokohle während der Pyrolyse durch die Prozessparameter, insbesondere durch die Prozesstemperatur und den Temperaturverlauf beeinflusst (Atkinson et al., 2010; Chan und Xu, 2009; Rajkovich et al., 2012; Spokas et al., 2012). Haubold-Rosar et al. (2016) fassen die Nährstoffgehalte von Biokohlen aus diversen Ausgangsstoffen detailliert zusammen. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die mittleren Gesamtgehalte an N, P und K von Biokohlen aus den Stoffgruppen Holz, Stroh, Bioabfälle, Tiermist und Klärschlamm (Medianwerte).

Steigende Prozesstemperaturen erhöhen in der Regel die gasförmigen Verluste und bewirken eine Abnahme des N-Gehaltes (Bagreev et al., 2001; Cantrell et al., 2012; Lang et al., 2005; Shinogi, 2004; Yuan et al., 2011) und der N-Verfügbarkeit (Bagreev et al., 2001; Hossain et al., 2011; Wang et al., 2012; Zheng et al., 2013a). Gaskin et al. (2008) beschreiben gasförmige N-Verluste ab 200 °C, welche durch die Pyrolyse bei 400 bis 500 °C einen N-Verlust von 50 % gegenüber den Ausgangsstoffen erreichen. Die N-Verluste können durch niedrige Pyrolysetemperaturen reduziert werden (Shinogi und Kanri, 2003). Zudem beobachten Bagreev et al. (2001) in der Temperaturspanne von 400 bis 600 °C den stärksten Rückgang der N-Verfügbarkeit. Haubold-Rosar et al. (2016) kommen zu dem Schluss, dass Pyrolysetemperaturen von 500 °C nicht überschritten werden sollten, um Biokohlen mit hohen Nährstoffgehalten und guter Nährstoffverfügbarkeit zu erhalten.

Tabelle 4: Gesamtgehalte an N, P und K von Biokohlen unterschiedlicher Ausgangsstoffe verändert nach Haubold-Rosar et al. (2016)

Biokohle (Ausgangsstoff - Herstellung)	N [% TS]	P [% TS]	K [% TS]
Holz - Pyrolyse < 500 °C	0,1	< 0,01	0,1
Holz - Pyrolyse ≥ 500 °C	0,2	< 0,01	0,2
Stroh - Pyrolyse < 500 °C <sup>1)</sup>	0,9	0,15	1,9
Stroh - Pyrolyse ≥ 500 °C <sup>1)</sup>	0,8	0,34	2,5
Bioabfälle - Pyrolyse < 500 °C	0,9	0,08 (0,54 <sup>2)</sup> )	0,3 (1,4 <sup>2)</sup> )
Bioabfälle - Pyrolyse ≥ 500 °C	0,9	0,09 (0,78 <sup>2)</sup> )	0,4 (2,5 <sup>2)</sup> )
Tiermist - Pyrolyse < 500 °C	2,7	2,5	3,2
Tiermist - Pyrolyse ≥ 500 °C	2,0	3,4	2,9
Klärschlamm - Pyrolyse < 500 °C	3,3	2,8	0,2
Klärschlamm - Pyrolyse ≥ 500 °C	1,7	3,5	0,4

<sup>1)</sup> Mais, Reis, Raps, Soja, Energiegras <sup>2)</sup> nur Küchenabfälle

Die Biokohle ist weitgehend stabil gegenüber dem mikrobiellem Abbau, so dass polyzyklisch an die Biokohle gebundener Stickstoff zunächst nicht pflanzenverfügbar ist (Schmidt und Noack, 2000). Hamer et al. (2004) und Hockaday et al. (2006) stellten fest, dass die Biokohle im Boden geringfügig abgebaut wird. Nach Hockaday et al. (2006, 2007) sind Pilze für den Abbau der Biokohle verantwortlich.

Zunehmende Pyrolysetemperaturen (250 - 800 °C) bewirken steigende Phosphorgehalte der Biokohlen (Shinogi, 2004) und eine abnehmende P-Verfügbarkeit (Bridle und Pritchard, 2004; Hass et al., 2012; Shinogi, 2004; Zheng et al., 2013b). Nach der Pyrolyse von phosphorreicher Klärschlamm oder Rindermist beträgt der verfügbare P-Gehalt weniger als 10 % im Vergleich zu den Ausgangsstoffen (Shinogi, 2004). Gaskin et al. (2008) beschreiben eine Anreicherung der Gesamtnährstoffgehalte von Phosphor, Kalium, Calcium und Magnesium in der Biokohle bei Erhöhung der Pyrolysetemperatur von 400 auf 500 °C gegenüber den Ausgangsstoffen, wobei die verfügbaren Anteile dieser Nährstoffe rückläufig sind.

### 2.3.4 Schadstoffgehalte der Biokohle

Die Qualität der Biokohle wird maßgeblich von den Ausgangsstoffen beeinflusst. Liegen in den Ausgangsstoffen anorganische und organische Schadstoffe vor, können diese durch den Pyrolyseprozess angereichert, aber auch abgebaut werden. Schwermetalle werden während des Pyrolyseprozesses eher angereichert (Koppolu et al., 2004). Einige Untersuchungen wiesen in einzelnen Biokohlen erhöhte Zinkgehalte

(Freddo et al., 2012; Singh et al., 2010a) und Kupfergehalte (Singh et al., 2010a) nach. Die organischen Schadstoffe hingegen werden vorwiegend abgebaut (Bridle et al., 1990; Lutz et al., 2000; Sütterlin et al., 2007). Während der Pyrolyse können sich polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und Dioxine bilden (Hale et al., 2012). Die PAK-Gehalte einiger untersuchter Biokohlen (Freddo et al., 2012; Hale et al., 2012; Hilber et al., 2012; Keiluweit et al., 2012; Quilliam et al., 2012) lagen teilweise über den Grenzwerten des Europäischen Pflanzenkohlezertifikats (Schmidt et al., 2012) und der Düngemittelverordnung (DüMV, 2012). Dies ist zum Teil auf erhöhte Naphthalenkonzentrationen (Hale et al., 2012; Hilber et al., 2012; Quilliam et al., 2013; Schimmelpfennig und Glaser, 2012) zurückzuführen. Fabbri et al. (2012) weisen diesbezüglich auf methodische Extraktionsunterschiede hin und plädieren für die Weiterentwicklung der Methoden und deren Abgleich mit den bisherigen Methoden. Die gemessenen Dioxinkonzentrationen von Hale et al. (2012) und Downie et al. (2012) lagen unter dem deutschen Grenzwert von 30 ng I-TEQ/kg für Nebenbestandteile von Düngemitteln (DüMV, 2012). Nach Bilitewski und Härdtle (2013) ist die Pyrolyse ein Verfahren zur Verminderung der organischen Schadstoffgehalte (PAK) in der festen Phase, insbesondere bei einem Pyrolyseverfahren im Drehrohr, da die PAK-Gehalte im Pyrolyserückstand deutlich geringer sind als bspw. im Hausmüll. Ebenso bewerten sie die Bildung von Dioxinen im Vergleich zur Verbrennung als gering.

Schadstofffreie Biomassen sind für die Biokohleherstellung sehr gut verwertbar. Biomassen, die von kontaminierten Standorten stammen, können bereits durch erhöhte Schwermetallgehalte belastet und somit nur noch begrenzt verwertbar sein (Morishita und Boratynski, 1992). Bei der Verwendung von Bioabfällen, Wirtschaftsdüngern, Gärückständen und Klärschlamm muss besonders auf eventuelle Schadstoffbelastungen geachtet werden, da bei diesen Stoffe stärker damit zu rechnen ist (Haubold-Rosar et al., 2016).



## 2.4 Biokohlesubstrate

### 2.4.1 Biokohle als Additiv in der Kompostierung

Die archäologischen Befunde zur Entstehung der Terra Preta do Indio sprechen für eine gemeinsame Kompostierung und Fermentierung von Holzkohle mit diversen organischen Materialien wie Siedlungs- und Pflanzenabfälle und Exkrementen (Glaser, 2007; Glaser und Birk, 2012; Glaser et al., 2001; Lima et al., 2002; Neves et al., 2003). Im asiatischen Raum kann nach Steiner (2010), Yoshizawa et al. (2005) und Wiedner und Glaser (2015) auf eine lange Tradition der gemeinsamen Kompostierung von Biokohle und organischen Abfallstoffen zurückgeblendet werden. Für die Kompostierung nährstoffreicher und nasser Materialien, wie bspw. Mist und Klärschlamm, sind Zuschlagsstoffe (sog. „bulking agents“) zur Auflockerung und Belüftung unerlässlich (Bernal et al., 2009). Die stark poröse Biokohle ist nachweislich ein geeigneter „bulking agent“ für die Kompostierung und wirkt darüber hinaus als Regulator für das C/N-Verhältnis (Dias et al., 2010; Steiner et al., 2010; Steiner et al., 2011; Terytze et al., 2015; Terytze et al., 2016b; Wagner et al., 2014; Wang et al., 2013). Glaser und Kammann (2013) verweisen auf die hohe Wasserhaltekapazität von bis zu 4 l/kg, insbesondere bei Biokohlen mit geringer Dichte, die eine Belüftung und Auflockerung nasser Biomassen begünstigt. Darüber hinaus scheint die Biokohle einen positiven Einfluss auf die Besiedlung mit Mikroorganismen (Bakterien, Actinomyceten, Pilze) (Hua et al., 2011; Jindo et al., 2012b; Theeba et al., 2012) zu besitzen sowie eine strukturelle Veränderung der Mikrobepopulation zu bewirken (Jindo et al., 2012a). Fischer und Glaser (2012) vermuten, dass die Veränderung der Mikrobepopulation wesentliche Aspekte der Kompostierung, wie den Abbau der organischen Substanz, die Mineralisierung, die Immobilisierung von Nährstoffen, den Austrag von Treibhausgasemissionen sowie Wechselwirkungen zwischen Schadstoffen und Pathogenen beeinflusst.

Smith et al. (2010) beschreiben eine auf sechs Tage begrenzte erhöhte Respiration mit steigender Biokohlezugabe in der Anfangsphase der Kompostierung, welche auf eine begrenzte Abbaubarkeit der C-Verbindungen der Biokohle durch Mikroorganismen zurückgeführt wird. Die Oxidation und Zersetzung der Biokohle setzt sich so lange fort, wie leicht abbaubare C-Verbindungen verfügbar sind (Kuzyakov et al., 2009). Die Abbaurate der Biokohle steigt mit zunehmender Temperatur (Nguyen et al., 2010). Dias et al. (2010) und Jindo et al. (2012b) beobachten bei der Kompostierung von Hühnermist mit Biokohle eine verbesserte Humifizierung und verringerte C-Verluste. Auch Yoshizawa et al. (2005) bestätigen, dass die Biokohle den Rotteverlauf durch eine erhöhte Mikrobenaktivität fördert. Fischer und Glaser (2012) verweisen auf Ergebnisse

von Erben (2011), die keine verbesserte Stabilität des Kompostes bzw. Biokohlekompostes durch eine zusätzliche Fermentation mit „effektiven Mikroorganismen“ (EM) wissenschaftlich belegen konnte. Fischer und Glaser (2012) betrachten eine zusätzliche Fermentation der Biokohle-Kompost-Gemische durch die Ureinwohner des Amazonasgebietes schon aufgrund des immensen Arbeitsaufwandes als sehr unwahrscheinlich.

Die abbaubaren Kohlenstoffverbindungen eines „bulking agents“ verbessern die N-Immobilisierung während der Kompostierung (Bernal et al., 2009). Die gasförmigen N-Verluste während der Kompostierung können durch Biokohle als „bulking agent“ um mehr als 50 % reduziert werden (Chen et al., 2010; Hua et al., 2009; Steiner et al., 2010; Steiner et al., 2011). Steiner et al. (2015) führen die Reduzierung der N-Verluste auf eine verbesserte Belüftung durch die Biokohle (Chen et al., 2010; Steiner et al., 2010), die  $\text{NH}_3$ -Adsorption (Taghizadeh-Toosi et al., 2011) und die Sorption organischer N-Verbindungen (Prost et al., 2013) an der Biokohle zurück. Neben der Reduzierung der  $\text{NH}_3$ -Emissionen konnten Steiner et al. (2010) auch signifikant geringere  $\text{H}_2\text{S}$ -Emissionen nachweisen. Bei der Kompostierung können unangenehme Gerüche auftreten, die hauptsächlich durch diese Verbindungen verursacht werden. Eine Reduktion der Geruchsemissionen durch die Biokohle, den auch Dias et al. (2010) bestätigen, kann einen positiven Effekt auf die gesellschaftliche Akzeptanz von Kompostierungsanlagen haben (Steiner et al., 2015).

Eine optimalere Kompostierung in Hinblick auf den Temperatur- und  $\text{CO}_2$ -Verlauf sowie auf sensorische Eigenschaften wie Geruch, Feuchte und Substratstruktur beobachten auch Wagner et al. (2014), wenn den Ausgangsstoffen zur Kompostierung Biokohle zugesetzt wurde.

Wang et al. (2013) stellen um 26 % reduzierte  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen bei der Kompostierung von Schweinemist nach Zugabe von Biokohle fest. Eine Reduktion der  $\text{CH}_4$ -Emissionen konnten während der Kompostierung Sonoki et al. (2013) und Vandecasteele et al. (2016) belegen. Vandecasteele et al. (2013) stellen auch während der Kompostlagerung verringerte  $\text{CH}_4$ -Emissionen fest.

Thies und Rillig (2009) vermuten, dass die Reaktivität der Oberfläche der Biokohlen während der Kompostierung zunimmt. Prost et al. (2013) können nachweisen, dass sich die Oberfläche der Biokohle während der Kompostierung, hinsichtlich einer verbesserten Kationenaustauschkapazität (KAK) und zunehmender Gehalte an gebundenen Nährstoffen (u. a. N, P, K) sowie des organischen und wasserlöslichen Kohlenstoffs, verändert. Wiedner et al. (2015) stellen ebenfalls eine beschleunigte Oxidierung der Oberfläche der Biokohle fest sowie die damit einhergehende Steigerung der KAK durch eine Vermehrung der funktionellen Gruppen.

In einigen Untersuchungen wurde eine reduzierte Mobilität der Schwermetalle Cu und Zn durch die Biokohlezugabe nachgewiesen (Chen et al., 2010; Hua et al., 2009). Die Kompostierung bewirkt eine Erhöhung der Cu(II)-Sorption an der Biokohle im Vergleich zu nicht kompostierter Biokohle (Borchard et al., 2012). Borchard et al. (2012) führen dies auf eine Zunahme der Oberflächenreaktivität der Biokohle zurück.

Verschiedene aktuelle Studien befürworten die gemeinsame Kompostierung von Biokohle mit frischem organischen Material und verweisen auf synergistische Effekte zwischen dem Kompost und der Biokohle (Fischer und Glaser, 2012; Glaser und Kammann, 2013; Kammann, 2014; Prost et al., 2013; Schulz et al., 2013, 2014; Tertyze et al., 2015; Tertyze et al., 2016b; Wagner et al., 2014). Jedoch steht die Entwicklung und Erforschung von kompostierten oder mikrobiell aktivierten Kohlen noch am Anfang (Fischer und Glaser, 2012). Neben einem Überblick zur bisher geleisteten Forschungsarbeit beschreiben Steiner et al. (2015), Kammann et al. (2016), Schatten et al. (2015) und Ullum (2017) ein weiteres Einsatzfeld für die Biokohle – als Torfersatz in Pflanzsubstraten.

#### **2.4.2 Nährstoffgehalte von Biokohlekomposten und deren Wirkung auf die Bodenfruchtbarkeit und das Pflanzenwachstum**

Nach Glaser et al. (2001) und Glaser et al. (2002) zeichnet sich die verbesserte Bodenfruchtbarkeit der Terra Preta do Indio durch höhere Gehalte an organischer Substanz, einer verbesserten Nährstoffspeicherung, vor allem von N, P, K und Ca, höhere pH-Werte sowie eine um bis zu 18 % höhere Wasserhaltekapazität im Vergleich zu den umliegenden ärmeren Böden ohne Kohle aus. Auch ist die Produktivität der Terra Preta Böden um ein Vielfaches höher als die der umliegenden ärmeren Böden.

Die hohe Bodenfruchtbarkeit der Terra Preta do Indio führen Kammann et al. (2016) nicht auf die alleinige Applikation von Biokohle bzw. Holzkohle zurück, sondern auf eine gemeinsame Applikation von Biokohle bzw. Holzkohle und organischen Abfällen (Neves et al., 2003) mit hohen P- und Ca-Gehalten aus beispielsweise Küchenabfällen und Exkrementen (Glaser und Birk, 2012). Steiner et al. (2007) beobachteten hinsichtlich der Nährstoffverfügbarkeit positive Effekte, wenn die Biokohle gemeinsam mit nährstoffreichem organischem Material (Hühnerkot und Kompost) appliziert wurde. Die einfache Vermischung von Biokohle mit Kompost und deren gemeinsame Applikation erzielte positive synergistische Effekte auf die Bodenfruchtbarkeit, die pflanzenverfügbare Wasserhaltekapazität und den Ertrag (Liu et al., 2012; Schulz und Glaser, 2012) und reduzierte darüber hinaus die Pb- und Cu-Mobilität und deren Aufnahme in das Weidelgras (Karami et al., 2011).

Für einen zügigen Aufbau eines Nährstoffspeichers und stabilen C-Pools im Boden mit

Hilfe der Biokohle empfehlen Kammann et al. (2016) und Fischer und Glaser (2012) die Biokohle mit nährstoffreichen organischen Bodenverbesserungsmitteln auszubringen. Bei deren gemeinsamer Kompostierung, insbesondere während der thermophilen Rotte, beschleunigt sich die Veränderung in Richtung der gewünschten Eigenschaften der Biokohle (Fischer und Glaser, 2012).

Die Biokohlesubstrate werden aus Mischungen mit verschiedensten Materialien (Grünschnitt, Küchenabfälle, Gärresten, Mist etc.) und Biokohlen (diverse Ausgangsstoffe, unterschiedliche Produktionsbedingungen) hergestellt. Die Mischungsverhältnisse der einzelnen Partner variieren ebenfalls (Krollig, 2013; Rademacher und Haubold-Rosar, 2013, 2014). Die Gemische werden in der Regel im weiteren Produktionsverlauf kompostiert werden. Einige Gemische erfahren zudem eine Fermentation mit oder auch ohne Zugabe von EM (Krollig, 2013; Rademacher und Haubold-Rosar, 2013, 2014). Allein aufgrund dieser großen Spanne an Ausgangsbedingungen ergibt sich eine Vielzahl von Variationsmöglichkeiten hinsichtlich der Eigenschaften und Wirkungen, die eine generelle Betrachtung von Biokohlesubstraten erschweren (Möller und Höper, 2014).

Die Eigenschaften und Qualitäten der fertigen Biokohlesubstrate sind abhängig von denen der Inputstoffe für die Kompostierung und der Biokohleerzeugung sowie von den verwendeten Produktionstechnologien (Glaser und Kammann, 2013). So stellten Kammann et al. (2010b) fest, dass Biokohle in einem qualitativ schlechteren Kompost stärker ertragsfördernd bei Radieschen und Erdbeeren wirkt als in einem qualitativ besseren Kompost. Die Varianten mit co-kompostierter Biokohle erzielten tendenziell bessere Ertragswerte als die Varianten mit nachträglicher Biokohleapplikation. Kammann et al. (2015) und Prost et al. (2013) kommen zu dem Schluss, dass die gemeinsame Kompostierung von Biokohle mit organischen Reststoffen, die  $C_{org}$ -Gehalte und die Nährstoffbeladung mit N, P und K signifikant erhöht. Positive synergistische Effekte bei der Verwendung von Biokohle mit anorganischen und organischen Düngemitteln auf das Pflanzenwachstum beschreiben Fischer und Glaser (2012). Der Standort und die angebaute Kultur haben ebenfalls einen Einfluss auf die Wirkung der Biokohle (Lorenz und Lal, 2014).

In dem Feldversuch von Liu et al. (2012) wurde die Porengrößenverteilung einer schwach lehmigen Braunerde durch die Applikation von Biokohle und Kompost positiv beeinflusst. Die Gabenhöhe von 32,5 t Kompost/ha plus 20 t Biokohle/ha verdoppelte die nutzbare Feldkapazität von 6 auf 12 Vol.-% im Vergleich zur Kontrolle. Auch Nadeem et al. (2017) beschreiben deutliche Synergieeffekte hinsichtlich eines geringeren Wasserstresses für Gurkenpflanzen sowie erhöhte Chlorophyllgehalte, wenn Kompost und Biokohle gemeinsam appliziert wurden.

Eine Mischung aus Biokohle und Kompost bewirkte in einem Gewächshausversuch unter simulierten tropischen Bedingungen deutliche Ertragszuwächse mit der Testpflanze Hafer im Vergleich zu reiner Biokohle (Schulz und Glaser, 2012). Lediglich die Erträge der alleinigen Kompostgabe waren höher als die der Biokohle-Kompost Mischung. In der zweiten Wachstumsphase fielen die Erträge aller Varianten deutlich geringer aus. In Hinblick auf die Bodenfruchtbarkeit zeigte sich, dass der Kompost einen signifikanten positiven Effekt auf den Nährstoffhaushalt und die Kationenaustauschkapazität hatte. Die Biokohle beeinflusste die Basensättigung und den pH-Wert positiv. Sie hatte aber keinen Einfluss auf den Austrag von Nitrat, Ammonium und Phosphor mit dem Sickerwasser (Schulz und Glaser, 2012).

In einem Gewächshausversuch wurden zum einen die Kompostmenge von 0 bis 200 t/ha und zum anderen der mitkompostierte Biokohleanteil (von 0 bis 50 %) stufenweise gesteigert. Die Erhöhung der applizierten Biokohlekompostgaben und die Erhöhung des Biokohleanteils darin wirkten ertragssteigernd auf die Testpflanze Hafer. Der höchste Ertrag wurde bei der Applikation von 92 t Biokohle/ha und 107 t Kompost/ha erzielt. Der Effekt war auf dem verwendeten Sandboden stärker ausgeprägt als auf Lehmboden (Schulz et al., 2013).

In zwei Feldversuchen testeten Mokry et al. (2013) und LTZ (2014) u. a. Biokohle, Kompost und Gärrest sowie die Mischungen Biokohle mit Kompost bzw. Gärrest im Vergleich zu einer ungedüngten und mineralisch gedüngten Variante. Es konnten keine Ertragseffekte festgestellt werden. Ein verbesserter C-Gehalt wurde insbesondere bei den Mischungen von Biokohle mit Kompost bzw. Gärrest beobachtet. Die Effekte der Biokohlegabe sind eher auf dem ertragsschwächeren Boden zu verzeichnen.

Schmidt et al. (2014) prüften über drei Jahre den Einsatz von Biokohle, Kompost und Biokohle-Kompost im Weinbau. Sie konnten keine relevanten Effekte auf die Weinreben und deren Gesundheit feststellen.

In einem Gewächshausversuch wurden dem Kompost geringe Biokohlekonzentrationen (0, 3, 5, 10 kg Biokohle/t Kompost) hinzugegeben (Schulz et al., 2014). Die Applikationsmenge des gemeinsam kompostierten Biokohlekomposts steigerte sich stufenweise von 10, 50, 100, 150, bis auf 250 t/ha. Schulz et al. (2014) stellten jedoch keine signifikante Ertragswirksamkeit der Biokohle auf das Pflanzenwachstum des Hafers und auf die untersuchten Bodenparameter fest. Die beobachteten positiven Effekte auf das Pflanzenwachstum, den Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffgehalt, den pH-Wert und die löslichen Pflanzennährstoffe sind auf die gesteigerte Kompostapplikation zurückzuführen. Auf dem Sandboden waren die Effekte tendenziell stärker als auf dem Lehmboden. Für Biokohleapplikationen unter 3 t Biokohle/ha sehen Schulz et al. (2014) kaum messbare Effekte auf das Pflanzenwachstum. Biokohlegaben im Bereich

des Höchstertrages (92 t Biokohle/ha) aus dem Versuch Schulz et al. (2013) mit Ertragszuwächsen um 300 % sind mit kalkulierten Kosten von 27.600 €/ha für die landwirtschaftliche Produktion nicht vertretbar (Schulz et al., 2014).

In einem Gewächshausversuch mit *Chenopodium quinoa* auf einem armen Lehmboden beobachteten Kammann et al. (2015) eine Wachstumshemmung bei Verwendung von unbehandelter Biokohle (61 %) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle. Eine Besonderheit des Versuches ist, dass die Biokohlestücke nach der gemeinsamen Kompostierung mit Pinzetten wieder aus dem Biokohlekompost separiert wurden. So können die Effekte von co-kompostierter Biokohle und Kompost separat betrachtet werden. Die co-kompostierte Biokohle erreichte einen Ertragszuwachs von 305 % im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle. Das Pflanzenwachstum (Ertrag, Blätter, Triebe, Wurzeln) war bei Anwesenheit der co-kompostierten Biokohle immer am besten (Kammann et al., 2016; Kammann et al., 2015). Je ungünstiger die weiteren Parameter waren (kein Kompost, geringe N-Düngung versus Kompost, höhere N-Düngung), umso stärker war dieser Effekt ausgeprägt (Kammann et al., 2015).

Glaser et al. (2015) testeten auf einer sandigen Braunerde in einem Feldversuch verschiedene Düngevarianten (Mineraldüngung, Gärrückstand, Kompost jeweils in Kombination mit 0, 1 und 40 t Biokohle/ha) mit der Testpflanze Mais. Zudem erfolgte die Prüfung von Gärrückständen mit und ohne Biokohle, die mit Mikroben inokuliert und fermentiert wurden. Die Biokohlezugaben zu den jeweiligen Düngern wirkten in der Regel ertragssteigernd. Lediglich die gemeinsame Fermentierung von 40 t Biokohle/ha mit Gärrückstand bewirkte einen geringeren Maisertrag. Bereits die Applikation von 1 t Biokohle/ha verbesserte die Wasserhaltekapazität. Ebenso wurde mit dieser geringen Menge bereits die Ausnutzung der Mineraldüngung effizienter. Ab einer Gabenhöhe von 10 t Biokohle/ha fanden Glaser et al. (2015) höhere Gehalte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen (N, P, K, Mg) sowie eine höhere KAK und leicht ansteigende pH-Werte. Die Düngung in Kombination mit Biokohle ergab im Mais eine verbesserte P-, K- und Zn-Aufnahme, vergleichbare N-, Mg-, Ca-, Mn-, Co-, Cr- und Pb-Gehalte sowie geringere Na-, Cu-, Ni- und Cd-Gehalte.

Auf ähnliche Ergebnisse von Fischer (unveröffentlicht) verweisen Glaser und Kammann (2013) und Kammann et al. (2016). In diesem Feldversuch wurde unbehandelte Biokohle, Grünschnittkompost, Biokohle-Kompost-Mischung und co-kompostierte Biokohle in zwei Gabenhöhen verglichen. Es gab keine signifikanten Ertragsunterschiede zur ungedüngten Kontrolle. Der Ertrag und die N-Ernährung der Maispflanzen waren bei der co-kompostierten Biokohle tendenziell besser. Die Maispflanzen, die mit der Biokohle-Kompost-Mischung gedüngt wurden, wiesen tendenziell geringere Erträge und eine schlechtere N-Ernährung auf. Die N-Ernährung der Maispflanzen, die mit

unbehandelter Biokohle gedüngt wurden, war ebenfalls tendenziell schlechter (Kammann et al., 2016). Entsprechend der Gabenhöhen stiegen die Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffgehalte nach der Applikation der Düngemittel (Biokohle und Kompostvarianten) in dem sandigen Lehmboden an und blieben auch über ein Jahr stabil (Glaser und Kammann, 2013).

In einem Pflanzversuch mit Weidelgras stellten Vandecasteele et al. (2016) fest, dass die P-Düngeäquivalente von Biokohlekompost (gemeinsam kompostiert) und Kompost plus Biokohle (Biokohle nach der Kompostierung zugesetzt) deutlich geringer ausfallen als die der mineralischen Referenz sowie der mit Gärrest gedüngten Varianten. Die Autoren führen dies auf die höheren Ca-Gehalte der Biokohle zurück.

Worzyk et al. (2014) prüften in mehrjährigen Parzellenversuchen den Einsatz von Biokohlesubstraten (BKS) und unbehandelter Biokohle auf kontaminierten Böden (MKW, PAK) in Hinblick auf die Bodenqualität und das Pflanzenwachstum. Nach zwei Versuchsjahren sind ein beschleunigter Abbau der MKW-Kontamination und eine Reduzierung der PAK-Mobilität zu verzeichnen. Worzyk et al. (2014) finden positive Ertragseffekte für die BKS aber nicht für die unbehandelte Biokohle. Zudem werden der C-Gehalt, die maximale Wasserhaltekapazität und das Nährstoffspeichungsvermögen positiv beeinflusst.

Vogel et al. (2016) beschreiben die Ergebnisse des Versuchs von Worzyk et al. (2014) nach vier Vegetationsperioden. Im gesamten Versuchszeitraum sind durch die Düngung mit den BKS und der unbehandelten Biokohle erhöhte C-Gehalte festzustellen. Die maximale Wasserhaltekapazität wird nur durch höhere BKS-Gaben erhöht, während die nutzbare Feldkapazität auch bei geringen BKS- und Biokohle-Gaben verbessert wird. Die N-, P- und K-Gesamtgehalte wurden in Abhängigkeit von der Gabenhöhe durch die BKS stärker angehoben als durch die unbehandelte Biokohle. Positive Ertragseffekte sind vor allem durch die Düngung mit den BKS sowie teilweise mit der unbehandelten Biokohle zu verzeichnen. Die MKW-Kontamination wurde bereits zu Versuchsbeginn verstärkt abgebaut. Für die PAK-Kontamination ist eine signifikante Reduzierung der Bioverfügbarkeit zu festzustellen (Vogel et al., 2016).

Ullum (2017) prüft Biokohlekompost (12,5 t/ha) auf landwirtschaftlichen Nutzflächen im Norden Ghanas. Neben der Steigerung des Maisertrages beobachtet sie eine Erhöhung der organischen Bodensubstanz, des pH-Wertes und der Kationenaustauschkapazität. Zudem führt Ullum (2017) Pflanzenwachstumstests mit Biokohlekompost an 11 verschiedenen Pflanzenspezies aus drei unterschiedlichen Klimazonen (tropisch, subtropisch und gemäßigt) im Vergleich zum herkömmlich verwendeten pflanzenspezifischen Substrat des Botanischen Gartens Berlin durch mit dem Ergebnis eines gleichwertigen oder verbesserten Pflanzenwachstums.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Bodenfruchtbarkeit ärmerer Böden und das dortige Pflanzenwachstum stärker mit positiven Effekten auf die Applikation von Biokohlekomposten bzw. (co-kompostierter) Biokohle reagieren (Glaser und Birk, 2012; Kammann et al., 2015; Schulz et al., 2013, 2014).

### **2.4.3 Einfluss der BKS auf die Nährstoffausträge mit dem Sickerwasser**

In einigen Studien wird die Wirkung von unbehandelter Biokohle auf das Sickerwasser bzw. die damit einhergehenden Nährstoffausträge beschrieben. Seltener finden sich Untersuchungen zur Wirkungsweise von Biokohlekomposten bzw. Biokohlen mit organischen Zusatzstoffen auf das Sickerwasser bzw. die damit einhergehenden Nährstoffausträge. Generell ist festzuhalten, dass die Effekte der Biokohle auf die Nährstoffausträge nicht einheitlich sind (Yao et al., 2012).

Die Applikation von unbehandelter Biokohle führt in verschiedenen Studien zu einer Verringerung der N-Auswaschung mit dem Sickerwasser (Clough et al., 2013; Yao et al., 2012; Zheng et al., 2013a). Die kumulativen Nährstoffausträge (N, K, Ca und Mg) mit dem Sickerwasser einer originalen Terra Preta (Amazonian Dark Earth = ADE) in einem Lysimeterversuch waren im Vergleich zu einem ungedüngten Ferrasol geringer. Nach der Düngung beider Böden überstiegen die Nährstoffausträge der gedüngten Terra Preta die des zusätzlich noch mit Holzkohle behandelten Ferrasol deutlich (Lehmann et al., 2003a).

Bradley et al. (2015) stellten auf einem mit Biokohle und Kuhmist gedüngten Sandboden verbesserte Sickerwasserqualitäten fest. Die N-Austräge ( $N_{\text{tot}}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) reduzierten sich mit steigendem Biokohleanteil.

Jones et al. (2012) stellten in einem dreijährigen Feldversuch keinen Effekt der Biokohle auf die Ammoniumsorption fest. Schulz und Glaser (2012) konnten bei der Applikation von Biokohle und Kompost keine Reduzierung der  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , und P-Austräge mit dem Sickerwasser beobachten. Sie stellten jedoch eine Hemmung der Nitrifikation fest. Zheng et al. (2012) grenzen ein, dass Biokohle die N-Auswaschung von neutralen bis sauren Böden mit hohem N-Gehalt reduzieren kann. Yao et al. (2012) beschreiben, dass eine Biokohle aus Brasilianischem Pfefferbaum die P-Austräge reduzierte, wohingegen eine Biokohle aus Erdnussschalen sogar zusätzliche P-Austräge verursachte. Regenwasser-Rückhaltebecken („bioretention systems“) werden mit Kompost behandelt, um die Bodenfruchtbarkeit, die Wasserinfiltration und die Bindung von Schadstoffen zu fördern. In einem Säulentest wurde Biokohle, co-kompostierte Biokohle, co-kompostierte Biokohle mit Kompost, Kompost, Sand und Mischungen mit Kompost und Sand auf ihr Nährstoffrückhaltevermögen geprüft (Iqbal et al., 2015). Eine Reduzierung von N, P und gelöster Kohlenstoff (DOC) im Sickerwasser durch die Biokohle konnte



nicht festgestellt werden. Iqbal et al. (2015) identifizieren diesbezüglich keinen Unterschied zwischen unbehandelter und co-kompostierter Biokohle.

Wagner et al. (2014) und Schatten et al. (2015) untersuchen das Nährstofffreisetzungsverhalten von Biokohlekomposten mittels statischer und dynamischer Elutionsversuche nach dem Schüttelverfahren und Säulenversuchen. Sie können belegen, dass Biokohle die Auswaschung von Nährstoffen, wie  $\text{NO}_3^-$ , P, Mg, Ca und S, reduziert, während die K-Auswaschung ansteigt.

In einem humus- und nährstoffarmen Kippboden verringerte die Applikation von Biokohlesubstrat die Sickerwasserbildung sowie die N- und K-Austräge ab dem zweiten Jahr. Auf einer Podsol-Braunerde aus Sand erzeugte das Biokohlesubstrat (90 t/ha) im Vergleich mit reiner Mineraldüngung ein Nährstoffüberangebot und verstärkte N- und K-Auswaschung (Rademacher und Haubold-Rosar, 2015a, b).

Als Ursachen für verringerte N-Austräge werden nach Clough et al. (2013) u. a. in einer verstärkten Ammonium-Sorption (Dempster et al., 2012; Ding et al., 2010; Yao et al., 2012), Nitrat-Adsorption (Dempster et al., 2012; Kameyama et al., 2012; Ventura et al., 2013; Yao et al., 2012), N-Immobilisierung (Ippolito et al., 2012b; Schomberg et al., 2012) und N-Einlagerung in den Mikroporen der Biokohle (Prost et al., 2013; Saleh et al., 2012) gesehen. Die Sorptionsfähigkeit der Biokohle wird durch ihre KAK beeinflusst: Die KAK nimmt in der Regel während der Alterung (Oxidation) der Biokohle zu (Cheng et al., 2006; Lehmann et al., 2003a; Liang et al., 2006; Singh et al., 2010b). Für die Alterung der Biokohle im Boden sind die herrschenden klimatischen Bedingungen entscheidend (Cheng et al., 2008b). Eine Wirkung der Biokohle auf die KAK ist insbesondere bei sandigen Böden wahrscheinlich. Wenn der Boden bereits einen hohen Gehalt an organischer Substanz oder Ton aufweist, kann eine Biokohlegabe unter Umständen keine weitere (signifikante) Verbesserung der KAK bewirken (Schulz und Glaser, 2012).

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Gefäßversuch I „BKS – Anwendungsmengen und Biokohleanteil“

Die Durchführung des Gefäßversuches „BKS – Anwendungsmengen und Biokohleanteil“ verfolgte das Ziel den Einsatz von BKS pflanzenbaulich, insbesondere im Hinblick auf die Düngewirkung und den Einfluss auf die Bodeneigenschaften, zu prüfen. Die BKS wurden mit differierenden Biokohleanteilen und unterschiedlich hohen Aufwandmengen in einem Ackerboden (Zinnitz) und einem Kipprohboden (Welzow) eingesetzt. Der Einfluss auf das Pflanzenwachstum wurde mit der Testkultur Knautgras (*Dactylis glomerata* L.) geprüft. Zum Versuchsabschluss erfolgte eine intensive Beprobung der Böden.

#### 3.1.1 Böden

Für den Gefäßversuch wurde der Oberboden (5 - 30 cm) eines frisch verkippten Rohbodens aus quartärem kalkführenden Kipplehmsand (Substrat-Bezeichnung: oj-(c)ls) nach Ad-Hoc-AG Boden (2005) aus dem Tagebau Welzow (W) eingesetzt. Als Referenz wurde der Oberboden (5 - 30 cm) einer für die Region typischen Braunerde aus glazifluvialtem schluffigem Sand (Substrat-Bezeichnung: gf-us) nach Ad-Hoc-AG Boden (2005) des Ackerstandortes Zinnitz (Z) verwendet. Der Kipprohboden ist anhand der Texturanalyse (Tabelle 5) als schwach lehmiger Sand (Sl2) mit minimalen Ton- und Schluffgehalten einzuordnen (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Der Ackerboden Zinnitz weist einen deutlich höheren Schluffanteil und einen geringeren Sandanteil auf und ist daher als ein mittel schluffiger Sand (Su3) einzustufen (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Beide Böden entsprechen der Bodenartengruppe 2 der VDLUFA zur Ableitung von Düngeempfehlungen (Von Wulffen et al., 2008).

Tabelle 5: Textur der im Gefäßversuch I eingesetzten Böden

Textur			Welzow	Zinnitz
Skelett	> 2 mm	[M.-% des Gesamtbodens]	6	<1
Ton	< 2 µm	[M.-% des Feinbodens]	5	4
Schluff	2 - 63 µm	[M.-% des Feinbodens]	10	27
Sand	63 - 2000 µm	[M.-% des Feinbodens]	85	69
Bodenart (Ad-Hoc-AG Boden, 2005)			Sl2	Su3

Die Kennwerte der eingesetzten Böden sind in Tabelle 6 aufgeführt. Der Boden Welzow weist ein geringes und der Boden Zinnitz ein mittleres Gesamtporenvolumen auf (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Die Böden unterscheiden sich deutlich in der Verteilung ihrer Porengrößen. Die Luftkapazität des Bodens Welzow ist als hoch einzuordnen, während der Boden Zinnitz nur eine geringe bis mittlere Luftkapazität aufweist. Die Feldkapazität (FK) und nutzbare Feldkapazität (nFK) des Bodens Welzow sind als sehr gering bzw. gering einzuschätzen. Der Boden Zinnitz weist hingegen eine mittlere Feldkapazität und eine hohe nutzbare Feldkapazität auf (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Die Totwassergehalte beider Böden sind auf einem vergleichbaren geringen Niveau. Der pH-Wert des Bodens Welzow ist mit 7,6 in die Klasse E (Von Wulffen et al., 2008) einzuordnen und ist bedingt durch die Verkippung eines kalkhaltigen Substrates. Der Boden Zinnitz liegt im unteren Bereich der pH-Klasse C (Von Wulffen et al., 2008). Zudem weist der Boden Zinnitz einen hohen  $C_{org}$ - (Körschens und Schulz, 1999; Von Wulffen et al., 2008) und  $N_t$ -Gehalt auf, deren Ursache in der ackerbaulichen Nutzung des Standortes liegt. Die geringen  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Werte des Bodens Welzow sind charakteristisch für junge Kipprohböden, da hier noch keine Humusanreicherung erfolgte (Haubold-Rosar und Gunschera, 2009). Beide Böden weisen ein enges C/N-Verhältnis auf. Jedoch ist aufgrund der Bodengenese und der höheren Ausgangswerte davon auszugehen, dass der Ackerboden Zinnitz über einen deutlich höheren Anteil stickstoffreicher und leichter mineralisierbarer Substanz verfügt.

Die potenzielle Kationenaustauschkapazität ( $KAK_{pot}$ ) des Bodens Welzow bzw. des Bodens Zinnitz sind als sehr gering bzw. gering einzustufen (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Der Boden Welzow ist basengesättigt. Der Boden Zinnitz ist als basenreich einzuordnen (Ad-Hoc-AG Boden, 2005).

Die P- und K-Gehalte (DL) des Bodens Welzow sind in die Gehaltsstufe A einzuordnen (Von Wulffen et al., 2008). Der Boden Zinnitz weist P- und K-Gehalte (DL) im Bereich der Gehaltsstufe B (Von Wulffen et al., 2008) auf.

Tabelle 6: Bodenphysikalische und -chemische Kennwerte der im Gefäßversuch I eingesetzten Böden

Kennwerte		Welzow	Zinnitz
Rt	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,73	1,58
GPV	[Vol.-%]	34,3	39,1
LK	[Vol.-%]	17,7	5,4
FK	[Vol.-%]	16,6	33,8
nFK	[Vol.-%]	11,4	28,9
Totwasser	[Vol.-%]	5,2	4,8
pH (CaCl <sub>2</sub> -Lsg.) <sup>1)</sup>		7,6 E	5,8 C
CaCO <sub>3</sub>	[M.-%]	0,9	< 0,1
C <sub>t</sub>	[M.-%]	0,28	1,08
C <sub>org</sub>	[M.-%]	0,17	1,08
N <sub>t</sub>	[M.-%]	0,013	0,094
C/N-Verhältnis		13	12
S <sub>t</sub>	[M.-%]	< 0,02	0,02
elektr. LF	[μS/cm]	79	88
KAK <sub>pot</sub>	[cmol <sub>c</sub> /kg]	2,0	4,9
Austauschbare Kationen			
Ca	[cmol <sub>c</sub> /kg]	1,8	2,4
Mg <sub>t</sub>	[cmol <sub>c</sub> /kg]	0,12	0,65
K	[cmol <sub>c</sub> /kg]	0,07	0,21
Na	[cmol <sub>c</sub> /kg]	0,01	< 0,01
Basensättigung		100	66
P <sub>DL</sub> <sup>1)</sup>	[mg/kg]	30 A	33 B
K <sub>DL</sub> <sup>1)</sup>	[mg/kg]	32 A	60 B
Gesamtgehalte (KW-Auszug)			
P	[mg/kg]	151	316
K	[mg/kg]	741	496
Ca	[mg/kg]	5100	1010
Mg	[mg/kg]	728	561

<sup>1)</sup> Großbuchstaben entsprechen den Gehaltsstufen nach Von Wulffen et al. (2008).

Vor ihrer Verwendung wurden die Schwermetallgehalte der Böden mittels Königswasseraufschluss und Analyse am ICP-OES geprüft und quantifiziert. Die in Tabelle 7 ausgewiesenen Schwermetallgehalte beider Böden liegen unterhalb der Hintergrundwerte (90. Perzentil) für Sandböden in Brandenburg (LABO, 2017) und deutlich unterhalb der Vorsorgewerte (BBodSchV, 1999).

Tabelle 7: Schwermetallgehalte der im Gefäßversuch I eingesetzten Böden im Vergleich zu den Hintergrund- und Vorsorgewerten

Schwermetallgehalte (KW-Auszug)	Welzow	Zinnitz	Hintergrundwerte <sup>1)</sup>	Vorsorgewerte <sup>2)</sup>
Cu [mg/kg]	3,1	5,2	4 (8)	20 (14)
Zn [mg/kg]	11	15	19 (32)	60 (42)
Ni [mg/kg]	3,3	1,8	2,7 (5,2)	15 (10,5)
Cr [mg/kg]	3,4	3,7	5 (10)	30 (21)
Pb [mg/kg]	4,2	14,2	14 (33)	40 (28)
Cd [mg/kg]	< 0,05	0,07	0,09 (0,25)	0,4 (0,28)

<sup>1)</sup> Hintergrundwerte für das Land Brandenburg, Angabe des 50. Perzentils (90. Perzentils), Ausgangssubstrat: Sand, Oberboden Acker (LABO, 2017).

<sup>2)</sup> Vorsorgewerte zum Schutz der Bodenfunktionen, Bodenart Sand, bei landwirtschaftlicher Nutzung: 70% der Vorsorgewerte, § 12 Abs. 4 BBodSchV (1999).

### 3.1.2 Biokohlesubstrate (BKS15 und BKS30)

Die Herstellung der Biokohlesubstrate (BKS) erfolgte durch die Fima Areal am Hengstbacherhof nach dem in Abbildung 1 dargestellten Schema. Es wurde ein BKS15 mit einem Biokohleanteil von 15 Vol.-% und ein BKS30 mit einem Biokohleanteil von 30 Vol.-% erzeugt. Als Inputstoffe für die BKS15 bzw. BKS30 wurde ein vorgerotteter Grünschnitt (< 40 mm), Gärrest aus einer Biogasanlage, die ausschließlich mit nachwachsenden Rohstoffen betrieben wird, Gesteinsmehl und Biokohle (Hackschnitzel aus Buche, Lärche, Fichte und Eiche, Schottdorf-Meiler, 700 °C) mit einem Anteil von 15 bzw. 30 Vol.-% verwendet. Die Inputstoffe (Grünschnitt und Biokohle) wurden mittels Radlader vermischt und in die Miete „Austauschfilter“ (ATF) mit einer Höhe von ca. 1,70 m eingeschichtet.

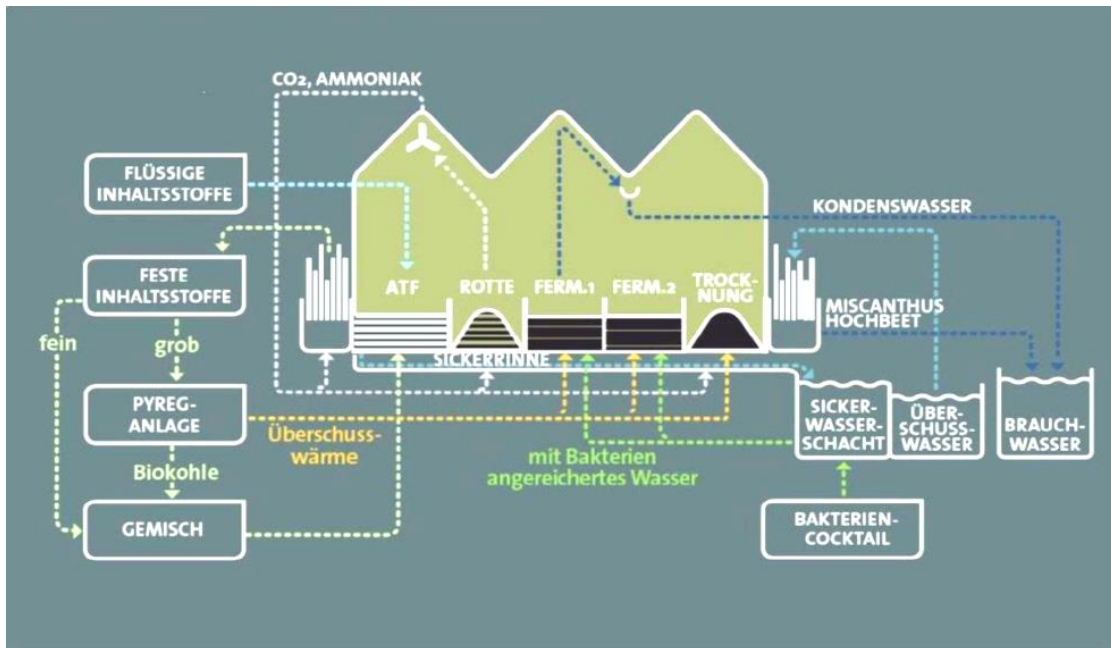


Abbildung 1: Schema für die BKS-Herstellung am Hengstbacherhof (Daum und Böttcher, 2011)

Die Einbringung des auf < 3 mm separierten Gärrestes in die Miete erfolgte über eine Tauchpumpe, Verteilerschläuche und Infiltrationslanzen. Nach circa einer Woche wurde die Miete von der ATF-Box in die Rotte-Box umgelagert. Das Substrat wurde locker aufgeschüttet und mit einem Vlies abgedeckt. Zur Unterstützung der Rotte erfolgte über die Belüftungsrinnen an der Mietensohle täglich eine zusätzlich Belüftung für eine Stunde. Nach Erreichen der Hygenisierung wurden die „Effektiven aktivierten Mikroorganismen“ (EMA) mittels Lanzen in die Miete eingebracht. Anschließend wurde das „angepfite“ Gemisch in eine der beiden Fermentations-Boxen umgelagert, dabei erfolgte eine lagenweise Verdichtung. Die Miete wurde mit Silagefolie abgedeckt und mit Sandsäcken beschwert, um einen Gasaustausch zu unterbinden. Nach circa zwei Wochen wurde das fertig fermentierte Substrat in die Trocknungs-Box umgelagert. Über Zuluft wurde das Substrat getrocknet und konnte nach weiteren zwei Wochen auf < 15 mm gesiebt werden.

Die Eigenschaften und Inhaltsstoffe der Biokohlesubstrate (Tabelle 8) liegen in dem Schwankungsbereich (Tabelle 2) von Komposten des Landes Brandenburg (LAGA, 1995). Die Schwefelgehalte beider BKS befinden sich innerhalb der üblichen Spanne von 0,1 - 0,5 % TS S<sub>t</sub> (Gutser und Ebertseder, 2002) für Bioabfallkomposte. Bedingt durch den höheren BK-Anteil ist der C<sub>org</sub>-Gehalt des BKS30 um etwa 8 M.-% höher als der des BKS15. Der Anteil an heißwasserlöslichem Kohlenstoff in dem BKS15 ist jedoch größer als in dem BKS30. Der Anteil des heißwasserlöslichen Stickstoffes ist hingegen in dem BKS30 größer. Das BKS15 weist zudem höhere Gesamtnährstoffgehalte (N<sub>t</sub>, P, K, Ca, Mg) und verfügbare Nährstoffgehalte auf als das BKS30.

Tabelle 8: Eigenschaften und Inhaltsstoffe der im Gefäßversuch I eingesetzten Biokohlesubstrate

Eigenschaften	BKS15	BKS30
pH (CaCl <sub>2</sub> -Lsg.)	7,9	7,6
Salzgehalt [mg/100g FM]	356	262
elektr. LF [μS/cm]	674	497
BWS [M.-%]	4,3	3,5
C <sub>org</sub> [M.-%]	29,6	38,0
N <sub>t</sub> [M.-%]	1,34	1,14
C/N-Verhältnis	22	34
C <sub>hwl</sub> [mg/kg]	8630	8080
N <sub>hwl</sub> [mg/kg]	750	1020
KAK <sub>pot</sub> [cmol <sub>c</sub> /kg]	46,7	50,0
Basensättigung [%]	100	100
S <sub>t</sub> [M.-%]	0,21	0,17
P <sub>DL</sub> [mg/kg]	1210	811
K <sub>DL</sub> [mg/kg]	8740	6130
Mg <sub>PV</sub> [mg/kg]	435	417
Gesamtgehalte (KW-Auszug)		
P [M.-%]	0,26	0,18
K [M.-%]	1,10	0,80
Ca [M.-%]	2,15	1,85
Mg [M.-%]	0,51	0,40

In Tabelle 9 sind die Gehalte an Spurennährstoffen und Schwermetallen der beiden BKS im Vergleich zu den Aufbringungsgrenzwerten der BioAbfV (2012) aufgeführt, die von beiden Substraten eingehalten werden. Die Schwermetallgehalte der BKS sind geringer als die Medianwerte (Tabelle 3) von Komposten des Landes Brandenburg (LAGA, 1995). Lediglich die Ni-Gehalte der BKS sind überschreiten den Medianwert von 11 mg/kg (LAGA, 1995).

Tabelle 9: Gehalte an Spurennährstoffen und Schwermetallen der im Gefäßversuch I eingesetzten Biokohlesubstrate

Gesamtgehalte (KW-Auszug)		Biokohlesubstrat		Grenzwerte BioAbfV <sup>1)</sup>
		BKS15	BKS30	
Mn	[mg/kg]	535	473	-
Cu	[mg/kg]	27	19	100 (70)
Zn	[mg/kg]	152	127	400 (300)
Ni	[mg/kg]	20	16	50 (35)
Cr	[mg/kg]	22	17	100 (70)
Pb	[mg/kg]	20	12	150 (100)
Cd	[mg/kg]	0,41	0,46	1,5 (1)

<sup>1)</sup> BioAbfV (2012): Aufbringungsgrenzwerte gemäß § 4 Abs. 3 (gemäß § 6 Abs. 1 Satz 2)

### 3.1.3 Versuchsaufbau und Bewirtschaftung

Der Gefäßversuch „BKS – Anwendungsmengen und Biokohleanteil“ wurde in erster Linie zur Abschätzung der Düngewirkung der BKS etabliert und von Mai 2011 bis Mai 2012 durchgeführt. Um die Düngeeffekte der unterschiedlich hohen Aufwandmengen sowie differierenden Biokohleanteile in den Biokohlesubstraten zu prüfen, erfolgte die Gegenüberstellung gestaffelter Mineraldüngergaben. Die beiden Versuchsböden Welzow und Zinnitz wurden mit 30 bis 240 t TS/ha BKS15 bzw. BKS30 behandelt. Parallel dazu wurden N- und P-Mineraldünger-Steigerungsreihen etabliert. Für jede Variante wurden vier Mitscherlich-Gefäße (Höhe 18 cm, Durchmesser 20 cm) angelegt. In Tabelle 10 sind die 21 Behandlungsvarianten dargestellt. Zudem wurden 4 x 2 sogenannte Dummy-Gefäße etabliert, in die Tensiometer zur Kontrolle der Bodenfeuchte eingebaut wurden. Daraus ergeben sich insgesamt 176 Gefäße.

Der Boden für die Gefäße je einer Variante wurde mit dem jeweiligen Dünger bzw. BKS versetzt und 5 min in einem Betonmischer homogenisiert. Anschließend wurde das Gemisch in die Mitscherlich-Gefäße gefüllt und alle 5 cm leicht angedrückt. Nach dem Einfüllen des Gemisches wurde jedes Mitscherlich-Gefäß 10-mal ruckartig auf einer stabilen Unterlage aufgesetzt, um eine gleichmäßige Lagerungsdichte zu erreichen und eine nachträgliche Sackung zu vermeiden. Die eingestellten mittleren Trockenraumgewichte der Gemische lagen für den Boden Zinnitz im Mittel bei 1,43 g/cm<sup>3</sup> (Spannweite von 1,14 bis 1,62 g/cm<sup>3</sup>) und für den Boden Welzow im Mittel bei 1,52 g/cm<sup>3</sup> (Spannweite von 1,10 bis 1,68 g/cm<sup>3</sup>). Die Mineraldüngervarianten beider Böden wiesen tendenziell höhere Trockenraumgewichte auf als die Varianten mit BKS.



Tabelle 10: Variantenübersicht des Gefäßversuches I

Variante	BKS		Düngung		
	BKS15 [t TS/ha]	BKS30	N <sup>2)</sup>	P <sup>3)</sup> [kg/ha]	K <sup>4)</sup>
30BKS15	30	-	-	-	-
60BKS15	60	-	-	-	-
90BKS15	90	-	-	-	-
120BKS15	120	-	-	-	-
240BKS15 <sup>1)</sup>	240	-	-	-	-
30BKS30	-	30	-	-	-
60BKS30	-	60	-	-	-
90BKS30	-	90	-	-	-
120BKS30	-	120	-	-	-
0/90/150	-	-	0	90	150
50/90/150	-	-	50	90	150
100/90/150	-	-	100	90	150
150/90/150 <sup>1)</sup>	-	-	150	90	150
200/90/150	-	-	200	90	150
400/90/150	-	-	400	90	150
100/180/150	-	-	100	180	150
200/360/150	-	-	200	360	150
150/0/150	-	-	150	0	150
150/60/150	-	-	150	60	150
150/180/150	-	-	150	180	150
150/270/150	-	-	150	270	150

<sup>1)</sup> zusätzliche Dummy-Gefäße mit Tensiometer zur Kontrolle der Bodenfeuchte;

<sup>2)</sup> Harnstoff (46 % N) <sup>3)</sup> P25 (10,9 % P) <sup>4)</sup> Korn-Kali (33,2 % K)

Nach dem Befüllen wurden die Gefäße im Freien auf Tischen in etwa 1,50 m Höhe über der Geländeoberfläche aufgestellt (Abbildung 2). Als Versuchspflanze diente Knautgras (*Dactylis glomerata* L.) mit einer Saatstärke von 40 kg/ha (0,126 g/Gefäß, Keimfähigkeit 99 %). Die Bestandsentwicklung war nicht ausreichend, so dass im Juli 2011 eine Nachsaat in Höhe von 40 kg/ha (0,126 g/Gefäß) erfolgte. Im Ansaatjahr 2011 konnte daher nur eine Ernte des Knautgrases Ende August durchgeführt werden. An dem Erntegut wurden die N-, P-, und K-Gehalte sowie an ausgewählten Varianten die Schwermetallgehalte bestimmt. Die Bewirtschaftungsmaßnahmen mit den konkreten Terminen sind in Tabelle 11 aufgelistet.

Tabelle 11: Bewirtschaftungsmaßnahmen Gefäßversuch I

Termin	Maßnahme
10./11.05.2011	Befüllen und Aufbau des Gefäßversuches im Garten des FIB
17./18.05.2011	Aussaaf Knautgras 40 kg/ha
12./13.07.2011	Nachsaaf Knautgras 40 kg/ha
30.08.2011	Ernte des Aufwuchses
02.11.2011	Transport in das Gewächshaus, Schönborn
19.03.2012	Aufstellung im Garten des FIB
18.04.2012	Düngung: 100 kg N/ha (Harnstoff, 46 % N)
21./22.05.2012	Ernte und Beprobung

Um Auswinterungsschäden durch Frost zu verhindern, wurden die Gefäße im November 2011 in ein frostfreies Gewächshaus des Gartenbaubetriebes Winde in Schönborn überführt. Hier wurden sie randomisiert in Rollcontainern auf drei Ebenen aufgestellt (Abbildung 2), um Stellplatzeffekte hinsichtlich Licht und Luftfeuchtigkeit zu vermeiden. Im März 2012 erfolgte der Rücktransport in den Garten des FIB, Finsterwalde.

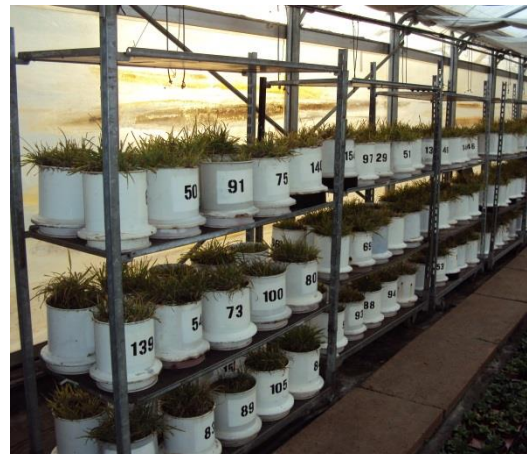


Abbildung 2: Links: Aufstellung des Gefäßversuchs I im Garten des FIB. Rechts: Aufstellung in Rollcontainern im Gewächshaus, Schönborn. Fotos: A. Rademacher

Zum Vegetationsbeginn im April 2012 erfolgte eine einheitliche Stickstoffdüngung in Form von Harnstoff in Höhe von 100 kg N/ha. Im Mai 2012 wurde der Knautgrasaufwuchs geerntet und der ersten Ernte entsprechend analysiert. Im Anschluss an die Ernte erfolgte die destruktive Bodenbeprobung der Gefäße am 21. und 22.05.2012. Die Gefäße wurden einheitlich bewässert, um den Bodenwassergehalt bei etwa 60 bis 80 % zu halten. Die Bewässerung erfolgte mit Trinkwasser. Zur Kontrolle dienten die in die Dummy-Gefäße eingebauten Tensiometer. Das Sickerwasser wurde unter jedem Gefäß in einer separaten Auffangschale aufgenommen und wieder in das Gefäß gegeben. Lediglich bei Starkniederschlägen, wenn die zugeordneten Auffangschalen nicht

ausreichen, traten Wasserverluste und damit im geringen Umfang Nährstoffverluste auf. Der Niederschlag wurde direkt neben der Versuchsanlage mit sechs Bulksammeln (Typ Hann. Münden nach Gärtner (1987)) erfasst. In Abbildung 3 ist der Witterungsverlauf für den Versuchszeitraum dargestellt. Für die Temperatur wurde auf die Werte der nächstgelegenen Station des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Doberlug-Kirchhain zurückgegriffen. Als Vergleichsgröße für Temperatur und Niederschlag ist das langjährige Mittel (1981 - 2010) der DWD-Station Cottbus angegeben. Von Oktober bis März waren die Gefäße bei einer Temperatur von mindestens 3 °C in einem frostfreien Gewächshaus aufgestellt. Bei einem Abfall der Temperatur auf unter 3 °C erfolgte eine automatische Beheizung.

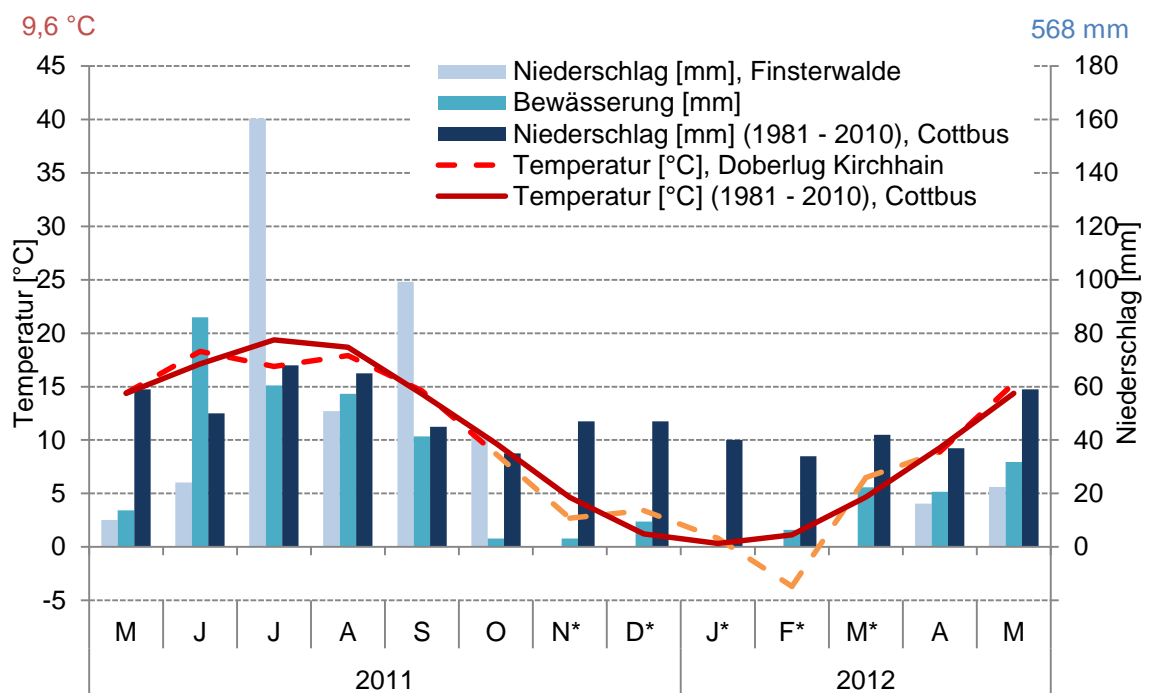


Abbildung 3: Witterungsverlauf für den Versuchszeitraum des Gefäßversuches I; Monate mit \*: Wintermonate in einem frostfreien Gewächshaus

### **3.1.4 Probenahme und -lagerung**

Die Biokohlesubstrate wurden unmittelbar nach der Anlieferung beprobt. Die  $N_{\min}$ -Untersuchung erfolgte direkt an der gekühlten, frischen Probe. Ein Aliquot wurde bei -18 °C aufbewahrt. Die Lagerung des übrigen Probenmaterials erfolgte bis zur weiteren Verwendung lufttrocken.

Die Ernte des Knautgrases erfolgte mit einer handelsüblichen Haushaltsschere. Das Gras wurde 5 cm über der Bodenoberfläche abgeschnitten. Der Ertrag wurde für jedes Gefäß ermittelt. Die Analytik auf die Pflanzeninhaltsstoffe erfolgte unmittelbar nach der Ernte. Im Anschluss an die Ernte im Mai 2012 erfolgte die Abschlussbeprobung des Gefäßversuches. Dazu wurden die Gefäße in einer Wanne um 180 ° gedreht, so dass der Bodenkörper ohne Beschädigung aus dem Mitscherlich-Gefäß herausglitt. Die oberen 5 cm des Bodenkörpers wurden entfernt. Zuvor wurde an den Wurzeln anhaftendes Bodenmaterial für die bodenchemische Beprobung abgeschüttelt. Anschließend erfolgte die Entnahme einer ungestörten Strukturprobe (100 cm<sup>3</sup> Stechzylinder) und einer gestörten Probe zur Untersuchung von bodenphysikalischen und -chemischen Parametern. Die bodenphysikalische und die  $N_{\min}$ -Untersuchung erfolgten direkt im Anschluss an die Probenahme. Das gestörte Probenmaterial wurde bis zur weiteren Verwendung lufttrocken gelagert.

## **3.2 Gefäßversuch II „Regionale Inputstoffe und Herstellungsmodifikationen“**

Aufbauend aus den Erfahrungen aus dem Gefäßversuch I wurden mit dem Gefäßversuch II die bodenverbessernden und pflanzenbaulichen Wirkungen von BKS, hergestellt aus regionalen Inputstoffen und mit variierten Produktionsparametern, geprüft. Insbesondere sollte die Substitution von Biokohle durch die heimische Braunkohle sowie die Eignung von Gewässerpflegematerial untersucht werden. Auch die Zusatzstoffe Maissilage und Gips aus der Rauchgasentschwefelung wurden hinsichtlich eines Einsatzes in der BKS-Herstellung betrachtet. Durch unterschiedliche Rezepturen und die Variation der Produktionsparameter entstanden 15 verschiedene BKS-Qualitäten (BKS Q1-15), die mit dem Anbau von Knautgras (*Dactylis glomerata* L.) von Mai 2012 bis Oktober 2013 auf ihre bodenverbessernden und pflanzenbaulichen Wirkung getestet wurden.

### **3.2.1 Böden**

Die eingesetzten Versuchsböden entsprechen denen aus dem Gefäßversuch I, siehe Kapitel 3.1.1.

### **3.2.2 Biokohlesubstrate (BKS Q1 bis Q15)**

#### **3.2.2.1 Regionale Inputstoffe**

Für den Gefäßversuch II wurden 15 verschiedene Biokohlesubstrate hergestellt. Dabei kamen folgende regionale Inputstoffe zum Einsatz: Laubkompost Rottegrad (RG) II, Gewässerpflegematerial (GPM) RG II und IV, Maissilage, Gärrest, Biokohle (Rindenabfälle, PYREG-Verfahren, 550 °C), Braunkohle (Wirbelschichtkohle), Gips und Gesteinsmehl.

Der Laubkompost, ein nicht gesiebter Winterfrischkompost mit dem Rottegrad II, wurde von der Firma Galle aus Großbahren, Landkreis Elbe-Elster, bezogen. Die Miete wurde am 03. und 04.01.2012 angelegt. Die Entnahme des Versuchsmaterials erfolgte am 15.02.2012.

Das Gewässerpflegematerial (GPM) fällt bei Grabenräumungen in großen Mengen an. Es wird zwischen einer krautigen und einer schlammigen Phase unterschieden. Während die krautige Phase auch hohe Schilffanteile enthält, weist die schlammige Phase überwiegend Gewässersedimente auf. Das für den Versuch verwendete, vorwiegend krautige GPM stammt aus zwei Gräben in der Nähe von Stechau, Landkreis Elbe-Elster (Abbildung 4 links). Die Räumung der Gräben erfolgte am 10.09.2011 durch den

Gewässerunterhaltungsverband Kremnitz-Neugraben, dabei wurde das GPM direkt neben den Gräben abgelegt (Abbildung 4 rechts).



Abbildung 4: Ursprungsort des GPM nahe Stechau. Links: Genaue Lage der Entnahmestelle. Quelle: [www.maps.google.de](http://www.maps.google.de); rechts: Blick auf den Vorflutgraben Fichtwald mit abgelegtem GPM. Foto: A. Rademacher

Das GPM für die BKS-Herstellung wurde am 12.12.2011 entnommen und mittels Spaten und Motorsense grob zerkleinert. Anschließend wurde das aufbereitete GPM lagenweise in die Thermokomposter der Marke „Superkomposter“, mit einem Fassungsvermögen von 300 l (61 x 61 x 83 cm) eingebaut. Jede der sieben Lagen bestand aus 40 l GPM (Schütthöhe 20 cm). Um die Kompostierung des Schilfs anzuregen, wurde in jede Lage 200 g des Kompostbeschleunigers „Basic Schnellkomposter“ eingemischt. Der Kompostbeschleuniger enthält neben 3 % N<sub>t</sub> auch je 1 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und K<sub>2</sub>O, so dass 0,28 g N<sub>t</sub> je kg GPM (FM) zusätzlich appliziert wurden. Dementsprechend sind die N<sub>t</sub>-Gehalte der GPM mit 1,9 und 2,0 M.-% (Tabelle 12) relativ hoch. Nach der dritten Lage und der siebten Lage wurde die Mischung durch leichtes Antreten verdichtet. Da der Temperaturverlauf in den Thermokompostern zu niedrig blieb, erfolgte die weitere Kompostierung ab dem 16.01.2012 für jeweils eine Woche bei 30 und 60 °C bis zum Rottegrad II in Stapelboxen im Trockenschrank. Nach weiteren vier Wochen im Trockenschrank bei 60 °C konnte am 27.02.2012 für das restliche GPM der Rottegrad IV festgestellt werden. Während der Kompostierung im Trockenschrank wurde ein ausreichender Wassergehalt durch regelmäßige Befeuchtung aufrechterhalten.

Die Maissilage wurde im September 2011 durch die Agrargenossenschaft Großräschen produziert. Die Materialentnahme für den Versuch erfolgte am 08.02.2012 aus einem Silo in der Nähe von Meuro, Landkreis Oberspreewald-Lausitz.

Der verwendete Gärrest stammt aus dem Biogaspark Lauchhammer-West (Betreiber: MB Ökoprojekt GmbH & Co. KG) im Landkreis Oberspreewald-Lausitz. Die Biogasanlage wird mit 30 % Rindergülle und 70 % Maissilage gefahren.

Die Biokohle wurde von der Pyreg GmbH durch die Pyrolyse von Rindenabfällen mit-

tels PYREG-Verfahren bei 550 °C hergestellt.

Bei der eingesetzten Braunkohle handelt es sich um eine Wirbelschichtkohle aus dem Kraftwerk Schwarze Pumpe, welches von der Vattenfall GmbH betrieben wird.

Als ein weiteres Koppelprodukt aus dem Braunkohlenbergbau wurde Gips, der bei der Rausgasentschwefelung entsteht, in einigen Varianten als Zusatzstoff getestet. Der hier verwendete Gips stammt aus dem Kraftwerk Jänschwalde der Vattenfall GmbH. Er besteht zu 98,5 % aus Calciumsulfat-Dihydrat und 0,5 % Calciumcarbonat. Die Körnung beträgt maximal 55 µm.

Tabelle 12 zeigt die Eigenschaften der Inputstoffe bevor sie für die BKS-Herstellung verwendet wurden.

Tabelle 12: Eigenschaften der Inputstoffe für die BKS-Herstellung zu Gefäßversuch II (Elementgehalte in der TM)

Parameter	Inputstoff							
	FK	GPM II	GPM IV	BK	BrK	Gärrest	Silage	Gips
TS [%]	48,5	39,0	41,0	38,6	80,6	10,5	38,5	74,2
pH (CaCl <sub>2</sub> )	7,1	6,1	6,4	8,4	4,1	7,7 <sup>1)</sup>	3,8 <sup>1)</sup>	7,3
C <sub>org</sub> [%]	21,1	26,5	28,6	70,9	61,4	41,1	47,9	0,2
N <sub>t</sub> [%]	1,55	1,87	1,95	0,57	0,70	4,50	1,22	0,07
C/N	14	14	15	125	88	9	39	3
NH <sub>4</sub> -N [mg/kg]	42	880	123	n.b.	n.b.	15000	1017	n.b.
NO <sub>3</sub> -N [mg/kg]	229	378	573	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
N <sub>min</sub> [mg/kg]	271	1258	695	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Gesamtgehalte (KW-Auszug)								
K [%]	1,02	n.b.	0,25	0,45	<0,005	4,16 <sup>2)</sup>	0,77 <sup>2)</sup>	0,013
P [%]	0,24	n.b.	0,49	0,14	<0,005	0,96 <sup>2)</sup>	0,20 <sup>2)</sup>	0,004
Zn [mg/kg]	216	n.b.	55	101	2,4	159 <sup>2)</sup>	26 <sup>2)</sup>	16
Cu [mg/kg]	61,4	n.b.	11,9	15,2	<1,5	45,2 <sup>2)</sup>	5,0 <sup>2)</sup>	<1,5
Cr [mg/kg]	15,7	n.b.	14,0	74,7	1,6	11,4 <sup>2)</sup>	1,4 <sup>2)</sup>	1,1
Ni [mg/kg]	7,1	n.b.	1,8	12,9	<0,5	6,6 <sup>2)</sup>	<1,0 <sup>2)</sup>	<0,5
Cd [mg/kg]	0,54	n.b.	0,35	<0,10	<0,10	<0,50 <sup>2)</sup>	<0,50 <sup>2)</sup>	<0,10
Pb [mg/kg]	55,1	n.b.	18,4	2,6	<3,0	3,7 <sup>2)</sup>	<1,0 <sup>2)</sup>	6,0

<sup>1)</sup> nach DIN EN 12176 (S5)

<sup>2)</sup> Mikrowellen-Druckaufschluss

Das Gesteinsmehl „Simalith“ aus magnesiumreichem Basalt wurde von der Rheinischen Provinzial-Basalt- und Lavawerke GmbH bezogen. Der Feinheitsgrad liegt zu 65 % unter 0,032 mm. Das restliche Material weist eine Körnung bis 0,09 mm (Toleranzbereich bis 0,2 mm) auf. Tabelle 13 zeigt die Deklarationsangaben für Nähr- und Mineralstoffe sowie die Schwermetallgehalte des Gesteinsmehls.

Tabelle 13: Deklarationsangaben für Nähr- und Mineralstoffe sowie die Schwermetallgehalte des „Simalith“ Basalt-Urgesteinsmehls

Nähr- und Mineralstoffe	„Simalith“ Gesteinsmehl [% TS]
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,9
K <sub>2</sub> O	0,6
MgO	13,7
MnO	0,2
CaO	9,8
Na <sub>2</sub> O	2,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,5
SiO <sub>2</sub>	43,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,5
Schwermetalle	[mg/kg]
Pb	10
Cd	0,1
Cr	226
Cu	73
Ni	330
Hg	< 0,01
Zn	101
B	5
Mo	7,9
Co	26,4



### 3.2.2.2 Herstellung der BKS Q1 bis 15

Die Mischung der Inputstoffe erfolgte in verschiedenen Kombinationen. Die Mischungsverhältnisse für jeweils 30 l mit den Mengenangaben und die jeweiligen Produktionsbedingungen sind für jedes BKS in Tabelle 14 dargestellt. Es wurden 11 BKS mit 15 bzw. 30 Vol.-% Biokohle sowie analog vier BKS (Q3, 4, 7, 9), bei denen die Biokohle durch Braunkohle substituiert wurde, hergestellt. Der vorgerottete Laubkompost wurde im Falle der BKS Q8, 9 und 13 durch GPM mit dem RG II und in den BKS Q14 und 15 durch GPM mit dem RG IV substituiert. Die BKS Q13, 14 und 15 erhielten zudem 10 Vol.-% Maissilage, wobei die Menge an GPM entsprechend reduziert wurde. Den BKS Q5, 6, 7 und 9 wurde der Zuschlagstoff Gips hinzugegeben. Alle Varianten erhielten 0,45 kg Gesteinsmehl (GM) und 9 l Gärrest. Insbesondere bei dem Laubkompost und dem GPM zeigten sich deutliche Schwankungen in den letztlich eingesetzten Trockenmassen. Dies ist auf die volumetrische Abmessung der Inputstoffe für die Anmischung der BKS sowie auf die Verwendung von nicht gesiebtem Material zurückzuführen. Nach der Anmischung erfolgte die eigentliche Produktion der BKS in der Versuchsboxenanlage der Firma Areal am Hengstbacherhof. Von der BKS Q1 und Q2 wurden jeweils zwei Chargen hergestellt, um eine ausreichende Menge für die Versuchsanstellung zu erzeugen. Nach der BKS-Herstellung wurden die Chargen miteinander vermengt.



Abbildung 5: Links: Versuchsboxenanlage der Firma Areal. Rechts: BKS nach durchlaufenem Produktionsprozess. Fotos: Fa. Areal

Tabelle 14: Rezepturen und Produktionsparameter zur Herstellung der BKS Q1 bis Q15 für den Gefäßversuch II

BKS <sup>1)</sup>	Produktion <sup>2)</sup>	Biokohle <sup>3)</sup>		Braunkohle <sup>3)</sup>		Kompost II <sup>4)</sup>		Inputstoffe (in l und kg FM)				Gärrest		GM <sup>5)</sup> [kg]			
		[l]	[kg]	[l]	[kg]	[l]	[kg]	GPM II <sup>4)</sup>		GPM IV <sup>4)</sup>		Silage			Gips	[l]	[kg]
								[l]	[kg]	[l]	[kg]	[l]	[kg]	[kg]			
Q1 a	H1 T1	4,5	2,35			22,5	16,0								9	8,96	0,45
Q1 b	H1 T1	4,5	2,28			22,5	17,5								9	8,21	0,45
Q2	H1 T1	9	4,99			21	15,6								9	7,66	0,45
Q3 a	H1 T1			4,5	3,04	22,5	13,8								9	9,06	0,45
Q3 b	H1 T1			4,5	2,92	22,5	14,6								9	9,11	0,45
Q4	H1 T1			9	5,63	21	12,6								9	8,36	0,45
Q5	H1 T1	4,5	2,42			22,5	13,8						0,5	9	8,45	0,45	
Q6	H1 T1	4,5	2,21			22,5	16,3						1,0	9	8,67	0,45	
Q7	H1 T1			4,5	2,92	22,5	11,9						0,5	9	8,52	0,45	
Q8	H1 T1	4,5	2,31					22,5	9,1					9	8,96	0,45	
Q9	H1 T1			4,5	2,74			22,5	11,1				0,5	9	8,92	0,45	
Q10	H1 T2	9	4,75			21	10,9							9	8,93	0,45	
Q11	H2 T1	9	4,83			21	10,7							9	8,29	0,45	
Q12	H2 T2	9	4,74			21	10,0							9	8,71	0,45	
Q13	H1 T1	4,5	2,23					19,5	8,1			3	1,51	9	8,39	0,45	
Q14	H1 T1	4,5	2,34							19,5	9,9	3	1,42	9	8,60	0,45	
Q15	H2 T1	4,5	2,40							19,5	9,5	3	1,62	9	9,27	0,45	

<sup>1)</sup> a, b: Herstellung von 2 Chargen

<sup>2)</sup> Fermentationsdauer: H1 = 2 Wochen; H2 = 4 Wochen; Fermentationstemperatur: T1 = 25 - 30 °C; T2 = 35 - 40 °C;

<sup>3)</sup> 4,5 l Biokohle bzw. Braunkohle entsprechen 15 Vol.-%. 9 l Biokohle bzw. Braunkohle entsprechen 30 Vol.-%;

<sup>4)</sup> II, IV: Rottegrad;

<sup>5)</sup> Gesteinsmehl

Die frisch angemischten Substrate wurden in Kunststoffboxen mit perforierten Zwischenböden und einer Ablaufvorrichtung für das Sickerwasser gefüllt. Damit wurde eine Belüftung der Substrate ermöglicht und zugleich stauende Nässe in den Boxen vermieden. Die Substrate wurden im sogenannten Austauschfilter (ATF) bis zu einer TS von 25 - 30 % vorgetrocknet ( $T < 23\text{ °C}$ ). Die Verweildauer im ATF variierte je nach Feuchte der Substrate und den jeweiligen Produktionsparametern zwischen 10 und 36 Tagen (Tabelle 15). Nach der ATF-Phase wurde das Material gut durchgemischt, gelockert und anschließend mit einem luftdurchlässigen Vlies abgedeckt. Während der Rottephase wurde stündlich für fünf Minuten Luft in die Versuchsboxen eingeblasen. Die Temperatur lag in der zweiwöchigen Rottephase bei etwa  $50\text{ °C}$ . Anschließend wurden die BKS mit 0,6 l „aktivierten Effektiven Mikroorganismen“ (EMa) behandelt.

Bei den EMa handelt es sich um einen Ansatz aus einem Liter Zuckerrohrmelasse, der in 30 l Leitungswasser aufgelöst und erhitzt wird. Nach dem Abkühlen auf unter  $30\text{ °C}$  wird dieser Lösung ein Liter „Effektive Mikroorganismen“ der Firma EMIKO Handelsgesellschaft mbH hinzugegeben. Die EMa-Lösung kann nach zwei Wochen Inkubationszeit verwendet werden. Die EMa wurden in die BKS eingemischt. Anschließend erfolgte eine Verdichtung der BKS in den Boxen. Die BKS wurden unter Luftabschluss, der durch eine Abdeckung mit Silofolie, Gummimatten und Gewichten, erreicht wurde, für zwei Wochen (H1) bzw. vier Wochen (H2) fermentiert. Die Fermentationstemperatur lag für die BKS mit dem Produktionsparameter T1 bei  $25 - 30\text{ °C}$  und für T2 bei  $35 - 40\text{ °C}$ .

An die Fermentation schloss sich eine ein- bis zweiwöchige Trocknungsphase bei ca.  $30\text{ °C}$  an, um die Feuchtegehalte der BKS zu senken. Ab dem Erreichen des Endzustandes wurden die BKS kühl gelagert, um weitere Prozesse in den Substraten zu verlangsamen bzw. zu inhibieren. Die exakte Produktionsdauer für jedes BKS ist in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Dauer der Produktionsphasen zur Herstellung der BKS Q1 bis 15 (verändert nach Krollig (2013))

BKS <sup>1)</sup>	Dauer der Produktionsphasen [d]				Summe
	ATF <sup>2)</sup>	Rotte	Fermentation	Trocknung	
Q1 a, b	36	13	16	5	70
Q2	27	16	14	8	65
Q3 a, b	27	16	14	8	65
Q4	36	13	16	5	70
Q5	27	16	14	13	70
Q6	27	16	14	13	70
Q7	36	13	16	5	70
Q8	27	16	14	8	65
Q9	27	16	14	8	65
Q10	10	14	14	10	48
Q11	10	14	28	7	59
Q12	10	14	28	7	59
Q13	27	16	14	13	70
Q14	36	13	16	5	70
Q15	10	14	28	7	59

<sup>1)</sup> a, b: Herstellung von 2 Chargen

<sup>2)</sup> Austauschfilter

Nach dem Abschluss der Produktion bei der Firma Areal wurden die BKS nach Finsterwalde transportiert. Die BKS wurden 15 Tage kühl gelagert bis sie in dem Gefäßversuch II eingesetzt wurden.

### 3.2.3 Versuchsaufbau und Bewirtschaftung

Der Gefäßversuch II wurde im Mai 2012 im Garten des FIB e.V., Finsterwalde aufgebaut. Nach der Überwinterung der Gefäße in einem frostfreien Gewächshaus der Gärtnerei Winde in Schönborn von Oktober 2012 bis April 2013 wurde der Versuch, aufgrund von Baumaßnahmen am FIB, in einer Kleingartenanlage etwa 1 km vom Institut entfernt aufgestellt (Abbildung 6). Die Aufstellung und Bewässerung erfolgte analog zu dem Gefäßversuch I (Kap. 3.1.3). Insgesamt wurden 18 Varianten mit jeweils vier Wiederholungen für beide Versuchsböden angelegt. Eine Variante wurde als Referenz mineralisch gedüngt. In den anderen 17 Varianten wurden die 15 hergestellten BKS (Kap. 3.2.2) appliziert. Zusätzlich wurden für beide Böden jeweils vier Dummy-Gefäße für die Varianten MIN und Q1 [15%BK] (n = 2), die mit Tensiometer (analog zum Gefäßversuch I) zur Kontrolle der Wasserversorgung ausgestattet waren, angelegt. Dar-

aus ergaben sich insgesamt 152 Gefäße ( $n = 4$ ). In Tabelle 16 sind die verschiedenen Varianten dargestellt.



Abbildung 6: Links: Aufstellung des Gefäßversuchs II in der Kleingartenanlage, Finsterwalde. Rechts: Aufstellung in dem Gewächshaus in Schönborn. Fotos: A. Rademacher

Anhand der Ergebnisse des Gefäßversuches I wurden 90 t/ha BKS als gutes pflanzenbauliches Maß ermittelt. Für die BKS-Varianten mit einer Aufwandmenge von 30 t/ha BKS erfolgte eine zusätzliche N-Düngung mit 60 kg/ha N in Form von Harnstoff, die aufgrund der ermittelten Mineraldüngeräquivalente im Gefäßversuch I festgelegt wurde.

Der Boden für die vier Gefäße einer Variante wurde mit dem jeweiligen BKS bzw. Dünger versetzt und 5 min in einem Betonmischer homogenisiert. Anschließend wurde das Gemisch in die Mitscherlich-Gefäße eingefüllt. Nach der vollständigen Befüllung des Mitscherlich-Gefäßes wurde es 10-mal ruckartig auf einer stabilen Unterlage aufgesetzt, um eine gleichmäßige Verdichtung zu erreichen. Die eingestellten mittleren Trockenraumgewichte der Gemische lagen für den Boden Zinnitz im Mittel bei  $1,24 \text{ g/cm}^3$  (Spannweite von  $1,04$  bis  $1,46 \text{ g/cm}^3$ ) und für den Boden Welzow im Mittel bei  $1,48 \text{ g/cm}^3$  (Spannweite von  $1,24$  bis  $1,81 \text{ g/cm}^3$ ).

Tabelle 16: Variantenübersicht des Gefäßversuches II

Variantenbezeichnung <sup>1)</sup>	BKS [t TS/ha]	mineralische Düngung <sup>2)</sup> [kg/ha]
MIN		150 N / 90 P / 150 K
Q1 [15%BK+N]	30	60 N
Q1 [15%BK]	90	-
Q2 [30%BK]	90	-
Q3 [15%BrK+N]	30	60 N
Q3 [15%BrK]	90	-
Q4 [30%BrK]	90	-
Q5 [15%BK+0,5kg Gips]	90	-
Q6 [15%BK+1kg Gips]	90	-
Q7 [15%BrK+0,5kg Gips]	90	-
Q8 [15%BK+GPMII]	90	-
Q9 [15%BrK+GPMII+0,5kg Gips]	90	-
Q10 [30%BK H1T2]	90	-
Q11 [30%BK H2T1]	90	-
Q12 [30%BK H2T2]	90	-
Q13 [15%BK+GPMII+Sil]	90	-
Q14 [15%BK+GPMIV+Sil]	90	-
Q15 [15%BK+GPMIV+Sil H2T1]	90	-

<sup>1)</sup> Es sind nur die Abweichungen von den Standardfermentationsparametern H1T1 angegeben: Fermentationsdauer: H1 = 2 Wochen; H2 = 4 Wochen; Fermentationstemperatur: T1 = 25 - 30 °C; T2 = 35 - 40 °C; <sup>2)</sup> Harnstoff (46 % N), P25 (10,9 % P), Korn-Kali (33,2 % K)

Im April 2013 erfolgte eine einheitlich Frühjahrsgabe von 100 kg N/ha (Harnstoff) zum Vegetationsbeginn. Im Ansaatjahr 2012 konnten zwei Schnitte im Juli und im September durchgeführt werden. Im Jahr 2013 erfolgte im Mai der erste Schnitt und der zweite Schnitt Anfang Oktober. Die Bewirtschaftungsmaßnahmen mit den konkreten Terminen sind in Tabelle 17 aufgelistet.

Tabelle 17: Bewirtschaftungsmaßnahmen Gefäßversuch II

Termin	Maßnahme
23.05.2012	Befüllung der Gefäße, Aufstellung im Garten des FIB
24.05.2012	Aussaat Knautgras 40 kg/ha
04.07.2012	Düngung mit 100 kg N/ha (Harnstoff, 46 % N)
19.07.2012	1. Ernte des Aufwuchses
01.10.2012	2. Ernte des Aufwuchses
17.10.2012	Transport in das Gewächshaus, Schönborn
11.04.2013	Aufstellung in der Gartenanlage, Finsterwalde
24.04.2013	Düngung mit 100 kg N/ha (Harnstoff, 46 % N)
29.05.2013	1. Ernte des Aufwuchses
15.10.2013	2. Ernte des Aufwuchses
16.10.2013	Bodenbeprobung

Der Pflanzenaufwuchs wurde zu jedem Erntetermin mittels Bonituren erfasst (betrachtete Parameter: BBCH, Pflanzenhöhe, ggf. Unkrautbesatz). Die Ertragsbildung wurde durch die Messung der Frisch- und Trockenmassen festgehalten. Auch wurden die Nähr- und Schadstoffgehalte im Pflanzenaufwuchs geprüft. Zur Abschlussbeprobung wurde aus jedem Gefäß mittig ein Stechzylinder aus der Tiefe 5 - 10 cm sowie eine Bodenprobe entnommen. In der Abbildung 7 ist der Witterungsverlauf für den Versuchszeitraum dargestellt. Die Niederschlagserfassung und Bewässerung erfolgten analog zu dem Gefäßversuch I (s. Kapitel 3.1.3). Von Oktober bis April war der Gefäßversuch in dem frostfreien Gewächshaus in Schönborn aufgestellt, so dass die Temperaturkurve hier nur bedingt gilt, da bei Temperaturen unter 3 °C eine automatische Beheizung erfolgte.

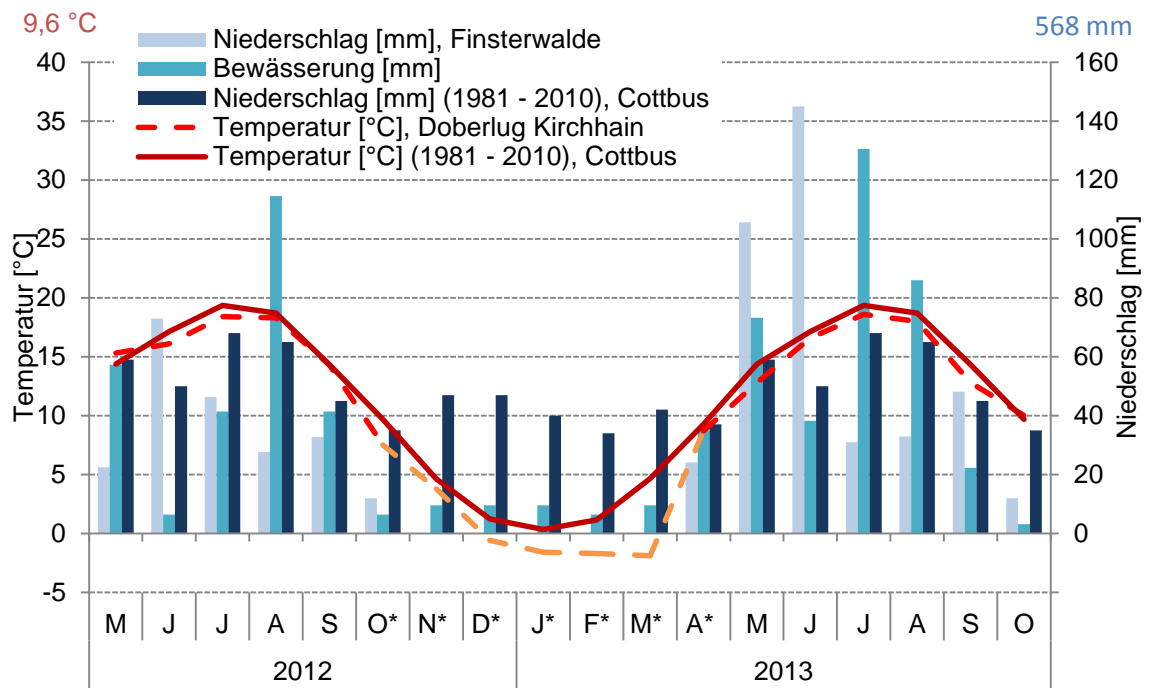


Abbildung 7: Witterungsverlauf für den Versuchszeitraum des Gefäßversuches II; Monate mit \*: Wintermonate im frostfreien Gewächshaus.



### 3.2.4 Probenahme und -lagerung

Die Beprobung der Inputstoffe erfolgte vor dem Transport zum Hengstbacherhof. Lediglich das Gesteinsmehl und die Biokohle wurden direkt vor der Einmischung beprobt. Die Biokohlesubstrate wurden unmittelbar nach der Anlieferung beprobt. Die  $N_{\min}$ -Untersuchung erfolgte direkt an der gekühlten, frischen Probe. Ein Aliquot wurde bei  $-18\text{ °C}$  aufbewahrt. Die Lagerung des übrigen Probenmaterials erfolgte bis zur weiteren Verwendung lufttrocken.

Die Ernte des Knautgrases erfolgte mit einer handelsüblichen Haushaltsschere. Das Gras wurde 5 cm über der Bodenoberfläche abgeschnitten. Für jedes Gefäß wurde der Frischmasseertrag ermittelt. Die Pflanzeninhaltsstoffe wurden an einer Mischprobe je Variante unmittelbar nach der Ernte bestimmt. Im Anschluss an die letzte Ernte im Oktober 2013 erfolgte die Abschlussbeprobung der Böden des Gefäßversuches. Dazu wurden die Gefäße in einer Wanne um  $180\text{ °}$  gedreht, so dass der Bodenkörper ohne Beschädigung aus dem Mitscherlich-Gefäß herausglitt. Die oberen 5 cm des Bodenkörpers wurden entfernt. Zuvor wurde an den Wurzeln anhaftendes Bodenmaterial für die bodenchemische Beprobung abgeschüttelt. Anschließend erfolgte die Entnahme einer ungestörten Strukturprobe ( $100\text{ cm}^3$  Stechzylinder), sowie einer gestörten Probe zur Untersuchung von bodenphysikalischen und -chemischen Parametern. Die bodenphysikalischen Untersuchungen wurden direkt im Anschluss an die Probenahme durchgeführt. Die  $N_{\min}$ -Untersuchung erfolgte sofort an der gekühlten, frischen Probe. Bis zur weiteren Verwendung wurde das gestörte Probenmaterial lufttrocken gelagert.

### 3.3 Bodensäulenversuch

Der Bodensäulenversuch wurde über drei Vegetationsperioden in den Jahren 2011-2013 mit den Böden Welzow und Zinnitz und jeweils drei Düngungsvarianten (MIN, 30 und 90 t/ha BKS15) ohne Wiederholung ( $n = 1$ ) durchgeführt. Es erfolgten detaillierte Untersuchungen zum Stofffreisetzungsverhalten und zur Stoffverlagerung mit dem Sickerwasserstrom. Zudem wurden für jede Säule die Erträge und Entzüge ermittelt, sowie eine umfangreiche Bodenanalytik zum Versuchsende durchgeführt. Der Säulenversuch stellt eine Schnittstelle zwischen den durchgeführten Gefäß- und Lysimeterversuchen dar.

#### 3.3.1 Beschreibung der Bodensäulenanlage

Die Bodensäulenanlage bestand aus zwei analog aufgebauten Wagen mit jeweils drei Säulen. Die drei Säulen für den Kipprohdboden Welzow bestehen aus einem unteren Segment (Höhe 60 cm, Innendurchmesser 28,50 cm) mit einem keramischen Saugboden und einem oberen Segment (Höhe 40 cm), die mit je drei Schnappverschlüssen verbunden waren. Die drei Säulen für den Ackerboden Zinnitz stammen aus einem vorhergehenden Versuch und weisen daher geringfügig andere Maße auf. Sie bestehen aus fünf verschraubbaren Segmenten (Höhe 20 cm, Innendurchmesser 29,06 cm). An das untere Segment ist der Saugboden aus Kunststoff befestigt (Höhe 6 cm). Beide Säulentypen hatten somit eine befüllbare Höhe von 100 cm.

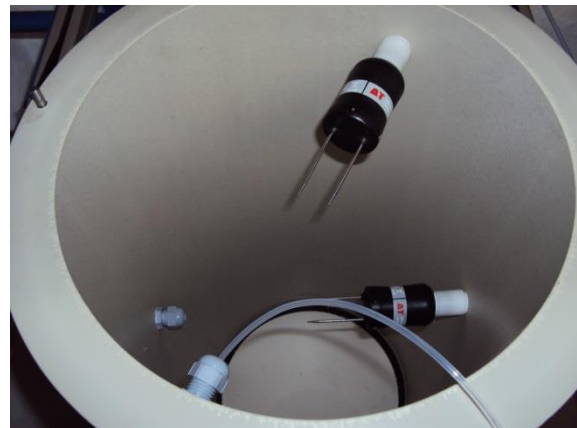


Abbildung 8: Links: Rollwagen mit Bodensäulen; Rechts: Unteres Säulensegment mit TDR-Sonden (Fotos: A. Rademacher)

In jeder Säule waren in 15, 45 und 65 cm Tiefe unterhalb der Säulenoberkante TDR-Feuchtesonden (SM 200, Delta-T Devices Ltd.) installiert (Abbildung 8). Aufgrund von mehreren Ausfällen wurden die TDR-Sonden der oberen beiden Tiefenstufen im August 2012 gegen SM 150 Sonden ausgetauscht.

Der Aufbau der Säulen ist in Abbildung 9 schematisch dargestellt. Die Bodenfeuchte wurde im 30 s Takt ermittelt und durch Datenlogger (GP1, Delta-T Devices Ltd.) aufgezeichnet. Das Auslesen der Daten erfolgte mit der Software Delta Link. Mit der Sonde in 15 cm Tiefe sollte auch eine automatische Tröpfchenbewässerung gesteuert werden. Für jeden Wagen stand ein Durchflussmesser für die Ermittlung der Bewässerungsmengen zur Verfügung. Aufgrund von Fehlfunktionen wurde im Laufe des Versuchs auf manuelle Bewässerung umgestellt. Die automatische Bewässerung erfolgte im Juli und August 2011, von Oktober 2011 bis Mai 2012 sowie im September und Oktober 2012. Die manuelle Bewässerung erfolgte nach Bedarf, in der Regel dreimal wöchentlich (Montag, Mittwoch und Freitag).

Für die Entnahme von Wasserproben waren in 15 cm Tiefe Mini-Keramik-Saugkerzen und in 45 cm Tiefe SiCa-Saugkerzen eingebaut. An der Basis wurde über eine Saugplatte aus Keramik (W) bzw. aus Kunststoff (Z) Sickerwasser entnommen. Eine Pumpe mit einem Druckkessel erzeugte den benötigten Unterdruck von 0,1 bar für alle Entnahmestellen. Die Sickerwassermengen wurden manuell erfasst. Die Kippzähler, die für die Erfassung der Basissickerwässer vorgesehen waren, wurden im Laufe des Versuches, aufgrund von Fehlmessungen, außer Betrieb genommen. Die Bodensäulenanlage stand in einem Raum mit einer durchschnittlichen Raumtemperatur von 21 °C. Die Pflanzen wurden täglich von 7.00 bis 19.00 Uhr mit jeweils einer Osram L36 W 77 Fluora (1400 Lumen) und einer Osram L36 W 865 Cool Daylight (3250 Lumen) beleuchtet. Die Leuchten waren direkt über den Bodensäulen mit einem Abstand zu der Boden- bzw. Pflanzenoberfläche von etwa 0,5 m angebracht. Die Beleuchtung wurde dem Sprosswachstum angepasst. Zusätzlich erfolgte eine diffuse Tageslichtbeleuchtung durch ein nach Osten ausgerichtetes Fenster.

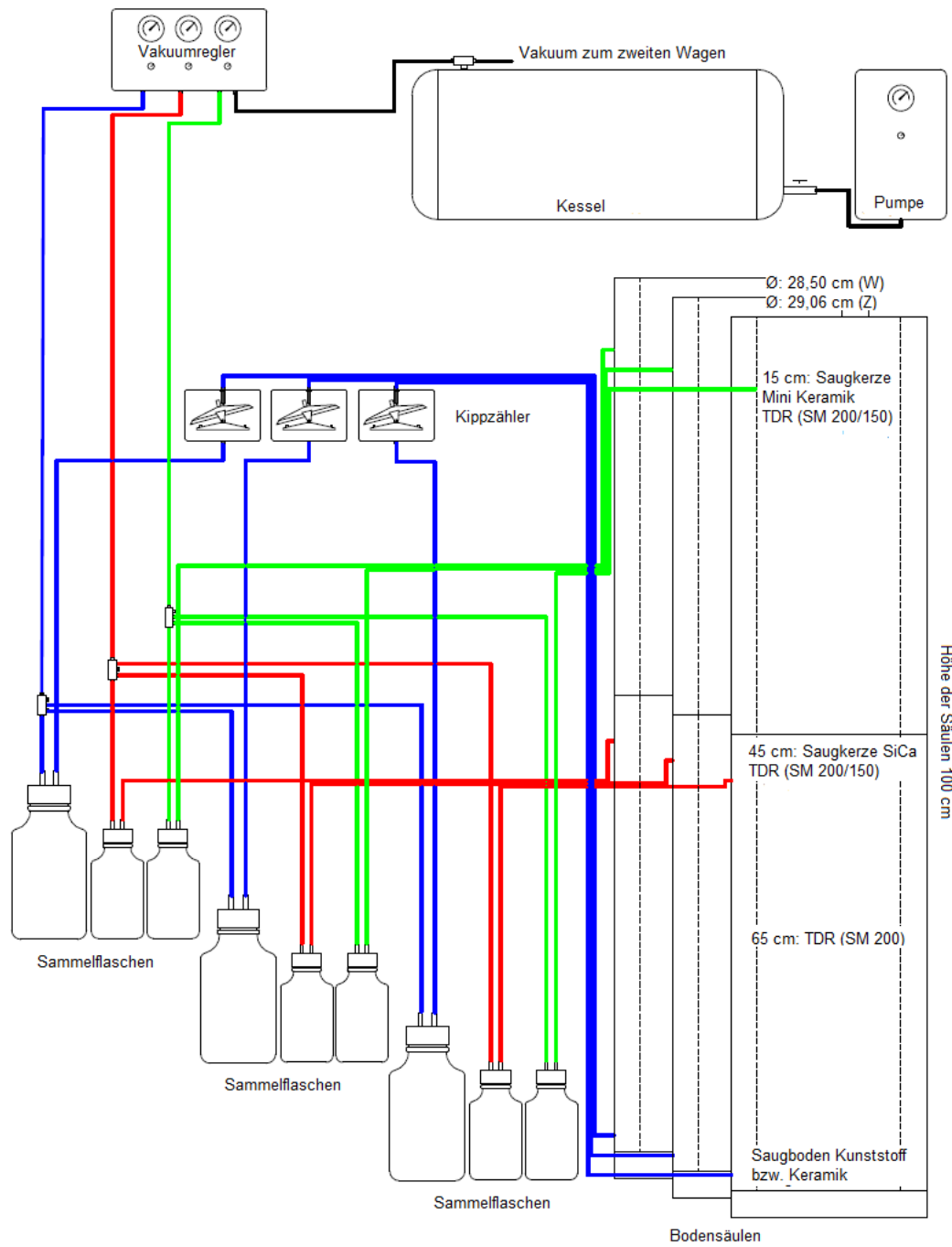


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Bodensäulenanlage, verändert nach UP GmbH (2011)

### 3.3.2 Böden

Die Böden für die Befüllung der Bodensäulen stammen, wie auch bei den Gefäßversuchen (s. K. 3.1.1), von den LaTerra-Feldversuchsflächen in Welzow und Zinnitz. Die Materialentnahme des Kipprohbodens Welzow erfolgte mit einem Teleskoplader direkt neben der Profilgrube. In Tabelle 18 sind die Kennwerte der an die Materialentnahmestelle angrenzenden Profilgrube dargestellt. Die Lagerungsdichte betrug in der obersten Schicht (0-30 cm) 1,73 g/cm<sup>3</sup> und im Unterboden im Mittel 1,97 g/cm<sup>3</sup>.

Tabelle 18: Bodenart und Kennwerte der Bodenschichten des Profils Welzow

Tiefe [cm]	Bodenart <sup>1)</sup>	Kennwerte							
		Rt [g/cm <sup>3</sup> ]	pH (CaCl <sub>2</sub> )	C <sub>org</sub> [M.-%]	N <sub>t</sub> [M.-%]	C/N	P <sub>DL</sub> [mg/kg]	K <sub>DL</sub> [mg/kg]	T-Wert [cmol <sub>c</sub> /kg]
0 - 30	Sl2	1,73	7,4	0,24	0,011	21	30	32	4,2
30 - 55	Sl2	1,95	7,5	0,30	0,012	25	20	30	5,1
55 - 80	Sl2	2,04	7,5	0,28	0,015	19	19	29	4,9
80 - 100	Sl2	1,93	7,5	0,27	0,011	25	n. b.	n. b.	5,0

<sup>1)</sup> nach Ad-Hoc-AG Boden (2005)

In Zinnitz, dem gewachsenen Ackerboden, erfolgte die Materialentnahme direkt an der Profilwand (0 - 100 cm) in 10 cm Schichten. In Tabelle 19 sind die Kennwerte des Bodenprofils aufgeführt. Die Lagerungsdichte des Ackerbodens war deutlich niedriger als die des Kipprohbodens. Dies gilt insbesondere für die Krume (1,56 g/cm<sup>3</sup>) und den Unterboden (Mittel: 1,65 g/cm<sup>3</sup>). Im Bereich unterhalb der Krume lag eine tendenzielle Pflugsohlenverdichtung (1,76 g/cm<sup>3</sup>) vor.

Tabelle 19: Bodenart und Kennwerte der Bodenschichten des Profils Zinnitz

Tiefe [cm]	Bodenart <sup>1)</sup>	Kennwerte							
		Rt [g/cm <sup>3</sup> ]	pH (CaCl <sub>2</sub> )	C <sub>org</sub> [M.-%]	N <sub>t</sub> [M.-%]	C/N	P <sub>DL</sub> [mg/kg]	K <sub>DL</sub> [mg/kg]	T-Wert [cmol <sub>c</sub> /kg]
0 - 30	Su3	1,56	5,7	0,97	0,080	12	40	56	5,7
30 - 50	Su3	1,76	5,4	0,32	0,029	11	12	7	3,6
50 - 70	Su3	1,62	5,2	0,14	0,016	9	5	3	1,8
70 - 100	mSgs	1,68	5,5	0,03	0,003	12	n. b.	n. b.	0,8

<sup>1)</sup> nach Ad-Hoc-AG Boden (2005)

### 3.3.3 Biokohlesubstrat

In dem Bodensäulenversuch wurde das gleiche BKS15 wie im Gefäßversuch I verwendet (s. K. 3.1.2).

### 3.3.4 Versuchsaufbau und Bewirtschaftung

Das Bodenmaterial der beiden Standorte Welzow und Zinnitz wurde vor dem Einbau auf 10 mm gesiebt. Im März wurden die Bodensäulen zunächst bis zur Krümmenunterkante von 25 cm (gemessen von der Säulenoberkante) befüllt. Das Ziel war es, den Boden entsprechend der natürlichen Lagerungsdichte im Feld einzubauen (Tabelle 20).

Tabelle 20: Bei der Befüllung der Bodensäulen angestrebte Lagerungsdichten

Kipprohboden Welzow		Braunerde Zinnitz	
Tiefe [cm]	Angestrebte Lagerungsdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Tiefe [cm]	Angestrebte Lagerungsdichte [g/cm <sup>3</sup> ]
0 - 25	1,5	0 - 30	1,5
25 - 55	1,8	30 - 50	1,7
55 - 75	1,8	50 - 70	1,6
75 - 100	1,8	70 - 100	1,6

Der Einbau des Bodenmaterials erfolgte lagenweise in 10 cm (Zinnitz) bzw. 25 cm (Welzow) Schichten unter Berücksichtigung der Wassergehalte. Die berechnete Masse des jeweiligen Bodens wurde in die Säule geschüttet, in der Fläche verteilt und dann gleichmäßig mit leichtem Druck mit einer Metallplatte auf eine Stärke von 10 cm verdichtet. Nach dem Verdichten wurde die Oberfläche aufgeraut, um eventuelle Wasserstauereffekte zu vermeiden. Dann erst erfolgte das Aufbringen der nächsten Lage. Die TDR-Sonden und Saugkerzen wurden während des Befüllens mit dem Einbau der entsprechenden Bodenlage in den vorgesehenen Tiefenstufen (s. K. 3.3.1) installiert. Es wurden drei Düngevarianten in einfacher Wiederholung angelegt (Abbildung 10):

- Mineraldüngung (MIN),
- 30 t TS/ha BKS15 (30 BKS15) mit einer mineralischen N-Ergänzungsdüngung,
- 90 t TS/ha BKS15 (90 BKS15).

Im Mai 2011 erfolgte die Einmischung der Düngergaben (BKS sowie die P- und K-Dünger der MIN-Varianten) im Bereich 0 - 20 cm und der Einbau der Oberböden entsprechend der Varianten. Die mineralische N-Düngung für die MIN- und 30 BKS15-Varianten wurden oberflächlich ausgebracht. Alle weiteren mineralischen N-Düngergaben erfolgten einheitlich für alle Varianten zu den in Tabelle 21 angegebenen Terminen. Die P- und K-Düngung im März 2013 wurde im Bereich 0 - 10 cm eingearbeitet.



Abbildung 10: Überblick über die Bodensäulenanlage (links 3 Säulen Welzow, rechts 3 Säulen Zinnitz), jeweils von links nach rechts die Varianten MIN, 30 BKS15, 90 BKS15. Foto: A. Rademacher

Die Bodensäulen waren von Mai 2011 bis zum August 2012 mit Knäulgras (*Dactylis glomerata* L.) bewachsen, welches mit zwei Schröpfschnitten und vier auswertbaren Schnitten geerntet wurde. Nach der letzten Knäulgrasernte im Jahr 2012 erfolgte eine wendende Bodenbearbeitung der Krume in den Säulen. In diesem Zuge wurden die defekten TDR-Sonden (SM 200) der oberen beiden Tiefenstufen gegen die TDR-Sonden des Typs SM 150 ausgetauscht (s. K. 3.3.1).

Tabelle 21: Düngung des Bodensäulenversuchs

Kultur	Termin	Varianten <sup>1)</sup>		
		MIN	30BKS15	90BKS15
Knautgras	19.05.2011	150 N <sup>2)</sup> / 90 P <sup>3)</sup> / 150 K <sup>4)</sup>	30 t TS/ha 100 N <sup>2)</sup>	90 t TS/ha
	18.04.2012	100 N <sup>2)</sup>		
Senf	16.08.2012	50 N <sup>2)</sup>		
Sommergerste	13.03.2013	100 N <sup>5)</sup> / 60 P <sup>6)</sup> / 130 K <sup>4)</sup>		
	29.04.2013	50 N <sup>5)</sup>		
Knautgras	01.08.2013	50 N <sup>5)</sup>		

<sup>1)</sup> Mineraldüngerangabe in kg/ha; <sup>2)</sup> Harnstoff (46 % N); <sup>3)</sup> P25 (10,9 % P); <sup>4)</sup> Korn-Kali (33,2 % K); <sup>5)</sup> Kalkammonsalpeter (27 % N); <sup>6)</sup> Triple-Superphosphat ( 20 % P)

Die weitere Fruchtfolge war, wie Tabelle 22 zu entnehmen, Senf (*Sinapis alba* L.) und Sommergerste (*Hordeum distichum* L.) mit jeweils einer Ernte sowie nochmals Knautgras mit zwei Ernten. Der Pflanzenaufwuchs wurde auf die C-, N-, P- und K-Gehalte (s. K. 3.5.2) untersucht. Der Abschlussbeprobung der Böden im Januar 2014 schloss sich eine umfassende physikalische und chemische Bodenanalytik an (s. K. 3.5.1).



Tabelle 22: Fruchtfolge des Bodensäulenversuchs

Kultur	Saattermin	Saatstärke	Erntetermin
Knaulgras	19.05.2011	40 kg/ha	04.07.2011 Schröpfschnitt 02.08.2011 Schröpfschnitt 10.11.2011 08.02.2012 18.04.2012
	24.05.2012	20 kg/ha (Nachsaat)	09.08.2012
Senf	15.08.2012	40 kg/ha	10.12.2012
	12.09.2012	40 kg/ha (Nachsaat)	
Sommergerste	14.03.2013	400 Körner/m <sup>2</sup>	10.06.2013
Knaulgras	11.06.2013	40 kg/ha	17.10.2013 06.01.2014
	03.07.2013	40 kg/ha (Nachsaat <sup>1)</sup> )	

<sup>1)</sup> nur die Variante Welzow 90 BKS15

Abbildung 11 zeigt den Verlauf der monatlichen Bewässerungsgaben pro Säule. In den Zeiträumen Juli und August 2011, Oktober 2011 bis Mai 2012 sowie im September und Oktober 2012 traten teilweise extreme Schwankungen der Bewässerungsgaben auf. In diesen Phasen war ein automatisches Bewässerungssystem eingeschaltet, welches mehrfach zu Fehlfunktionen der Anlage einhergehend mit übermäßigen Bewässerungsgaben führte. In den anderen Zeitabschnitten erfolgte die Bewässerung manuell (s. K. 3.3.1).

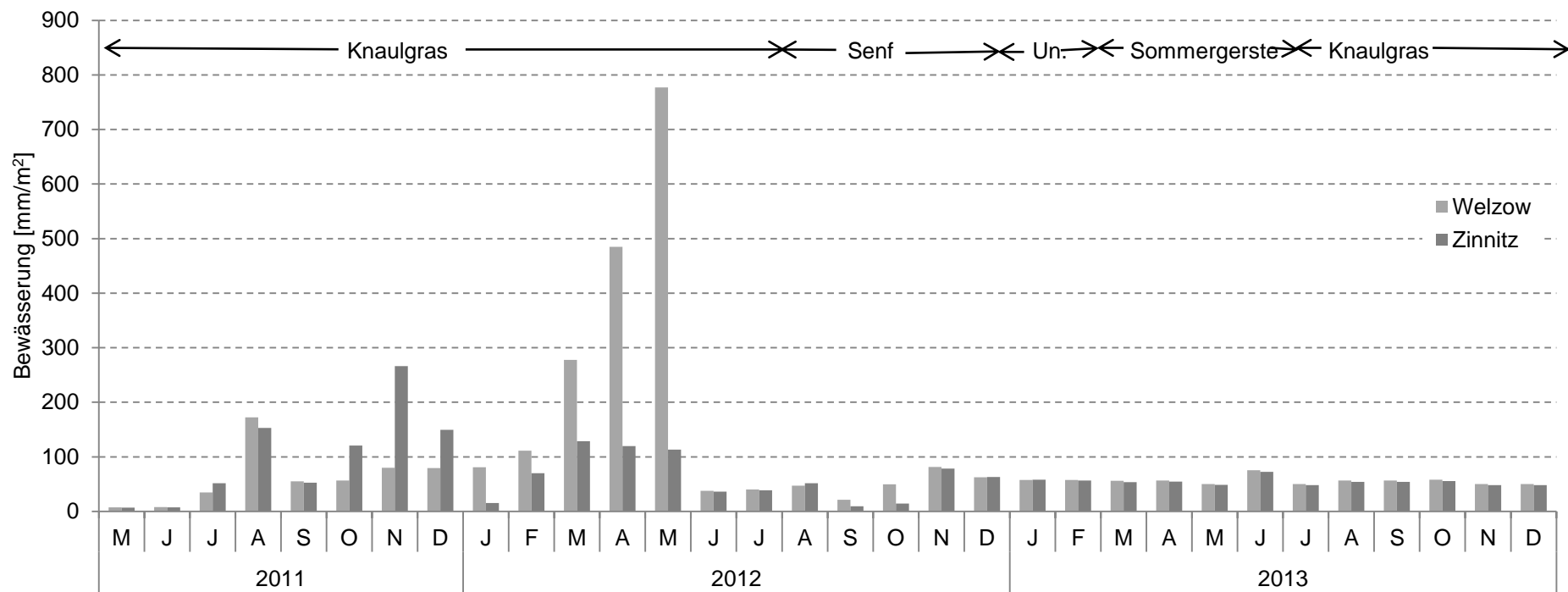


Abbildung 11: Monatliche Bewässerungsgaben je Säule im Bodensäulenversuch

### 3.3.5 Probenahme und -lagerung

Die Ernte des Pflanzenaufwuchses erfolgte mit einer handelsüblichen Haushaltsschere. Die Schnitthöhe betrug etwa 5 cm über der Bodenoberfläche. Der Ertrag und die Inhaltstoffe wurden für jede Säule ermittelt. Die Analytik erfolgte unmittelbar nach der Ernte. Bei dem Ausbau der Bodensäulen wurden schichtenweise sowohl Mischproben als auch ungestörte Strukturproben (100 cm<sup>3</sup> Stechzylinder) für bodenchemische und -physikalische Untersuchungen entnommen. Der N<sub>min</sub>-Gehalt der Bodenproben wurde sofort bestimmt. Für die weiteren Analysen wurden die Proben lufttrocken aufbewahrt. Die bodenphysikalischen Untersuchungen wurden direkt im Anschluss an die Probenahme durchgeführt.

Das Sickerwasser wurde für jede Variante und Tiefenstufe in Sammelflaschen aufgefangen und dreimal wöchentlich (Montag, Mittwoch und Freitag) erfasst. Nach der Mengenbestimmung wurde das Wasser bei -18 °C aufbewahrt und analysiert (s. K. 3.5.3).

### **3.4 Lysimeterversuch**

Der Lysimeterversuch wurde über drei Vegetationsperioden (2011 - 2013) mit dem Kipprohboden Welzow und einem Braunerde-Podsol als natürlichem Ackerboden durchgeführt. Es wurden jeweils drei Düngungsvarianten (MIN, 3x30 und 90 t/ha BKS15, n = 2) angelegt. Dieser Versuch soll die Effekte von Biokohlesubstrat-Gaben auf die Menge und Qualität der Sickerwässer ertragsschwacher Böden in Nordostdeutschland in einer höheren Skalenebene als der Bodensäulenversuch aufzeigen.

#### **3.4.1 Beschreibung der Lysimeteranlagen**

Für den Versuch konnte auf zwei bestehende Lysimeteranlagen der Versuchsstation des Forschungsinstituts für Bergbaufolgelandschaften (FIB) in Lauchhammer, OT Grünwalde zurückgegriffen werden.

Die Lysimeteranlage A2 wurde 1975 in Betrieb genommen und erfuhr im Jahr 1994 eine Erweiterung und Modernisierung (Abbildung 12 oben). Das Dach des Kellergangs sowie die Oberkanten der Lysimeter liegen etwa 0,8 m höher als das umliegende Areal. Ein mit Gras bewachsener Erdwall mit einem Gefälle von ca. 30 ° umgibt die Anlage. Die Lysimeter sind grundwasserfrei und nicht wägbare. Die Sickerwässer werden ohne Anlegen von Unterdruck durch den Abfluss des freien Wassers aus einer Dränschicht über der Bodenplatte der Lysimeter gewonnen und in einem abgedeckten Eimer im Kellergang aufgefangen. In dieser Anlage werden sechs epoxidharzbeschichtete Stahl-Lysimeter mit einer quadratischen Grundfläche von 1 m<sup>2</sup> und einer Mantelhöhe von 3,1 m genutzt, die sich an der nördlichen Seite des überdachten Kellergangs befinden. Im Jahr 1975 war in diese Lysimeter schicht- bzw. horizontweise ein Braunerde-Podsol aus Sand (Ad-Hoc-AG Boden, 2005) bzw. Sand-Rosterde (VEB GFE, 1979) eingefüllt worden. Dieser Boden konnte somit als Referenz für gewachsene Ackerböden aus Sand in der Region dienen. Er unterscheidet sich allerdings in einigen Eigenschaften deutlich von dem Versuchsboden Zinnitz (s. Kap. 3.1.1 bzw. 3.3.2). Die Bedingungen der Anlage stellen Gast und Haubold-Rosar (2003); Katzur et al. (2000); Rademacher und Haubold-Rosar (2015a) dar.

Die Lysimeteranlage A3 (Abbildung 12 unten) mit einem begrünten Kellergang wurde 1996 in direkter Nachbarschaft zu der Lysimeteranlage A2 errichtet. Auch hier werden die sechs Lysimeter auf der nördlichen Seite des Kellers genutzt. In diesen ist der Boden aus Welzow eingebaut. Es handelt sich um runde PE-Lysimeter mit einer Grundfläche von 0,95 m<sup>2</sup> und einer Mantelhöhe von 3 m. Die Anlage und deren Funktionsweise entspricht der Lysimeteranlage A2.

Eine automatische Wetterstation (AWOS 7700; Fa. Thies GmbH & Co. KG) auf der Versuchsstation erfasst kontinuierlich den Niederschlag, sowie die Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windstärke, Windrichtung und Strahlungsintensität. Die Sensoren werden regelmäßig durch die Firma UP GmbH gewartet und ggf. erneuert. Für den Versuch werden die Niederschläge mit einem HELLMANN-Niederschlagssammler erfasst.



Abbildung 12: Ansicht der Lysimeteranlagen. Oben: A2 - Braunerde-Podsol. Unten: A3 - Welzow. Fotos: A. Rademacher

### 3.4.2 Böden

In den Lysimetern, die für den Kipprohboden Welzow vorgesehen waren, befand sich seit 1996 ein Kipp-Lehmsand (Abk.: oj-IS nach Ad-Hoc-AG Boden (2005)). Der obere Profilmeter wurde komplett mit dem frischen Kipprohboden des Feldversuchsstandortes Welzow, einem quartären kalkführenden Kipplehmsand (Abk.: oj-(c)IS nach Ad-Hoc-AG Boden (2005), ausgetauscht. Der Einbau des Bodenmaterials erfolgte lagenweise in 10 cm Schichten. Die Methodik der Befüllung erfolgte analog zu der der Bodensäulen (s. K. 3.3.4). Die angestrebten Lagerungsdichten entsprechen denen, die für den Boden Welzow in Tabelle 20 angegeben sind. In Tabelle 23 sind Angaben zur Textur des ausgetauschten Oberbodens (0 - 1 m), und des im Lysimeter belassenen Unterbodens (1 - 3 m) dargestellt. Der Unterboden weist einen etwas höheren Ton- und Schluffanteil als der Oberboden, ein schwach lehmiger Sand (SI2), auf und ist daher als mittel lehmiger Sand (SI3) einzuordnen.

Tabelle 23: Textur der Böden in den Lysimetern

Kornfraktion		Kippsubstrat Welzow		Braunerde-Podsol		
		0 - 1 m <sup>1)</sup>	1 - 3 m <sup>2)</sup>	Ap <sup>1)</sup>	Bsv <sup>3)</sup>	Cv <sup>3)</sup>
Skelettgehalt des Gesamtbodens [M.-%]						
Skelett	> 2 mm	6,1	3,6	11,0	7,2	9,2
Textur des Feinbodens [M.-%]						
Ton	< 2 µm	7,0	10,6	4,0	3,0	2,0
Schluff	2 - 63 µm	13,0	16,9	9,0	2,5	0,6
Sand	63 - 2000 µm	80,0	72,4	87,0	94,5	97,4
Bodenart (Ad-Hoc-AG Boden, 2005)		SI2	SI3	mSgs	mSgs	gS

<sup>1)</sup> Probenahme vor der Einarbeitung der BKS; <sup>2)</sup> aus Katzur et al. (2000); <sup>3)</sup> aus Heinkele und Haubold-Rosar (2010): Mittelwerte für den B- und C-Horizont

In den sechs weiteren zur Verfügung stehenden Lysimetern der Anlage A2 befand sich seit 1975 ein Braunerde-Podsol aus Sand. Für den Versuch wurde die 30 cm mächtige Krume entnommen und mit etwas Bodenmaterial vom Feldversuchsstandort Zinnitz innig vermengt. Das Ziel war eine Homogenisierung des Bodenmaterials zur Schaffung einheitlicher Ausgangsbedingungen. Durch die Zugabe von Bodenmaterial von der Versuchsfläche Zinnitz konnten zudem die Lysimeter etwas aufgefüllt werden und somit Randeffekte durch zu hohe Kanten der Lysimeter vermieden werden. Dieses Gemisch wurde anschließend wieder in die Lysimeter mit einer angestrebten Lagerungsdichte von 1,4 g/cm<sup>3</sup> eingebaut. Die Texturanalyse des Braunerde-Podsols (Tabelle 23)

ergab, dass der Ap- und Bsv-Horizont als grobsandiger Mittelsand (mSgs) und der Cv-Horizont als Grobsand (gS) einzuordnen sind.

Zudem sind in Tabelle 24 die bodenphysikalischen Kennwerte der Unterböden dargestellt. Das bis 1 m Tiefe eingefüllte Kippsubstrat Welzow weist ein um 11,4 % höheres Trockenraumgewicht (Rt) auf als der von Katzur et al. (2000) beschriebene Unterboden. Dies spiegelt sich in dem geringen Gesamtporenvolumen (GPV), welches im Unterboden um 15,6 % höher ist als im oberen Bodenabschnitt (0,3 - 1 m). Die Luftkapazität (LK) beider Unterbodenschichten weist ein vergleichbares hohes Niveau auf. Die Feldkapazität (FK), die nutzbare Feldkapazität (nFK) und das Totwasser sind als sehr gering bis gering einzuordnen (Ad-Hoc-AG Boden, 2005), wobei diese Werte in der oberen Lage im Vergleich zu dem tieferen Unterboden herabgesetzt sind. Die gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $K_f$ -Wert) ist in dem Unterboden (1 - 3 m) deutlich höher als in der oberen Lage.

Die bodenphysikalischen Parameter des Braunerde-Podsols werden von Heinkele und Haubold-Rosar (2010) beschrieben. Das Trockenraumgewicht steigt vom Bsv- zum Cv-Horizont etwas an. Das GPV weist in allen Schichten ein mittleres Niveau auf (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Die LK steigt mit abnehmender Tiefe von einem hohen auf ein sehr hohes Niveau an. Demgegenüber nehmen die Feldkapazität (FK), die nutzbare Feldkapazität (nFK) und das Totwasser (TW) im Bsv- und Cv-Horizont im Vergleich zu dem Ap-Horizont weiter ab. Das sehr geringe (FK) bzw. geringe (nFK, TW) Niveau im Ap-Horizont sinkt auf ein sehr geringes (FK, nFK, TW) Niveau im Unterboden ab (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Der hohe  $K_f$ -Wert des Ap-Horizontes steigt im Unterboden weiter an. Dies ist auf die Veränderung der Bodenart (Tabelle 23) durch den zunehmenden Sandanteil und abnehmende Schluff- und Tonanteile zurückzuführen.

Tabelle 24: Bodenphysikalische Kennwerte der Böden in den Lysimetern

Bodenphysikalische Kennwerte	Kippsubstrat Welzow		Braunerde-Podsol		
	0,3 - 1 m <sup>1)</sup>	1 - 3 m <sup>2)</sup>	Ap <sup>3)</sup>	Bsv <sup>3)</sup>	Cv <sup>3)</sup>
Rt [g/cm <sup>3</sup> ]	1,76	1,58	1,41	1,55	1,58
GPV (pF 0,0) [%]	33,4	39,6	44,9	41,2	40,1
LK (pF < 1,8) [Vol.-%]	18,6	18,2	25,9	33,5	36,0
FK (pF > 1,8) [Vol.-%]	14,8	21,4	18,9	7,7	4,1
nFK (pF 1,8 - pF 4,2) [Vol.-%]	9,5	13,8	13,4	5,2	2,7
Totwasser (pF > 4,2) [Vol.-%]	5,3	7,6	5,5	2,5	1,4
$K_f$ -Wert [cm/d]	76	392	1370	2077	4238

<sup>1)</sup> Probenahme vor der Einarbeitung der BKS; <sup>2)</sup> Katzur et al. (2000); <sup>3)</sup> Heinkele und Haubold-Rosar (2010): Mittelwerte für den B- und C-Horizont

Die Ermittlung der chemischen Kennwerte (Tabelle 25) der Lysimeter erfolgte vor dem Versuchsbeginn im April 2011 und somit auch vor der Applikation der BKS. In Bezug auf Tabelle 25 ist anzumerken, dass der pH-Wert des neu eingebauten Kippsubstrats Welzow mit 7,6 in einem schwach alkalischen Bereich liegt, wohingegen der tiefere Unterboden mit 4,8 im sauren Bereich liegt. Der obere Profilmeter weist zudem freies  $\text{CaCO}_3$  auf. Er ist zudem basengesättigt und durch eine sehr geringe  $\text{KAK}_{\text{pot}}$  gekennzeichnet (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Die  $\text{C}_t$ - und  $\text{N}_t$ -Gehalte des oberen Profilmeters liegen ebenfalls auf einem höheren Niveau als die des Unterbodens. Die Verfügbarkeit von Kalium ist im Unterboden höher als in dem neu eingebauten oberen Profilmeter. Für die Phosphorverfügbarkeit verhält es sich genau entgegengesetzt. Der Gesamtgehalt von K und P weisen auf eine stärkere Festlegung der Nährstoffe in dem Unterboden hin.

Tabelle 25: Kennwerte der Lysimeterböden

Kennwerte	Kippsubstrat Welzow		Braunerde-Podsol		
	0 - 1 m <sup>1)</sup>	1 - 3 m <sup>2)</sup>	Ap <sup>1)</sup>	Bsv <sup>3)</sup>	Cv <sup>3)</sup>
pH (CaCl <sub>2</sub> -Lsg.)	7,6	4,8	5,3	4,6	4,0
elektr. LF [μS/cm]	101	-	52	14	11
C <sub>org</sub> [M.-%]	0,23	< 0,1	1,68	0,30	0,04
N <sub>t</sub> [M.-%]	0,015	0,009	0,120	0,021	< 0,005
C/N-Verhältnis	12	7	14	15	-
S <sub>t</sub> [M.-%]	< 0,02	< 0,02	0,03	< 0,02	< 0,02
CaCO <sub>3</sub> [M.-%]	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
KAK <sub>pot</sub> [cmol <sub>c</sub> /kg]	3,3	6,3	8,0	3,4	0,9
BS [%]	100	52	51	12	27
K <sub>DL</sub> [mg/kg]	32	67	< 5	n. b.	n. b.
P <sub>DL</sub> [mg/kg]	30	< 5	83	n. b.	n. b.
KW-Auszug					
Ca [mg/kg]	2230	665	1220	223	177
Mg [mg/kg]	956	1525	443	212	175
K [mg/kg]	1140	1400	448	287	323
P [mg/kg]	138	160	617	191	283

<sup>1)</sup> Probenahme vor der Einarbeitung der BKS; <sup>2)</sup> Katur et al. (2000); <sup>3)</sup> Heinkle und Haubold-Rosar (2010): Mittelwerte für den B- und C-Horizont



Der pH-Wert des Braunerde-Podsols (Tabelle 25) aus Sand liegt in allen Horizonten im sauren Bereich. Mit zunehmender Tiefe sinkt er von 5,3 (Ap-Horizont) bis auf 4,5 (Cv-Horizont) ab. Der Ap-Horizont weist hohe  $C_r$ - und  $N_r$ -Gehalte auf, was auf die ackerbauliche bzw. vorhergehende Nutzung zurückzuführen ist. Dementsprechend liegen auch die Gesamtgehalte der Nährstoffe im Ap-Horizont auf einem deutlich höheren Niveau als in dem Bsv- und Cv-Horizont. Der Ap-Horizont weist eine geringe bis mittlere  $KAK_{pot}$  auf und ist zudem als basenreich einzuschätzen (Ad-Hoc-AG Boden, 2005).

### **3.4.3 Biokohlesubstrate**

In dem Lysimeterversuch wurde das gleiche BKS15 wie im Gefäßversuch I und im Bodensäulenversuch verwendet (s. K. 3.1.2).

### **3.4.4 Versuchsaufbau und Bewirtschaftung**

Im Lysimeterversuch wurden für jeden Boden drei Varianten in zweifacher Wiederholung angelegt:

- Mineraldüngung (MIN),
- 30 t TS/ha BKS15 jährlich (3x30BKS15) und
- 90 t TS/ha BKS15 (90BKS15).

Die Einmischung der Düngergaben erfolgte in der gesamten Krume. Nur die N-Düngung der MIN-Variante wurde oberflächlich ausgebracht. Die Variante 3x30BKS15 erhielt nach der Maisernte im Herbst 2011 und nach der Roggenernte im Herbst 2012 erneut jeweils 30 t TS/ha BKS15, so dass in der Summe ebenfalls 90 t TS/ha BKS15 appliziert wurden (Tabelle 26).

Tabelle 26: Düngung des Lysimeterversuchs

Kultur	Termin	Varianten <sup>1)</sup>		
		MIN	3x30BKS15	90BKS15
Mais „Subito“	29.04.2011	120 N <sup>2)</sup> / 80 P <sup>3)</sup> / 100 K <sup>4)</sup>	30 t TS/ha	90 t TS/ha
	20.06.2011	40 N <sup>5)</sup>		
Winterroggen „Condukt“	30.09.2011		30 t TS/ha	
		40 N <sup>5)</sup> / 50 P <sup>6)</sup> / 130 K <sup>7)</sup>		
	29.03.2012	100 N <sup>5)</sup>		
	07.05.2012	40 N <sup>5)</sup>		
	08.08.2012	30 N [zum Stroh]		
Winterroggen „Condukt“	11.09.2012		30 t TS/ha	
		40 N <sup>5)</sup> / 50 P <sup>8)</sup> / 130 K <sup>4)</sup>		
	15.04.2013	100 N <sup>2)</sup>		
	16.05.2013	40 N <sup>5)</sup>		
	05.08.2013	30 N <sup>5)</sup> [zum Stroh]		

<sup>1)</sup> Mineraldüngerangabe in kg/ha; <sup>2)</sup> Harnstoff (46 % N); <sup>3)</sup> P25 (10,9 % P); <sup>4)</sup> Korn-Kali (33,2 % K); <sup>5)</sup> Kalkammonsalpeter (27 % N); <sup>6)</sup> Superphosphat (7,9 % P); <sup>7)</sup> Korn-Kali (49,8 % K); <sup>8)</sup> Triple-Superphosphat (20 % P)

Alle Varianten wurden seit der Startdüngung einheitlich in Anlehnung an die Düngungsrichtlinien von (Gunschera, 1998; Haubold-Rosar und Gunschera, 2009) für Kippböden der Bhe 5 gedüngt. Die BKS-Varianten haben keine zusätzliche mineralische N-Düngung als Ausgleich für eventuelle N-Festlegungen durch die BKS erhalten (Clough et al., 2013). Im ersten Versuchsjahr wurde Mais (*Zea mays* L.) der Sorte „Subito“ angebaut. In den beiden Folgejahren erfolgte der Anbau von Winterroggen (*Secale cereale* L.) der Sorte „Condukt“ (Tabelle 27).

Tabelle 27: Fruchtfolge und pflanzenbauliche Termine

Kultur	Saattermin	Saatstärke	Erntetermin
Mais „Subito“	05/06.05.2011 25.05.2011	10 Pflanzen/m <sup>2</sup> Nachsaat einzelner Pflanzen	01.09.2011
Winterroggen „Condukt“	30.09.2011	245 Körner/m <sup>2</sup>	12.07.2012
Winterroggen „Condukt“	11.09.2012	245 Körner/m <sup>2</sup>	17.07.2013

Nach der Maisernte wurde per Hand eine „wendende“ Bodenbearbeitung bis 30 cm Tiefe durchgeführt, bei der die P- und K- Dünger mit der Maisstoppel in den Oberboden eingebracht wurden. Die N-Gaben erfolgten in den Jahren 2011 und 2012 flächig zu der Winterroggenaussaat, zum Vegetationsbeginn und zum Schossen/Ährenschieben. Das geerntete Stroh wurde zu jedem Lysimeter zurückgeführt und mit einer N-Gabe eingearbeitet.

Den Verlauf der mittleren monatlichen Lufttemperaturen und monatlichen Niederschlagssummen an der Lysimeterstation Grünewalde von Januar 2011 bis Dezember 2013 im Vergleich zum langjährigen Mittel der DWD Station Cottbus zeigt Abbildung 13. Im dem Versuchszeitraum war die für die Region typische Vorsommertrockenheit in den Monaten März, April und Mai mit Ausnahme des Mai 2013 deutlich ausgeprägt. Das Jahr 2011 war um 0,2 °C wärmer als das langjährige Mittel. Die Jahre 2012 und 2013 hingegen waren um 0,3 und 0,6 °C kälter als das langjährige Mittel. Die Niederschlagssummen der Gesamtjahre 2011 bis 2013 lagen auf einem höheren Niveau im Vergleich zum langjährigen Mittel. Insbesondere der Juni fiel in allen Versuchsjahren mit intensiven Niederschlägen auf.

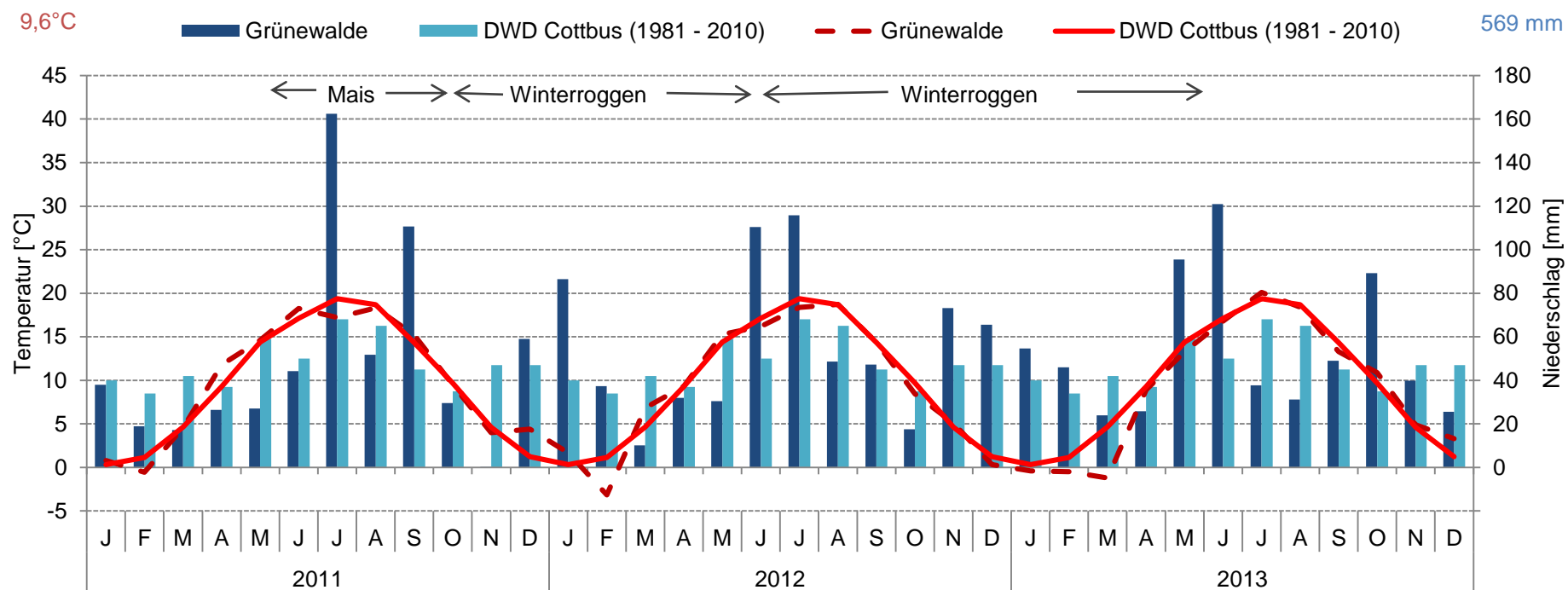


Abbildung 13: Klimadiagramm für den Zeitraum vom 01.01.2011 bis 31.12.2013 der Lysimeterstation Grünewalde (FIB e.V.) und Cottbus (DWD) im Vergleich zum langjährigen Mittel der Station Cottbus (1981 - 2010; DWD)

### 3.4.5 Probenahme und -lagerung

Bei der Befüllung der Lysimeter der Anlage A3 wurden schichtenweise sowohl Mischproben als auch ungestörte Strukturproben (100 cm<sup>3</sup> Stechzylinder) für bodenchemische und -physikalische Untersuchungen entnommen.

Nach der Einmischung der ersten Düngergaben wurden die Oberböden jeweils vor dem Beginn der Vegetationsperiode und direkt im Anschluss an die Ernte beprobt, um die Bodenentwicklung anhand ausgewählter chemischer Kennwerte zu verfolgen. Die Probennahmen erfolgten mit einem N<sub>min</sub>-Bohrer bis 30 cm Tiefe. Für jedes Lysimeter wurden fünf Einstiche zu einer Mischprobe vereinigt. Die Analyse der Bodenproben erfolgte in der Regel sofort. Alternativ wurden die Proben lufttrocken aufbewahrt, abgesehen von Aliquoten, die für die Bestimmung mobiler Schwermetalle bei -18°C gelagert wurden. Die bodenphysikalischen Untersuchungen wurden direkt im Anschluss an die Probenahme durchgeführt.

Die Ernte des Pflanzenaufwuchses der Lysimeter erfolgte bei allen Kulturen per Hand. Der Mais und der Winterroggen wurden mit einer Gartenschere etwa 10 cm über dem Boden abgetrennt. Der Mais wurde gehäckselt und ein Aliquot entnommen, welches gekühlt zum Labor transportiert wurde. Der Winterroggen wurde zu „Puppen“ gebunden und trocknete in einer überdachten Stellage etwa zwei Wochen nach. Dann erfolgte der Drusch mit einem Parzellenmähdrescher (Hege 140). Der gesamte Kornertrag und ein Aliquot des Strohs wurden für die Analytik verwendet, welche sich unmittelbar an die Ernte bzw. den Drusch anschloss.

Das Sickerwasser wurde in abgedeckten Eimern aufgefangen und dreimal wöchentlich (Montag, Mittwoch und Freitag) erfasst. Anschließend wurde ein Aliquot für jedes Lysimeter entnommen und eine repräsentative Monatsmischprobe gebildet. Die Sammelflaschen wurden bis zur Analyse (s. K.3.5.3) bei -18 °C aufbewahrt.

## 3.5 Analysemethoden

### 3.5.1 Biokohlesubstrate und Böden

Die bodenphysikalischen Eigenschaften der Böden wurden an ungestört entnommenen Stechzylindern (100 cm<sup>3</sup>) und gestörten Mischproben untersucht. Eine Auflistung der angewendeten Methoden ist Tabelle 28 zu entnehmen.

Tabelle 28: Labormethoden zur Untersuchung der bodenphysikalischen Eigenschaften

Parameter	Methoden
- an ungestörten Proben in 100 cm <sup>3</sup> - Stechringen:	
Trockenraumgewicht R <sub>t</sub>	Trocknung bei 105°C, DIN 19683-12:1973-04
pF-Kurve (LK, FK, nFK)	Wassergehalte bei pF 1,0 bis 3,0 nach Hartge und Horn (2009), Sandkasten- und Drucktopfmethode, DIN ISO 11274:2012-04
- an gestörten Proben (lutro):	
Skelettgehalt	Siebung des Gesamtbodens
Korngrößenverteilung des Feinbodens	CaCO <sub>3</sub> -Zerstörung mit 10%iger HCl-Lsg.; Humuszerstörung mit H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (10%); Dispergierung (24 h) mit 0,4n Na <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> auf Überkopfschüttler; Bestimmung der Schluff- und Tonfraktionen nach KÖHN 1929; Bestimmung der Sandfraktionen durch Nasssiebung, DIN 19683-2:1973-04
pF-Kurve (Totwasser)	Wassergehalt bei pF 4,2 im Drucktopf, DIN ISO 11274:2012-04
Dichte Festsubstanz D <sub>f</sub>	Hartge und Horn (2009) (Xylol-Volumenmessung nach Ultraschallbehandlung)
Gesamtporenvolumen	rechnerisch: $(1 - R_t/D_f) \times 100$

Die in Tabelle 29 aufgeführten Methoden wurden zur Untersuchung der bodenchemischen Eigenschaften der Biokohlesubstrate und des Bodens angewendet. Die Proben wurden generell luftgetrocknet und auf eine Korngröße < 2 mm gesiebt.

Tabelle 29: Labormethoden zur Untersuchung der bodenchemischen und bodenbiologischen Eigenschaften

Parameter	Methoden
Probenvorbehandlung	DIN ISO 11464:1996-12
Wassergehalt, TS	DIN ISO 11465:1996-12
pH	DIN ISO 10390:1997-05
EC	DIN ISO 11265:1997-06
Glühverlust	DIN 19684-3:2000-08
CaCO <sub>3</sub>	gasvolumetrisch nach SCHEIBLER (KÖNIG 1923), VDLUFA Bd. 1 A 5.3.1, DIN ISO 10693:2014-06, Messung bei pH > 6,2
Basisch wirksame Stoffe (in BVM)	VDLUFA (1973)
C <sub>t</sub> , N <sub>t</sub> , S <sub>t</sub>	durch trockene Veraschung bei 1150°C (+ Katalysator) mit Elementar-Analysator vario EL der Fa. Elementar Analysensysteme GmbH, Hannau, C: DIN ISO 10694:1996-08, N: DIN ISO 13878:1998-11, S: DIN ISO 15178:2001-02
C <sub>org</sub>	= C <sub>t</sub> ; bei Vorhandensein von CaCO <sub>3</sub> nach Abzug des bestimmten CaCO <sub>3</sub> -C bzw. durch schonende Zerstörung der Carbonate mit HCl (10 %) vor der C <sub>t</sub> -Bestimmung (DIN ISO 10694:1996-08)
N <sub>an</sub> = N <sub>min</sub>	VDLUFA Bd.1 A 6.1.4.1 (an frischem Probenmaterial): NO <sub>3</sub> -N durch photometrische Extinktionsmessung im Bodenextrakt bei 218 und 228 nm Wellenlänge und anschließende Differenzbildung NH <sub>4</sub> -N nach DIN 38406-5:1983-10
N <sub>org</sub>	= N <sub>t</sub> - N <sub>an</sub>
C <sub>hwl</sub> , N <sub>hwl</sub>	VDLUFA 1991, Bd. I, 6.1.7.1 (C- und N-Messung mittels Multi-NC, Fa. Jena Analytik), N: DIN EN 12260:2003-12, C: DIN EN 1484:1997-08
C <sub>wasserlös.</sub> , pyrophosphatlösl.	Sequentielle Extraktion nach Kaiser (2004), DOC: DIN EN 1484:1997-08, DON: DIN EN 12260:2003-12
Kalkbedarf	SCHACHTSCHABEL 1953, beschrieben in Thun et al. (1955)
KAK <sub>pot</sub>	FIB_AV06 (ehemalige DIN 19684-8:1977-02, Mehlich (1948)); 1. Austauschlösung: H-Wert durch Titration; Ca, Mg, K, Na am ICP nach DIN EN ISO 11885-22:2009-09); 2. Austauschlösung: Ba am AAS nach DIN 38406-28:1998-05
P <sub>verf.</sub> = P <sub>DL</sub>	VDLUFA 1991 Bd. I A 6.2.1.2, (P-Messung am ICP nach DIN EN ISO 11885-22:2009-09)
K <sub>verf.</sub> = K <sub>DL</sub>	VDLUFA 1991 Bd. I A 6.2.1.2, (K-Messung am ICP nach DIN EN ISO 11885-22:2009-09)
Mg <sub>verf.</sub>	VDLUFA 1991 Bd. I A 6.2.4.1 (im CaCl <sub>2</sub> -Auszug, Mg-Messung am AAS/ Flamme, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /Luft)

Netto-N-Mineralisierung	Beck (1983)
Alkalische Phosphatase	Tabatabai und Bremner (1969)
Gesamtgehalte: Ca, Mg, K, P, Na	Aufschluss nach DIN ISO 11466:1997-06 DIN EN ISO 11885-22:2009-09
Mn, Cu, Zn, Ni, Cr	DIN EN ISO 11885-22:2009-09
Pb, Cd	DIN EN ISO 11047-2:2003-05 (ET-AAS geringe Konzentrationen)

### 3.5.2 Pflanzenmaterial

In Tabelle 30 sind die Methoden zur Untersuchung der Nährstoff- und Schadstoffgehalte des Pflanzenaufwuchses aufgeführt. Die Bestimmung der Frischmasse erfolgte durch Wiegen direkt nach der Ernte.

Tabelle 30: Labormethoden zur Untersuchung der chemischen Eigenschaften des Pflanzenaufwuchses

Parameter	Methoden
Probenvorbereitung	VDLUFA Bd. III 2.1 und 2.2
TS	VDLUFA Bd. III 3.1
C <sub>t</sub> , N <sub>t</sub> , S <sub>t</sub>	durch trockene Veraschung bei 1150°C (+ Katalysator) mit Elementar-Analysator vario EL der Fa. Elementar Analysensysteme GmbH, Hannau, C: DIN ISO 10694:1996-08, N: DIN ISO 13878:1998-11, S: DIN ISO 15178:2001-02
HNO <sub>3</sub> -Aufschluss: K, P, Cu, Zn, Mn, Mg, Ni, Cr	EPA 3052:1996 DIN EN ISO 11855:22:2009-09
Pb	DIN 38406 -6:1998-07
Cd	DIN EN ISO 5961:1995-05



### 3.5.3 Wasser

Die Wasserproben wurden bei -18 °C gelagert. Die Analytik der Monatsmischproben erfolgte entsprechend Tabelle 31.

Tabelle 31: Labormethoden zur Untersuchung der chemischen Eigenschaften des Sickerwassers

Parameter	Methoden
pH	DIN 38404-5:2009-07
EC	DIN 38404-8:1981-01
CSB	DIN 38409-41:1980-12
TOC/DOC	DIN EN 1484:1997-08
NPOC(T)/NPOC(D)	DIN EN 1484:1997-08
TN <sub>b</sub>	DIN EN 12260:2003-12
NH <sub>4</sub>	DIN 38406-5:1983-10
NO <sub>3</sub>	DIN EN ISO 10304-1:2009-07; DIN EN ISO 10304-2:1996-01
DN <sub>b</sub>	= TN <sub>b</sub> (mikrofiltriert)
o-PO <sub>4</sub>	DIN 38405-11:1983-10
Cl	DIN EN ISO 10304-1:2009-07; DIN EN ISO 10304-2:1996-11
Druckaufschluss: K, P, Cu, Zn, Mn, Mg, Ni, Cr	EPA 3052:1996 DIN EN ISO 11855:22:2009-09

### 3.6 Statistische Auswertungen

Die Datenverwaltung und Aufbereitung erfolgt mit Microsoft Office Excel 2010. Aufgrund der geringen Wiederholungen bei den Pflanzen- und Bodendaten der Gefäßversuche, des Lysimeterversuches und der bodenphysikalischen Daten des Bodensäulenversuches erfolgt die statistische Untersuchung mit dem parameterfreien Rangsummentest nach Kruskal-Wallis (H-Test) in SPSS Version 21. Es wird mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % gerechnet. Bei signifikanten Unterschieden zwischen den Mittelwerten der Faktorstufen im H-Test wird mit dem Open Source Programm R der Nemenyi-Test durchgeführt. Dieser ermittelt signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Faktorstufen. Aufgrund der Vielzahl an Varianten wurden in den Abbildungen zu den Gefäßversuchen lediglich die signifikanten Unterschiede durch Kleinbuchstaben kenntlich gemacht. Die Varianten ohne Kleinbuchstaben weisen keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zu den anderen Varianten auf.

In dem Bodensäulenversuch liegt jeweils nur ein Wert für die Pflanzen- und Bodendaten ( $n = 1$ , Ausnahme Bodenphysikdaten  $n = 4$ ) vor, so dass von einer statistischen Auswertung abgesehen wird. Die Auswertung der Sickerwasserdaten der Lysimeter und Bodensäulen erfolgt als verbundene Stichproben mit dem nichtparametrischen FRIEDMANN-Test in SPSS (Version 21). Zunächst werden die Daten entsprechend der Bedeckung mit der jeweiligen Kulturpflanze in Perioden aggregiert. Für die Lysimeter ergeben sich drei Perioden (I: 06/2011 - 09/2011, II: 10/2011 - 07/2012, III: 08/2012 - 07/2013) und für die Bodensäulen in fünf Perioden (I: 07/2011 - 07/2012, II: 08/2012 - 12/2012, III: 01/2013 - 02/2013, IV: 03/2013 - 06/2013, V: 07/2013 - 12/2014). Der FRIEDMANN-Test ermöglicht zudem die Option „PAARWEISE VERGLEICHE“, um die einzelnen Faktorstufen paarweise zu vergleichen, so dass potenzielle signifikante Unterschiede zwischen Faktorstufen herausgearbeitet werden.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Gefäßversuch I

#### 4.1.1 Bodenparameter

##### 4.1.1.1 Physikalische Bodenkennwerte

Die Trockenrohddichte ( $R_t$ ) beider Versuchsböden nimmt mit Erhöhung der BKS-Gaben ab (Abbildung 14). Der tendenzielle Rückgang der Trockenrohddichte ist ab einer Gabenhöhe von 90 t/ha erkennbar. In dem Boden Welzow ist der Rückgang mit der Applikation des BKS30 etwas stärker ausgeprägt als mit dem BKS15. In dem Boden Zinnitz ist zwischen den beiden BKS hinsichtlich der Trockenrohddichte kein Unterschied auszumachen. Es liegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten vor.

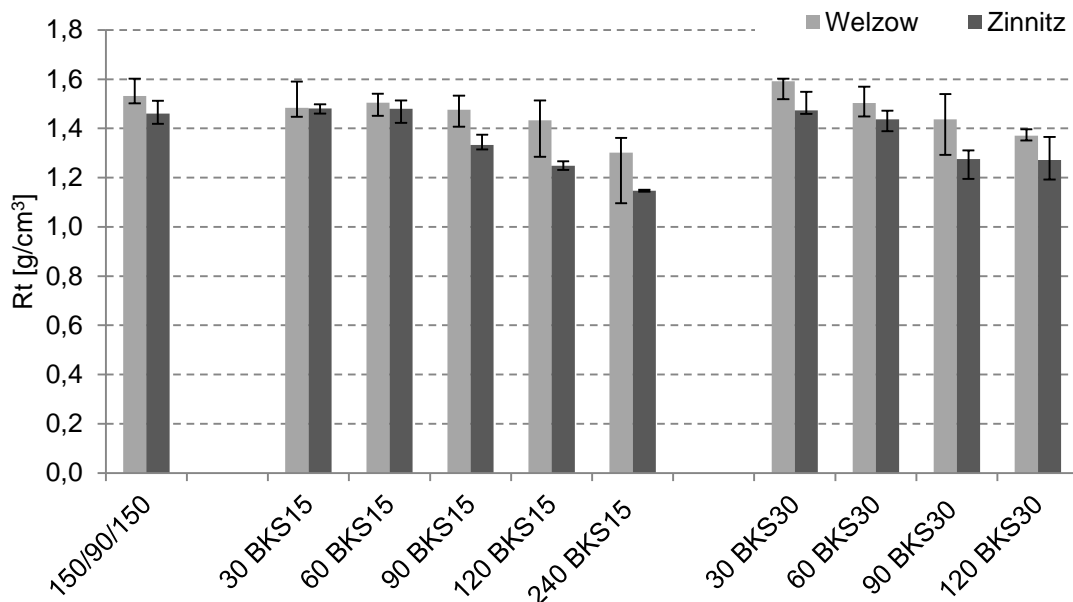


Abbildung 14: Trockenrohddichte ( $R_t$ ) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende ( $n = 4$ , Median, Min., Max.)

Für beide Versuchsböden ergibt sich eine tendenzielle Erhöhung des Gesamtporenvolumens (Abbildung 15) ab einer Gabenhöhe von 90 t/ha BKS15 (W, Z) und 30 t/ha BKS30 (Z) bzw. 60 t/ha BKS30 (W). Das Gesamtporenvolumen steigt nach dem Einsatz von 240 t/ha BKS15 um 6,8 Vol.-% (W) bzw. 10,6 Vol.-% (Z) im Vergleich zu der mineralischen Düngung an. Das GPV wird dadurch von einem mittleren Ausgangsniveau ein hohes (W) bis sehr hohes (Z) Niveau angehoben (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Die Steigerung des Gesamtporenvolumens ist in beiden Böden mit dem BKS30 um

etwa 2 Vol.-% stärker als mit dem BKS15. Es liegen keine signifikanten Unterschiede vor.

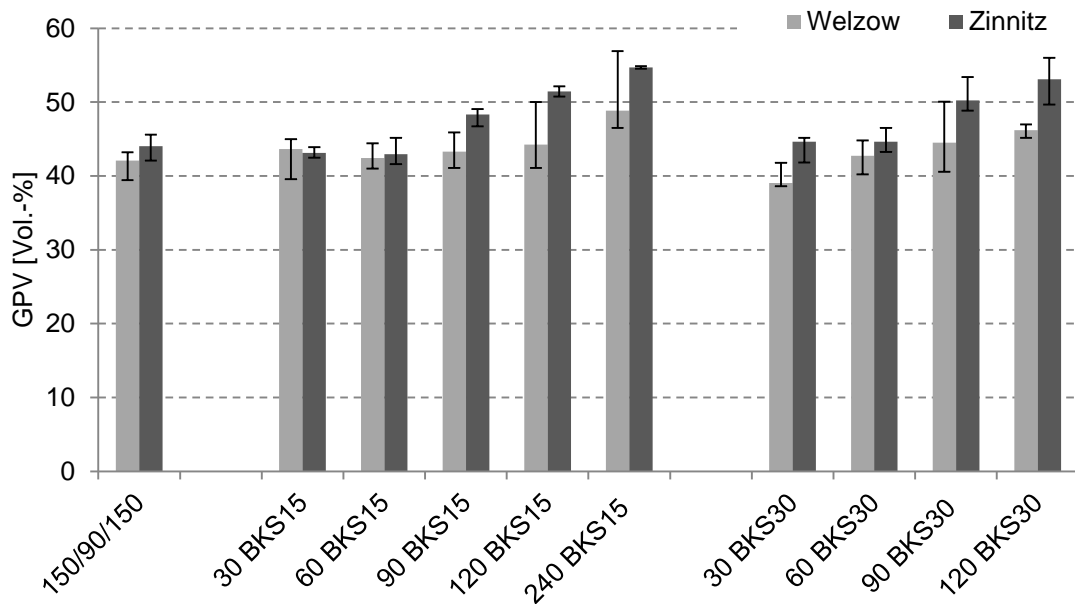


Abbildung 15: Gesamtporenvolumen (GPV) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max.)

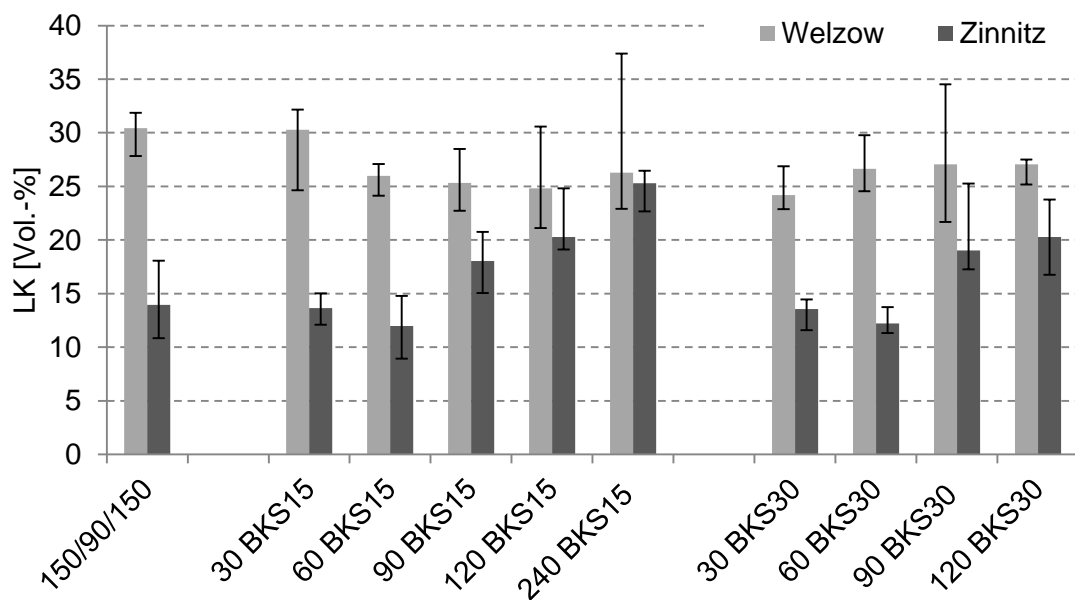


Abbildung 16: Luftkapazität (LK) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max.)

Abbildung 16 zeigt, dass steigende BKS-Gaben in dem sandigen Kippboden Welzow eine um bis zu 6 Vol.-% abnehmende Luftkapazität im Vergleich zu der Referenzvariante 150/90/150 bewirken (Rademacher und Haubold-Rosar, 2013). Die Luftkapazität

des Bodens Welzow ist in allen Varianten als hoch bis sehr hoch einzuschätzen (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). In dem schluffigen gewachsenen Ackerboden Zinnitz hingegen führen die steigenden BKS-Gaben, insbesondere das BKS15, zu einer Erhöhung der Luftkapazität im Vergleich zu der Mineraldüngervariante (150/90/150). Die Luftkapazität des Bodens Zinnitz steigt mit Erhöhung der BKS-Gabe von einem mittleren auf ein hohes Niveau an (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten bestehen nicht.

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) ist ein entscheidender Parameter für den Pflanzenbau in der Lausitz, insbesondere aufgrund der in Kapitel 2.1 beschriebenen klimatischen Bedingungen. Der humusfreie und tonarme Kippboden Welzow reagiert, wie in Abbildung 17 dargestellt, auf steigende BKS-Gaben mit einer Erhöhung der nFK um bis zu 6 Vol.-% (240 BKS15) im Vergleich zu der Referenzvariante 150/90/150 (Rademacher und Haubold-Rosar, 2013). Die nFK aller Varianten des Bodens Welzow ist trotz dieser Erhöhung noch als gering einzuschätzen (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Der gewachsene Boden Zinnitz weist eine hohe nFK auf, die durch den Einsatz der BKS nicht beeinflusst bzw. im Fall der Variante 240 BKS15 tendenziell verringert wird. Zwischen den Varianten bestehen keine signifikanten Unterschiede.

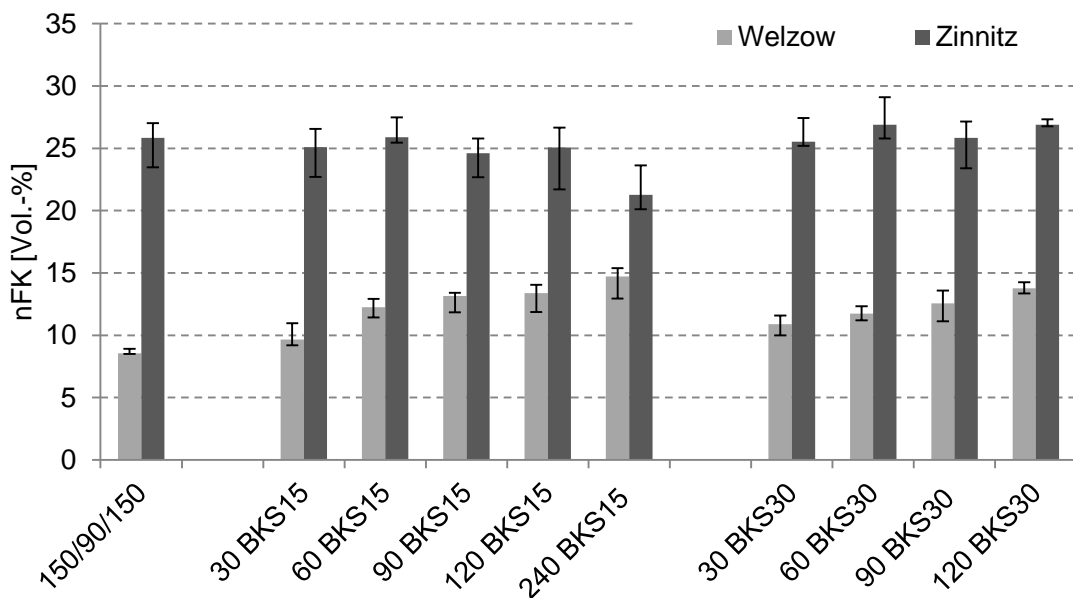


Abbildung 17: Nutzbare Feldkapazität (nFK) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max.)

Das nicht pflanzenverfügbare Totwasser ( $pF > 4,2$ ) nimmt mit steigenden BKS-Gaben in beiden Böden deutlich zu (Abbildung 18). Der Totwasseranteil des Bodens Welzow

steigt um bis zu 5 Vol.-% und der des Bodens Zinnitz um bis zu 4 Vol.-% durch den Einsatz des BKS15 und BKS30 an. Das TW erhöht sich somit von einem sehr geringen auf ein geringes Niveau (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten liegen nicht vor.

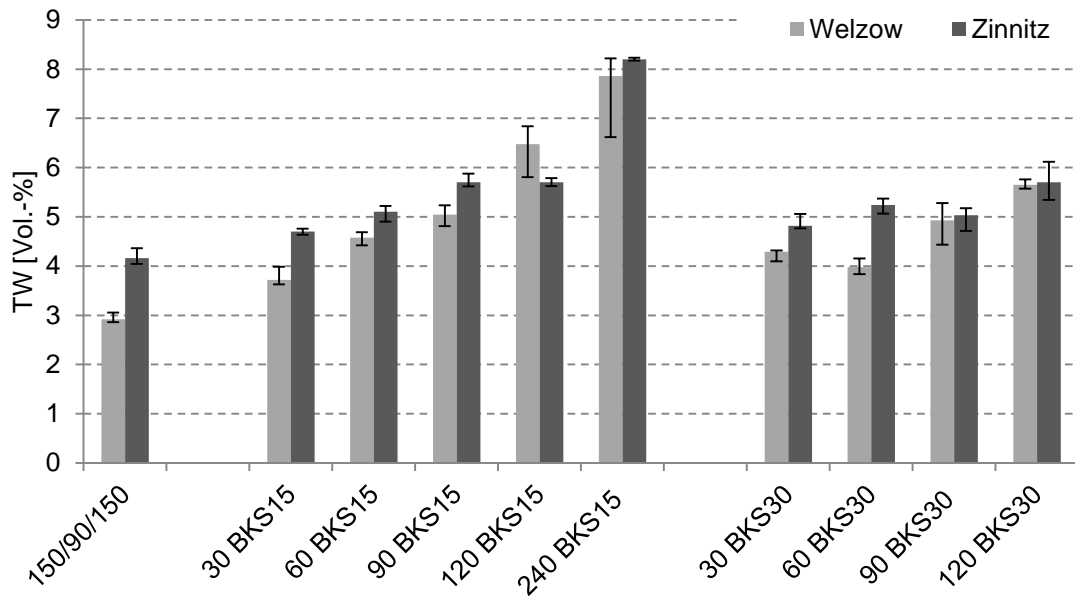


Abbildung 18: Totwasser (TW) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max.)

#### 4.1.1.2 Chemische Bodenkennwerte

Der Boden Welzow weist einen hohen Ausgangs-pH-Wert sowie eine sehr hohe Basensättigung auf (Tabelle 32), die durch die BKS-Gaben nicht beeinflusst werden. Jedoch wird der saure pH-Wert des gewachsenen Bodens Zinnitz von beiden BKS gleichermaßen angehoben. Die Basensättigung des Bodens Zinnitz wird durch die BKS-Düngung deutlich von einem mittelbasischen Niveau auf ein sehr basenreiches bis basengesättigtes Niveau angehoben (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Die BKS-Applikation bewirkt eine Zunahme der  $KAK_{pot}$  um bis zu 6,3 (W) bzw. 5,3 (Z)  $cmol_c/kg$  auf ein geringes bis mittleres Niveau (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Ebenso steigen die elektrische Leitfähigkeit (elektr. LF) um bis zu 125 (W) bzw. 138 (Z)  $\mu S/cm$  und die alkalische Phosphatase um bis zu 348 (W) bzw. 411 (Z)  $\mu g/p-NP \text{ g TS} \times h$  durch die BKS-Applikation an.

Tabelle 32: Chemische Kennwerte der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1)

Parameter	pH	$KAK_{pot}$ [ $cmol_c/kg$ ]	BS <sup>1)</sup> [%]	elektr. LF [ $\mu S/cm$ ]	alkal. Phosph. [ $\mu g/p-NP \text{ g TS} \times h$ ]
Welzow (W)					
150/90/150	7,4	2,5	100,0	88,0	61,0 <sup>2)</sup>
30 BKS15	7,4	3,0	100,0	87,1	65,0
60 BKS15	7,3	3,5	100,0	105,0	107,7
90 BKS15	7,4	4,1	100,0	112,3	175,3
120 BKS15	7,4	4,8	100,0	134,1	218,3
240 BKS15	7,3	8,8	100,0	213,0	409,0
30 BKS30	7,4	3,2	100,0	94,4	111,3
60 BKS30	7,3	3,9	100,0	89,3	119,7
90 BKS30	7,3	5,0	100,0	108,2	148,0
120 BKS30	7,3	5,8	100,0	118,5	197,3
Zinnitz (Z)					
150/90/150	5,9	5,2	39,9	49,0	93,7 <sup>2)</sup>
30 BKS15	6,2	5,8	82,9	59,5	159,0
60 BKS15	6,5	7,1	100,0	77,4	179,7
90 BKS15	6,8	8,0	100,0	137,1	269,7
120 BKS15	6,9	8,3	94,0	124,2	333,3
240 BKS15	7,0	10,5	84,8	187,1	505,0
30 BKS30	6,3	6,4	100,0	55,7	131,7
60 BKS30	6,5	6,9	94,2	75,2	175,3
90 BKS30	6,7	7,6	100,0	86,7	300,7
120 BKS30	6,8	8,2	100,0	94,3	302,0

<sup>1)</sup> Formel:  $BS = (T\text{-Wert} - H\text{-Wert}) / T\text{-Wert} * 100$ .

<sup>2)</sup> Werte der vergleichbaren Variante 50/90/150

Die in den Abbildungen dargestellten Bodenparameter wurden für die Variante 240 BKS15 und die mineralisch gedüngten Varianten, ausgenommen die Referenzvariante 150/90/150, nur in einfacher Wiederholung bestimmt. Die Unterschiede lassen sich daher nicht statistisch absichern. Aus Gründen der besseren Darstellung sind die untereinander vergleichbaren Werte für die 11 mineralischen Varianten für den Boden Welzow im Anhang 1.1 und für den Boden Zinnitz im Anhang 1.2 angegeben. Die Werte der Variante 240 BKS15 sind zur Vollständigkeit in die Abbildungen integriert. Sie können nur für eine tendenzielle Aussage hinzugezogen werden.

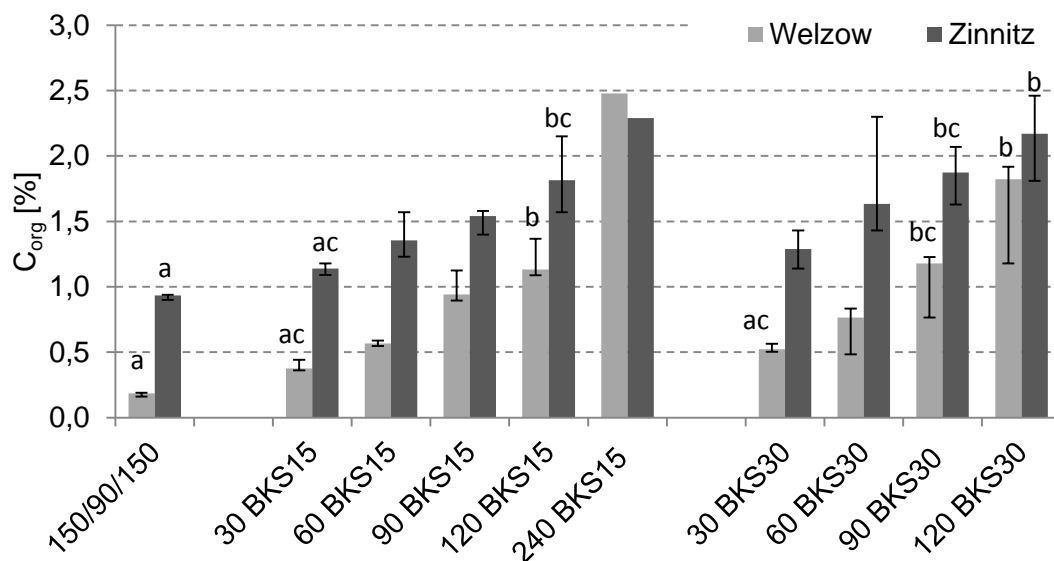


Abbildung 19:  $C_{org}$ -Gehalt der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende ( $n = 4$ , Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; Nemenyi-Test  $p < 0,05$ )

Der Kohlenstoffvorrat in dem gewachsenen Boden Zinnitz liegt generell auf einem höheren Ausgangsniveau gegenüber dem Kipprohboden Welzow. Die stufenweise Applikation von BKS15 und BKS30 führt auf beiden Böden zu ansteigenden  $C_{org}$ -gehalten (Abbildung 19). Die Gabe von 240 t BKS15/ha erhöht den  $C_{org}$ -Gehalt des Kipprohbodens Welzow über das Niveau des Bodens Zinnitz. Das BKS30 wirkt dabei stärker erhöhend auf den  $C_{org}$ -Gehalt im Boden als das BKS15. Dies ist auf die höheren Kohlegehalte in dem BKS30 zurückzuführen. Die Varianten 120 BKS15, 90 BKS30 und 120 BKS30 weisen signifikant höhere  $C_{org}$ -Gehalte in beiden Böden auf als die mineralische Referenzvariante 150/90/150. Die  $C_{org}$ -Gehalte beider Böden sind in der Variante 120 BKS30 signifikant höher als in der Variante 30 BKS15. Zudem ist der  $C_{org}$ -Gehalt der



Variante 120 BKS30 in dem Boden Welzow signifikant höher als in der Variante 30 BKS30.

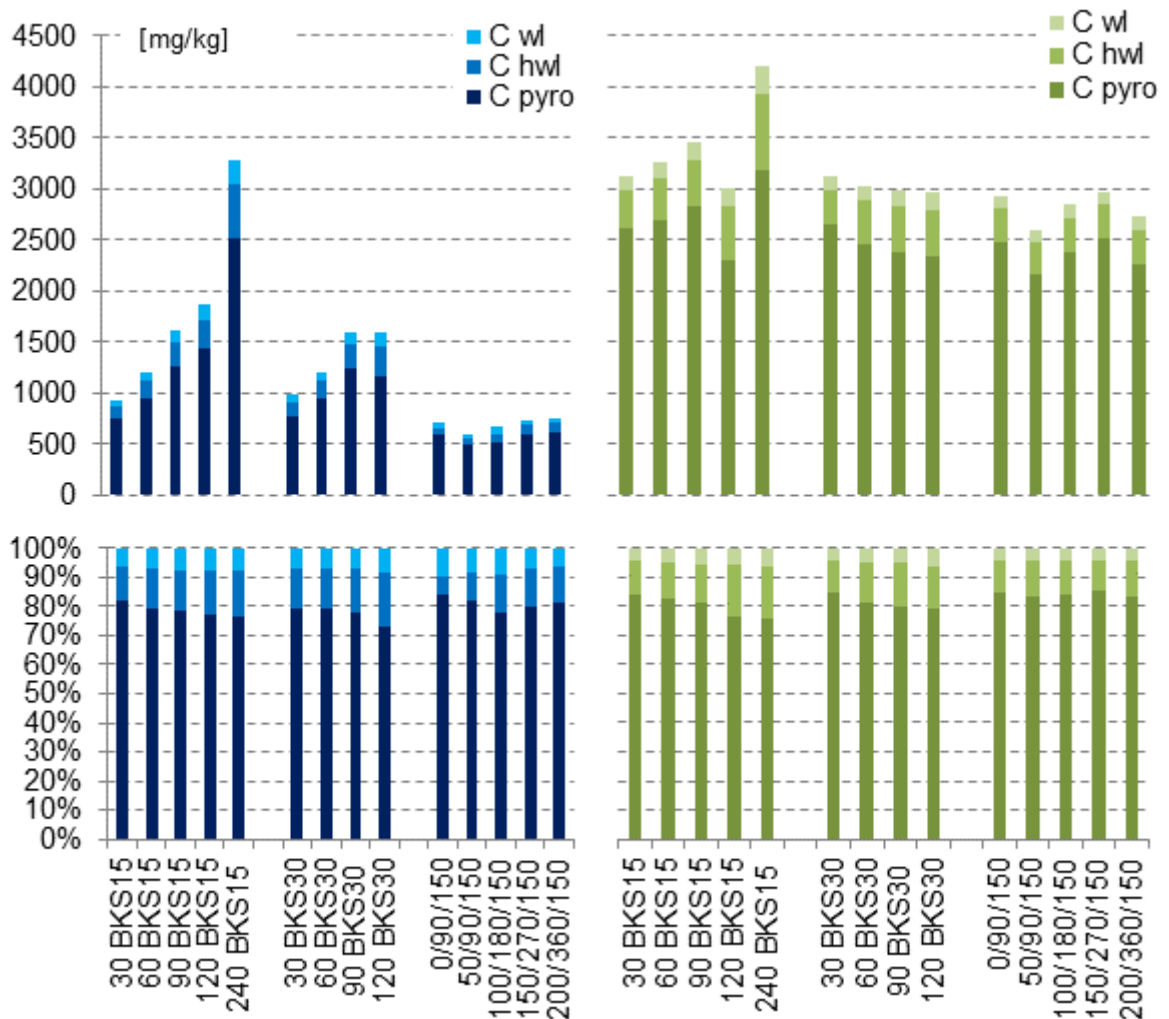


Abbildung 20: Kohlenstofffraktionen der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1; links Welzow, rechts Zinnitz)

Entsprechend dem  $C_{org}$ -Gehalt ist ein Zunahme der C-Gehalte in allen Kohlenstofffraktionen mit steigenden BKS-Gaben zu verzeichnen (Abbildung 20). Die wasser- und heißwasserlöslichen Fraktionen nehmen mit Steigerung der Gabenhöhe kontinuierlich zu. Der im Boden fest gebundene pyrophosphatlösliche Kohlenstoff hat den mengenmäßig größten Anteil an den Kohlenstofffraktionen. Allerdings ist dessen prozentualer Anteil mit Erhöhung der Applikationsmenge zugunsten des heißwasserlöslichen Kohlenstoffs tendenziell rückläufig. Der Anteil des wasserlöslichen Kohlenstoffs ist in allen Varianten vergleichbar. Der Boden Welzow weist nach Schulz (1997) geringe Gehalte an  $C_{hwl}$  auf, die durch die BKS-Applikation deutlich angehoben werden (Abbildung 20). Mit einer Gabe von 120 t/ha BKS15 bzw. BKS30 wird der anzustrebende Bereich von 250-300 mg/kg erreicht (Schulz, 1997). Der  $C_{hwl}$ -Gehalt des Bodens Zinnitz ist bereits

nach Schulz (1997) als hoch einzuordnen und wird durch die BKS-Applikation weiter erhöht.

Die  $N_T$ -Gehalte steigen durch die BKS-Applikation auf beiden Böden zum Teil signifikant über das Niveau der mineralischen Referenz an (Abbildung 21). Diese Steigerung ist auf dem Kipprohdboden Welzow deutlicher als auf dem gewachsenen Boden Zinnitz. Auch werden die  $N_T$ -Gehalte stärker durch das BKS15 angehoben als durch das BKS30, da die N-Fracht mit dem BKS15 höher ist. Die mineralische Referenzvariante 150/90/150 weist signifikant geringere  $N_T$ -Gehalte in dem Boden Welzow auf als die Varianten 90 BKS15, 120 BKS15 und 120 BKS30. Zudem ist der  $N_T$ -Gehalt der Variante 120 BKS15 signifikant höher als der  $N_T$ -Gehalt der Varianten 30 BKS15 und 30 BKS30. In dem Boden Zinnitz liegt der  $N_T$ -Gehalt der mineralischen Referenzvariante 150/90/150 signifikant unter den  $N_T$ -Gehalten der Varianten 120 BKS15, 90 BKS30 und 120 BKS30. Der  $N_T$ -Gehalt der Variante 120 BKS15 ist zudem signifikant höher als der  $N_T$ -Gehalt der Variante 30 BKS15.

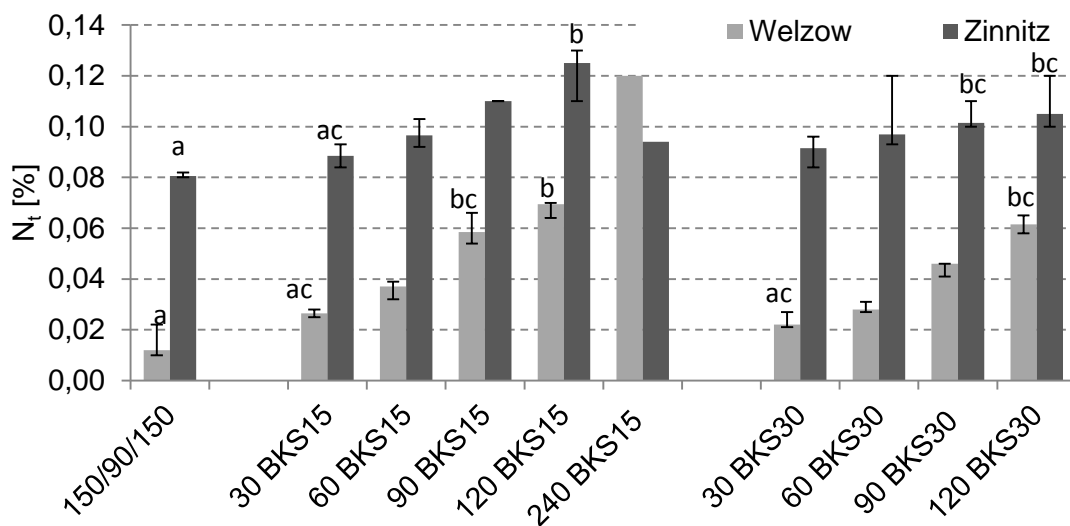


Abbildung 21:  $N_T$ -Gehalt der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; Nemenyi-Test p < 0,05)

Die Wirkung der BKS auf die Stickstofffraktionen ist differenzierter (Abbildung 22). Das BKS15 erhöht auf dem Boden Welzow und Zinnitz die Gehalte an verfügbarem heißwasserlöslichem und fest gebundenem pyrophosphatlöslichem N. Die Applikationsstufe 120 t/ha BKS15 weist auf beiden Böden vergleichsweise geringe pyrophosphatlösliche N-Gehalte auf. Das BKS30 bewirkt in dem Boden Welzow eine etwas geringere Steigerung der summierten N-Gehalte (heißwasserlöslicher und pyrophosphatlöslicher N) als das BKS15. In dem gewachsenen Boden Zinnitz nimmt der Anteil an heißwas-

serlöslichem N mit der Erhöhung der BKS-Gabe zu während der Anteil an pyrophosphatlöslichem N abnimmt. Die N-Gehalte nehmen mit Erhöhung der BKS-Gaben auf diesem Boden ab.

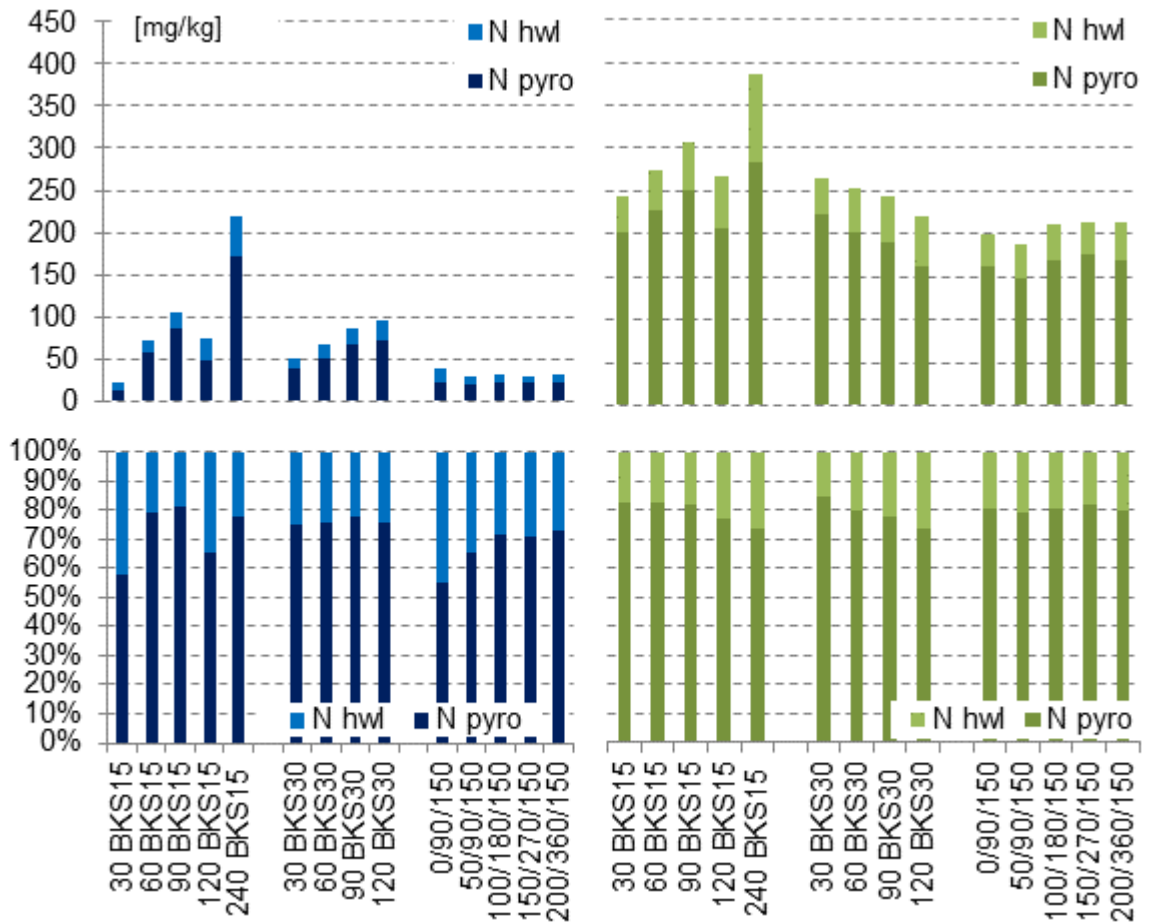


Abbildung 22: Stickstofffraktionen der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1; links Welzow, rechts Zinnitz)

Der Boden Zinnitz weist generell engere C/N-Verhältnisse und einen höheren Gehalt an organischer Bodensubstanz (OBS) auf als der Boden Welzow. Dies ist auf die Pedogenese des Bodens Zinnitz und den damit einhergehenden höheren  $N_T$ -Gehalten zurückzuführen (vgl. Abbildung 21). Die Steigerung der BKS-Applikation führt in beiden Böden zu erweiterten C/N-Verhältnissen und höheren Gehalten der OBS. Die mit BKS30 behandelten Varianten weisen deutlich weitere C/N-Verhältnisse auf als die mit BKS15 behandelten Varianten, was Rückschlüsse auf eine schlechtere N-Verfügbarkeit zulässt (siehe auch Abbildung 21). Nach Bilitewski und Härdtle (2013) ist ein C/N-Verhältnis in der Spanne von 15 bis 20 anzustreben. In dem Boden Welzow ist daher von der Verwendung des BKS30 abzuraten, während es für den Boden Zinnitz

zu empfehlen ist. Die OBS steigt durch die BKS-Applikation um bis zu 2,7 % (W) bzw. 4,2 % (Z) an.

Tabelle 33: C/N-Verhältnisse und Gehalte an organischer Bodensubstanz (OBS) in den Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1)

Variante	Welzow		Zinnitz	
	C/N	OBS [%]	C/N	OBS [%]
150/90/150	15,4	0,8	11,6	2,1
30 BKS15	14,2	1,0	12,9	2,4
60 BKS15	15,4	1,4	14,0	3,0
90 BKS15	16,1	2,0	14,0	3,8
120 BKS15	16,3	2,2	14,5	4,1
240 BKS15	20,7	3,5	14,4	6,3
30 BKS30	23,8	1,4	14,1	2,7
60 BKS30	27,3	1,6	16,9	3,0
90 BKS30	25,6	2,3	18,5	3,6
120 BKS30	29,6	3,0	20,7	4,2

Die Gesamtgehalte der Nährstoffe nehmen schrittweise mit Erhöhung der BKS-Gaben über das Niveau der Mineraldüngervarianten zu (Tabelle 34). Der Kippboden Welzow weist insgesamt ein deutlich höheres Niveau für die Gesamtgehalte von Ca, Mg und K auf als der Ackerboden Zinnitz. Der Ca-Gehalt konnte durch die BKS-Gabe um bis zu 2700 mg/kg in dem Boden Welzow bzw. um bis zu 1300 mg/kg in dem Boden Zinnitz gesteigert werden. Die Na-Gehalte beider Böden sind vergleichbar. Die Gehalte von P und Mn liegen in dem Boden Zinnitz auf einem höheren Niveau als in dem Boden Welzow. Der P-Gehalt steigt mit Erhöhung der BKS-Gaben um bis zu 240 mg/kg (W) bzw. 180 mg/kg (Z) an, während der K-Gehalt um bis zu 660 mg/kg (W) bzw. 680 mg/kg (Z) zunimmt.

Tabelle 34: Gesamtgehalte an Nährstoffen der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (KW-Auszug; n = 1)

Parameter	Ca	Mg	K	Na	P	Mn
	[mg/kg]					
Welzow (W)						
30 BKS15	4130	754	773	51	145	116
60 BKS15	4340	818	885	66	163	121
90 BKS15	5010	853	907	82	190	117
120 BKS15	5320	902	988	90	221	126
240 BKS15	6790	1150	1350	149	364	151
30 BKS30	4290	834	852	51	143	121
60 BKS30	4500	824	871	58	158	119
90 BKS30	5360	931	966	86	182	127
120 BKS30	4430	920	1000	107	195	128
0/90/150	4900	670	706	47	125	99
50/90/150	4980	668	727	47	125	97
100/180/150	4150	748	825	49	161	122
150/270/150	4200	703	698	50	152	112
200/360/150	4620	732	754	50	168	111
Zinnitz (Z)						
30 BKS15	1120	571	442	51	335	179
60 BKS15	1290	619	551	69	352	185
90 BKS15	1580	668	632	76	386	181
120 BKS15	1670	714	768	93	394	185
240 BKS15	2420	882	1060	147	485	193
30 BKS30	1170	579	450	51	330	186
60 BKS30	1430	638	498	65	353	184
90 BKS30	1770	682	583	76	375	182
120 BKS30	1590	698	668	77	354	178
0/90/150	1050	516	383	27	309	171
50/90/150	942	484	382	37	318	169
100/180/150	973	508	383	38	309	165
150/270/150	1020	478	391	35	344	165
200/360/150	1090	487	421	40	354	173

Die  $N_{\min}$ -Vorräte beider Böden zum Versuchsende fallen verhältnismäßig gering aus (Abbildung 23), da den Böden durch den Pflanzenaufwuchs N entzogen wurde. Der Boden Welzow weist nur  $N_{\min}$ -Werte im Bereich von 3 bis 9 kg/ha auf. Die Varianten 30 und 60 BKS15 verzeichnen die geringsten und die Variante 240 BKS15 die höchsten  $N_{\min}$ -Mengen. Die weiteren Varianten haben in etwa das Niveau der mineralischen Referenzvariante 150/90/150. Eine tendenzielle Zunahme der  $N_{\min}$ -Mengen mit der Erhöhung der BKS15-Gaben ist erkennbar. Der gewachsene Boden Zinnitz liegt auf einem etwas höheren Niveau im Bereich von 9 bis 16 kg/ha. Alle BKS-Varianten mit Ausnah-

me der Variante 120 BKS15, weisen einen höheren  $N_{\min}$ -Wert auf als die mineralische Referenz. Mit Erhöhung der BKS-Gabe ist sowohl beim BKS15 als auch beim BKS30 ein Rückgang der  $N_{\min}$ -Mengen zu verzeichnen. Signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten auf den jeweiligen Böden lagen nicht vor.

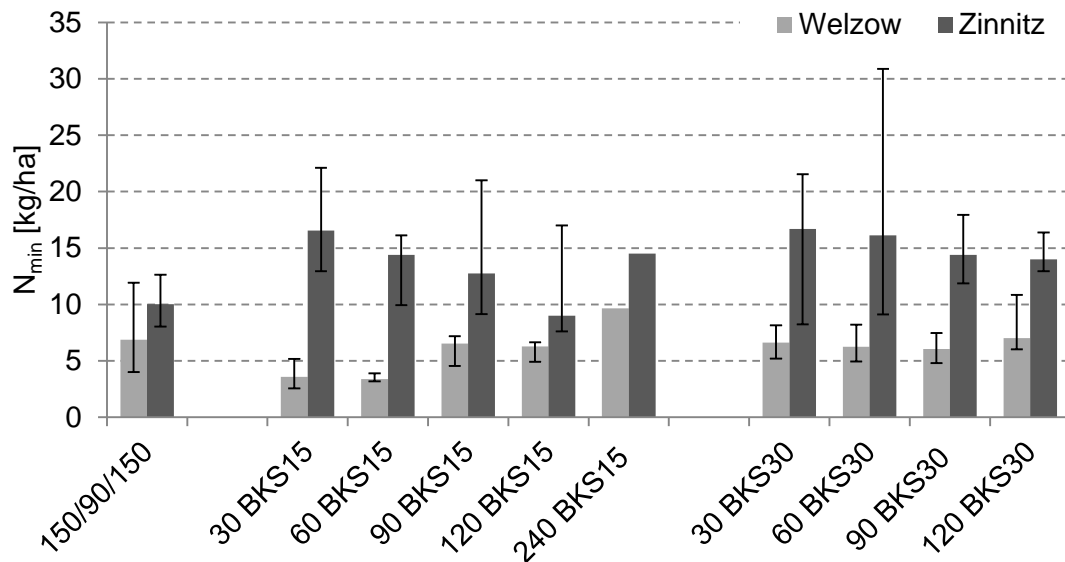


Abbildung 23:  $N_{\min}$ -Werte der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max.)

Die verfügbaren P-Gehalte (Abbildung 24) steigen in beiden Böden mit der Gabe des BKS15 und BKS30 an, wobei die Erhöhung mit dem BKS15 stärker verläuft. Die Applikation von 30 t/ha BKS entspricht in etwa dem Düngäquivalent der mineralischen Referenz. Ab der Düngungsstufe 60 t/ha übertrifft die BKS-Düngung die mineralische Düngung auf beiden Böden. Die optimale Versorgungsstufe C (40 bis 55 mg/kg) nach Von Wulffen et al. (2008) wird auf dem Boden Welzow nur in den Varianten 90 BKS15 und 120 BKS30 erreicht. Die Düngungsstufen mit geringerer BKS-Ausbringungsmenge sind nach Von Wulffen et al. (2008) als unterversorgt (Versorgungsstufe A und B) einzuordnen. Die Varianten 120 und 240 BKS15 weisen eine deutliche Überversorgung mit P (Versorgungsstufe D bzw. E) auf. Auf dem gewachsenen Boden liegen die  $P_{DL}$ -Werte der Varianten 60 BKS15, 60 BKS30, 90 BKS30 und 120 BKS30 in der optimalen Versorgungsstufe C (56 bis 80 mg/kg) nach Von Wulffen et al. (2008). Eine Unterversorgung (Stufe B) liegt nur bei der mineralischen Referenz und BKS-Varianten mit einer Gabenhöhe von 30 t/ha vor. Die Varianten 90 und 120 BKS15 (D) sowie 240 BKS15 (E) weisen eine Überversorgung auf. Die signifikanten Unterschiede sind in der Abbildung 24 durch unterschiedliche Kleinbuchstaben kenntlich gemacht. Der  $P_{DL}$ -

Gehalt der Variante 120 BKS15 in dem Boden Welzow ist signifikant höher als die  $P_{DL}$ -Gehalte der Varianten 150/90/150, 30 BKS30 und 60 BKS30. Der  $P_{DL}$ -Gehalt der Variante 120 BKS15 in dem Boden Zinnitz liegt signifikant über den  $P_{DL}$ -Gehalten der Varianten 150/90/150, 30 BKS15 und 30 BKS30. Darüber hinaus sind die  $P_{DL}$ -Gehalte der Varianten 150/90/150 und 30 BKS30 in beiden Böden signifikant geringer als der  $P_{DL}$ -Gehalte der Variante 90 BKS15.

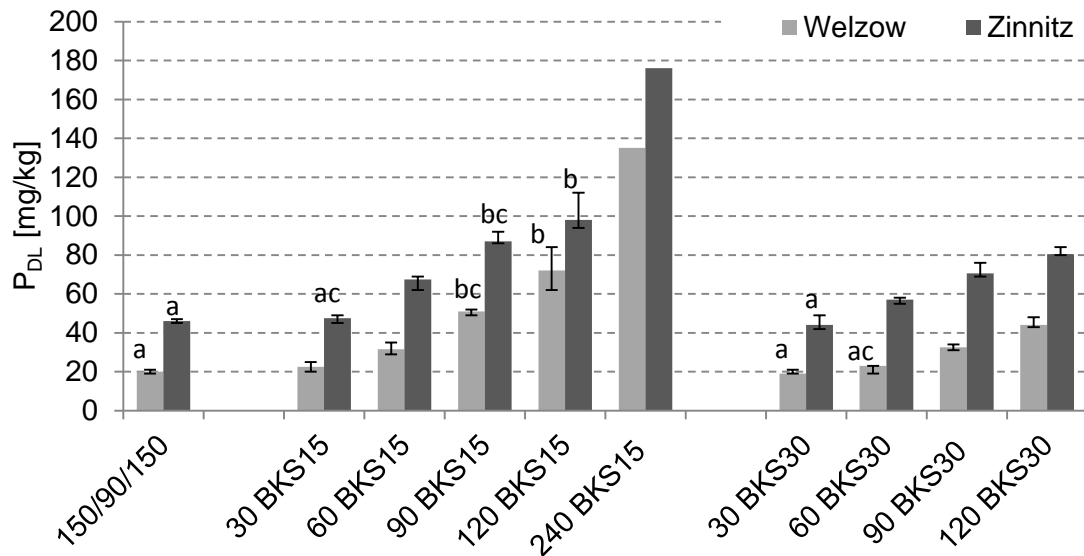


Abbildung 24:  $P_{DL}$ -Gehalte der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende ( $n = 4$ , Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; Nemenyi-Test  $p < 0,05$ )

Wie in Abbildung 25 deutlich wird, steigen die  $K_{DL}$ -Gehalte mit Erhöhung der BKS-Ausbringungsmenge in beiden Böden an. Die  $K_{DL}$ -Gehalte nehmen in beiden Böden mit dem BKS15 stärker zu als mit dem BKS30. Die mineralische Referenz beider Böden ist stark unterversorgt und damit in die Versorgungsstufe A einzuordnen (Von Wulffen et al., 2008). Eine Unterversorgung mit K tritt auf dem Boden Welzow bei den geringeren BKS-Applikation auf: Versorgungsstufe A (30 BKS15) bzw. B (60 BKS15, 30 und 60 BKS30). Die optimale Versorgungsstufe C (80 bis 110 mg/kg) auf dem Boden Welzow erreichen die Varianten 90 BKS15 und 90 BKS30. Alle höheren Düngungsstufen sind als überversorgt in die Stufe D (120 BKS15 und BKS30) bzw. E (240 BKS15) einzuordnen. Der gewachsene Boden Zinnitz hat ein deutlich höheres Ausgangsniveau für die K-Versorgung, so dass hier nur die 30 BKS15 und 30 BKS30 in die Versorgungsstufe B nach Von Wulffen et al. (2008) fallen. Die optimale Versorgungsstufe C (80 bis 110 mg/kg) wird von allen anderen Varianten übertroffen. Die Varianten 60

BKS15, 60 und 90 BKS30 sind in die Versorgungsstufe D einzuordnen. Alle weiteren Varianten liegen im Versorgungsbereich der Stufe E. Insbesondere die Varianten 120 BKS15 und 240 BKS15 gelten als extrem überversorgt.

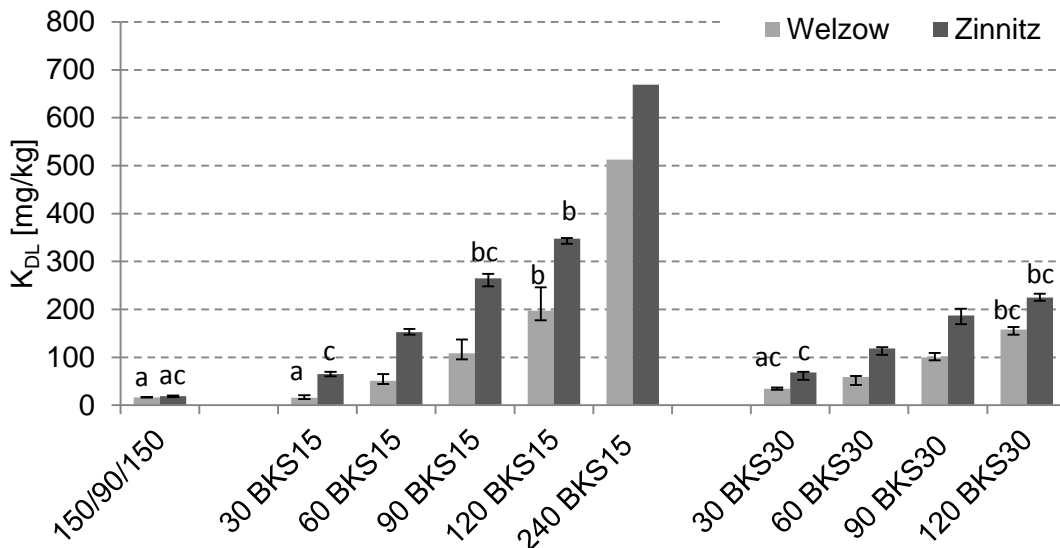


Abbildung 25:  $K_{DL}$ -Gehalte der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; Nemenyi-Test  $p < 0,05$ )

Die  $K_{DL}$ -Gehalte der Variante 120 BKS15 in dem Boden Welzow liegt signifikant über dem  $K_{DL}$ -Gehalt der mineralischen Referenzvariante 150/90/150 sowie der Varianten 30 BKS15 und 30 BKS30. Auch der  $K_{DL}$ -Gehalte der Variante 120 BKS30 weist ein signifikant höheres Niveau gegenüber den Varianten 150/90/150 und 30 BKS15 auf. Die  $K_{DL}$ -Gehalte der Varianten 90 BKS15, 120 BKS15 und 120 BKS30 in dem Boden Zinnitz liegen signifikant über dem  $K_{DL}$ -Gehalt der mineralischen Referenzvariante 150/90/150. Die  $K_{DL}$ -Gehalte der Varianten 30 BKS15, 30 BKS30 sind signifikant geringer als der  $K_{DL}$ -Gehalt der Varianten 120 BKS15.

Das pflanzenverfügbare Magnesium ( $Mg_{PV}$ ) wird durch die BKS-Gaben erhöht (Abbildung 26). Der Boden Welzow ist in der mineralischen Referenzvariante 150/90/150 nach Von Wulffen et al. (2008) mit  $Mg_{PV}$  unterversorgt. Durch die BKS-Gaben erfolgt eine stufenweise Erhöhung der  $Mg_{PV}$ -Vorräte im Boden bis zur optimalen Versorgungsstufe C bzw. im Fall der Variante 240 BKS15 E. Der gewachsene Boden Zinnitz weist bereits in der mineralischen Referenzvariante 150/90/150 eine Überversorgung mit  $Mg_{PV}$  auf. Entsprechend bewirkt hier die Applikation der BKS eine weitere



Erhöhung der  $Mg_{PV}$ -Vorräte im Boden, so dass alle BKS-Varianten auf dem Boden Zinnitz in der Versorgungsstufe E einzuordnen sind.

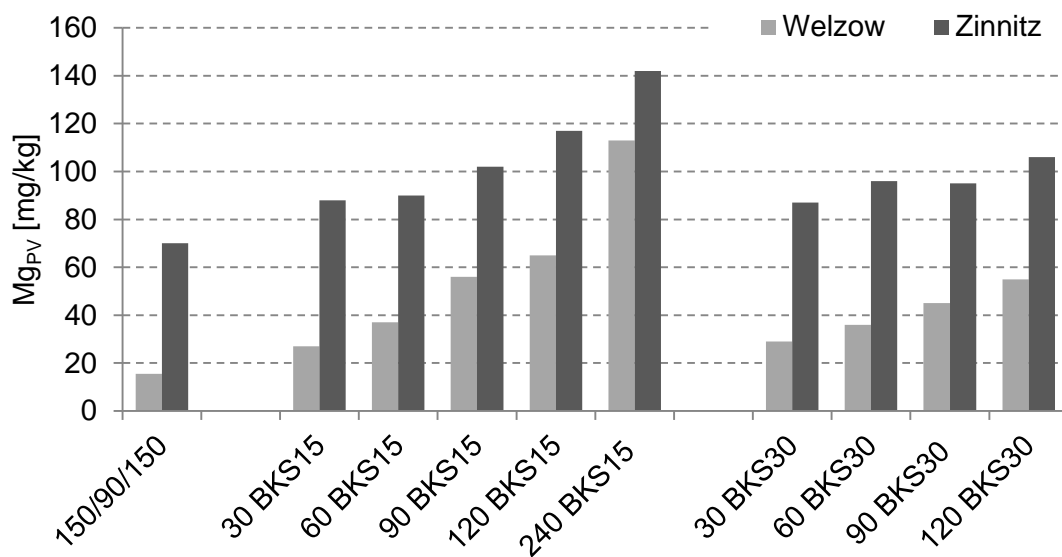


Abbildung 26:  $Mg_{PV}$ -Gehalte der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1)

Der Boden Welzow und der Boden Zinnitz weisen vergleichbare Schwermetallgehalte auf (Tabelle 35). Der Boden Zinnitz zeigt in allen Varianten geringere Ni-Gehalte und höhere Pb-Gehalte als der Boden Welzow. Der Zn-Gehalt nimmt kontinuierlich mit Erhöhung der BKS-Gaben um bis zu 12 mg/kg (W) bzw. 9 mg/kg (Z) im Vergleich zu den mineralisch gedüngten Varianten zu. Die nicht praxistaugliche Aufwandmenge von 240 t/ha BKS15 führt zu einem Ni-Gehalt in dem Boden Welzow, der den Hintergrundwert des 90. Perzentils (LABO, 2017) um 0,4 mg/kg überschreitet. Die Werte für Cadmium (Cd) liegen in allen Varianten unterhalb der Nachweisgrenze von 0,1 mg/kg und sind daher nicht dargestellt. Die BKS-Gaben haben keinen Einfluss auf die Pb- und Cd-Gehalte der beiden Böden. Die ermittelten Schwermetallgehalte halten die Vorsorgewerte der BBodSchV (1999) und die Hintergrundwerte der LABO (2017) ein.

Tabelle 35: Gesamtgehalte an Schwermetallen der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (KW-Auszug; n = 1)

Parameter <sup>1)</sup>	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb
	[mg/kg]				
Welzow (W)					
30 BKS15	3,6	13,6	4,5	6,8	4,6
60 BKS15	3,9	15,0	4,8	7,0	4,8
90 BKS15	4,1	15,6	4,5	6,3	4,8
120 BKS15	4,4	18,2	4,9	7,0	4,8
240 BKS15	5,5	22,7	5,6	7,1	6,6
30 BKS30	4,2	14,2	4,7	6,9	4,9
60 BKS30	4,2	14,8	4,6	6,8	4,5
90 BKS30	4,5	16,2	4,7	6,6	4,5
120 BKS30	4,7	16,7	4,7	6,7	4,5
0/90/150	3,2	10,6	3,6	5,4	3,9
50/90/150	3,4	11,3	3,6	5,5	4,0
100/180/150	3,9	13,5	4,6	7,1	4,7
150/270/150	3,2	11,5	4,3	6,3	4,4
200/360/150	3,6	11,8	4,2	6,3	4,3
Zinnitz (Z)					
30 BKS15	4,9	15,9	0,5	5,6	12,3
60 BKS15	5,4	16,9	0,7	5,8	12,2
90 BKS15	5,4	18,3	1,1	6,2	12,5
120 BKS15	6,4	20,1	1,2	6,2	12,3
240 BKS15	6,4	23,1	1,7	6,6	12,4
30 BKS30	5,2	17,7	0,6	5,8	12,7
60 BKS30	5,3	16,9	0,9	5,8	16,4
90 BKS30	5,4	18,5	0,8	5,9	12,0
120 BKS30	5,2	18,2	2,8	6,0	12,0
0/90/150	4,9	14,4	2,2	5,8	13,7
50/90/150	4,9	14,2	2,1	5,6	12,5
100/180/150	4,8	13,8	2,1	5,8	12,0
150/270/150	4,6	13,7	2,1	5,8	12,4
200/360/150	5,2	14	2,1	5,7	12,0
Hintergrundwerte <sup>2)</sup>	4 (8)	19 (32)	2,7 (5,2)	5 (10)	14 (33)
Vorsorgewerte <sup>3)</sup>	20 (14)	60 (42)	15 (10,5)	30 (21)	40 (28)
Grenzwerte <sup>4)</sup>	100 (70)	400 (300)	50 (35)	100 (70)	150 (100)

<sup>1)</sup> Cd unterhalb der Nachweisgrenze von 0,1 mg/kg in allen geprüften Varianten

<sup>2)</sup> Hintergrundwerte für das Land Brandenburg, Angabe des 50. Perzentils (90. Perzentils), Ausgangssubstrat: Sand, Oberboden Acker (LABO, 2017).

<sup>3)</sup> Vorsorgewerte zum Schutz der Bodenfunktionen, Bodenart Sand, (bei landwirtschaftlicher Nutzung: 70% der Vorsorgewerte, § 12 Abs. 4 BBodSchV (1999).

<sup>4)</sup> Aufbringungsgrenzwerte gemäß § 4 Abs. 3 (gemäß § 6 Abs. 1 Satz 2) BioAbfV (2012).

## 4.1.2 Pflanzenaufwuchs

### 4.1.2.1 Entwicklung des Pflanzenaufwuchses

Die pflanzliche Biomasse wurde zweimal in dem Versuchszeitraum Mai 2011 bis Mai 2012 geerntet. Zum ersten Erntetermin ist das Knautgras der mineralisch gedüngten Varianten auf dem Boden Welzow und aller Düngevarianten auf dem Boden Zinnitz im Mittel in das BBCH-Stadium 31 - 41 einzuordnen (Tabelle 36). Einzelne Pflanzen beginnen bereits eine Rispe zu schieben (BBCH-Stadium 51).

Tabelle 36: Pflanzenentwicklung zu den Ernteterminen (BBCH-Stadium, Min./Max.)

Varianten	BBCH-Stadium zur Ernte					
	Welzow			Zinnitz		
	1. Schnitt	Nachsaat	2. Schnitt	1. Schnitt	Nachsaat	2. Schnitt
30 BKS15	23/24	11	30/31	32/41	12/13	30/31
60 BKS15	23/31	11	30/31	31/41	12/13	30/31
90 BKS15	23/24	11	30/31	32/41	12/13	30/31
120 BKS15	23/24	11	30/31	31/41	12/13	30/31
240 BKS15	23/24	11	30/31	31/41	12/13	30/31
30 BKS30	22/23	11	30/31	31/42	12/13	30/31
60 BKS30	23/24	11	30/31	31/41	12/13	30/31
90 BKS30	23/25	11	30/31	31/41	12/13	30/31
120 BKS30	23/24	11	30/31	32/41	12/13	30/31
0/90/150	21/23	11	30/31	31 (51)	12/13	30/31
50/90/150	23/24	11	30/31	31/32	12/13	30/31
100/90/150	23/31	11	30/31	32	12/13	30/31
150/90/150	24/41	11	30/31	32	12/13	30/31
200/90/150	31/41	11	30/31	32 (51)	12/13	30/31
400/90/150	31/41	11	30/31	31/41	12/13	30/31
150/0/150	31/42	11	30/31	33/41 (51)	12/13	30/31
150/60/150	31/42	11	30/31	33/41	12/13	30/31
150/180/150	32/41	11	30/31	33/41 (51)	12/13	30/31
150/270/150	32/41	11	30/31	33/41	12/13	30/31
100/180/150	31	11	30/31	33/51	12/13	30/31
200/360/150	31/41	11	30/31	33/51	12/13	30/31

Das Knautgras in den Varianten 30 BKS15 bis 240 BKS15 sowie 30 BKS30 bis 120 BKS30 und die Varianten 0/90/150, 50/90/150 und 100/90/150 auf dem Boden Welzow sind nicht so weit entwickelt. Sie befinden sich im Mittel im BBCH-Stadium 23/24. Die im Juli nachgesäten Pflanzen sind insgesamt schwächer entwickelt und hatten im Mittel das BBCH-Stadium 12/13 auf dem Boden Zinnitz und BBCH 11 auf dem Boden

Welzow. Zum zweiten Erntetermin ist die Entwicklung der Pflanzen homogen und liegt im Mittel auf beiden Böden im Bereich des Schossens (BBCH-Stadium 30/31).

#### 4.1.2.2 Erträge

Die Erträge des Pflanzenaufwuchses (Abbildung 27) aller BKS15- und BKS30-Varianten zum ersten Erntetermin auf dem Boden Welzow liegen in etwa auf dem Niveau der Varianten mit keiner (0/50/90) bzw. reduzierter (50/90/150) Stickstoffdüngung. Das Ertragsniveau der BKS im ersten Schnitt liegt, wie in Abbildung 27 ersichtlich, in den Varianten 30 BKS15, 30 BKS30 und 60 BKS30 signifikant unterhalb des Ertragsniveaus der Variante 400/90/150 (erstere auch geringer als Variante 200/90/150). Anhand der Varianten mit der gesteigerten Stickstoffdüngung zeigt sich ein deutlicher treppenförmiger Anstieg mit Erhöhung der N-Gabe (Abbildung 27). Beispielsweise weist die Variante 0/90/150 signifikant geringere Erträge auf als die Varianten 200/90/150 und 400/90/150 der N-Steigerungsreihe (Anhang 1.3).

Die Varianten der gesteigerten Phosphordüngung liegen in etwa auf einem Ertragsniveau und weisen nur geringe Schwankungen auf. Die parallele Steigerung der N- und P-Gaben war ertragsrelevant.

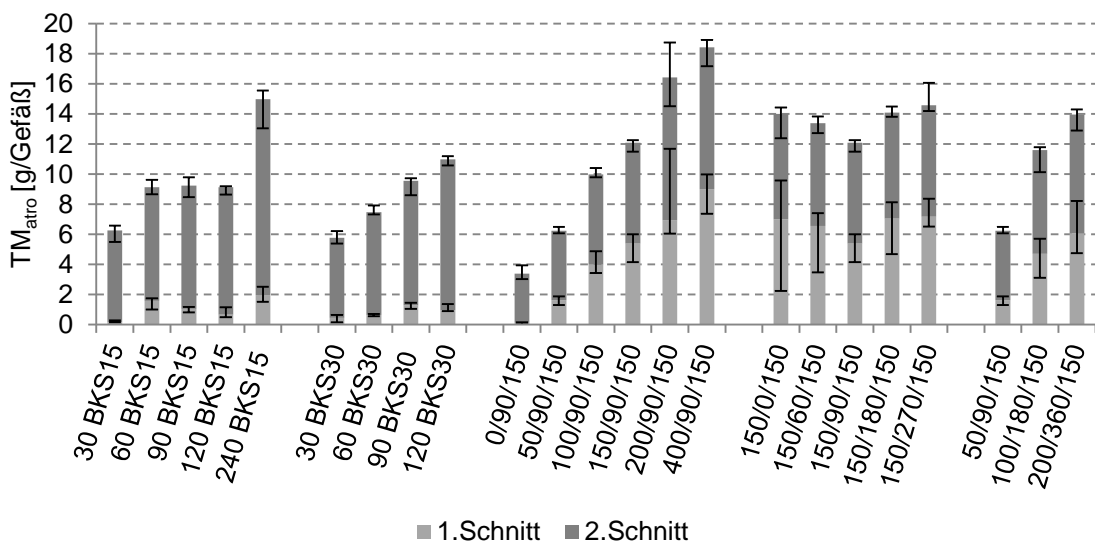


Abbildung 27: Knautgraserträge (TM<sub>astro</sub>) des ersten und zweiten Schnittes auf dem Boden Welzow (BKS [t/ha], Mineraldünger N/P/K [kg/ha]; Median, Min., Max., n = 4)

Nach einer einmaligen Gabe von 100 kg N/ha im April 2012 zu allen Varianten liegen die Erträge der Varianten 30 BKS15 und 30 BKS30 zum zweiten Erntetermin auf dem Niveau der Variante 100/90/150 (Abbildung 27). Eine höhere BKS-Applikation zum Versuchsbeginn wirkt sich beim zweiten Schnitt, insbesondere für die BKS30-

Varianten, ertragssteigernd aus. In den BKS15-Varianten ist dieser Effekt nur tendenziell erkennbar, insbesondere die Variante 240 BKS15 weist einen deutlichen Ertragszuwachs auf. Die Variante 240 BKS15 erreicht und übertrifft als einzige BKS-Variante den Ertrag der Referenz 150/90/150 zum zweiten Erntetermin (um 94 %). Die Erträge der mineralischen Steigerungsreihen verhalten sich analog zum ersten Erntetermin. Lediglich das Ertragsniveau ist tendenziell erhöht. Anhang 1.3 zeigt die signifikanten Unterschiede zwischen der Variante 240 BKS15 und den Varianten 30 BKS15, 30 BKS30, 0/90/150, 50/90/150 und 100/90/150. Im Weiteren weist die Variante 120 BKS30 einen signifikanten Mehrertrag gegenüber den Varianten 30 BKS30, 0/90/150 und 50/90/150 auf. Die Erträge der Varianten 0/90/150 und 50/90/150 waren signifikant niedriger als die Erträge der Varianten 200/90/150 und 400/90/150.

In der Summe der Erträge über beide Erntetermine übertrifft die Variante 240 BKS15 die Referenzvariante 150/90/150 um 21 %. Die Variante 120 BKS30 erreicht tendenziell das Niveau der Referenzvariante. Die BKS-Varianten mit geringeren Applikationsmengen bleiben zum Teil deutlich unter dem Niveau der Referenzvariante. Die höchsten Erträge werden mit den höchsten N-Gaben der Varianten 200/90/150 und 400/90/150 erzielt (144 % bzw. 148 % der Referenzvariante). Auch liegen die Varianten der P-Steigerungsreihen auf dem Niveau bzw. tendenziell höher als die Referenzvariante. Die N- und P-Steigerungsreihe erreicht in den Varianten 100/180/150 und 200/360/150 das Niveau der Referenzvariante. Anhang 1.3 zeigt die signifikant geringeren Erträge der Varianten 30 BKS15, 30 BKS30, 0/90/150 und 50/90/150 gegenüber den Varianten 200/90/150 und 400/90/150. Zudem weist auch die Variante 60 BKS30 gegenüber der Variante 400/90/150 einen signifikanten Minderertrag auf. Der Ertrag der Variante 0/90/150 hat in der Summe der Schnitte zudem auch einen signifikant geringeren Ertrag als die Variante 150/270/150. Die Variante 240 BKS15 weist einen signifikanten Mehrertrag gegenüber der Variante 0/90/150 auf.

In Abbildung 28 ist der Ertrag des Knautgrases auf dem Boden Zinnitz dargestellt. Auffällig ist, dass die Erträge insgesamt auf einem deutlich höheren Niveau liegen als die des Kipprohbodens Welzow. Zum ersten Erntetermin weisen die BKS15- und BKS30-Varianten den höchsten Ertrag in der Variante mit der 30 t/ha BKS-Gabe auf. Mit Steigerung der BKS-Applikation nehmen die Erträge tendenziell ab. Die Erträge der BKS30-Varianten erreichen in etwa nur 50 % des Ertrages im Vergleich zu der entsprechenden BKS15-Variante. Die Steigerung der Stickstoffdüngung wird lediglich bis zur Referenzvariante 150/90/150 ertragswirksam. Eine weitere Steigerung der N-Düngung bis auf 400 kg N/ha bewirkt einen Ertragsrückgang. Die Steigerung der Phosphordüngung zeigt keine Auswirkungen auf den Ertrag. Die Ertragshöhe ist über alle Varianten der P-Steigerung nahezu identisch mit dem Ertrag der Referenzvariante.

Eine parallele Erhöhung der N- und P-Düngung bewirkt eine Ertragszunahme bis auf das Niveau der Referenzvariante.

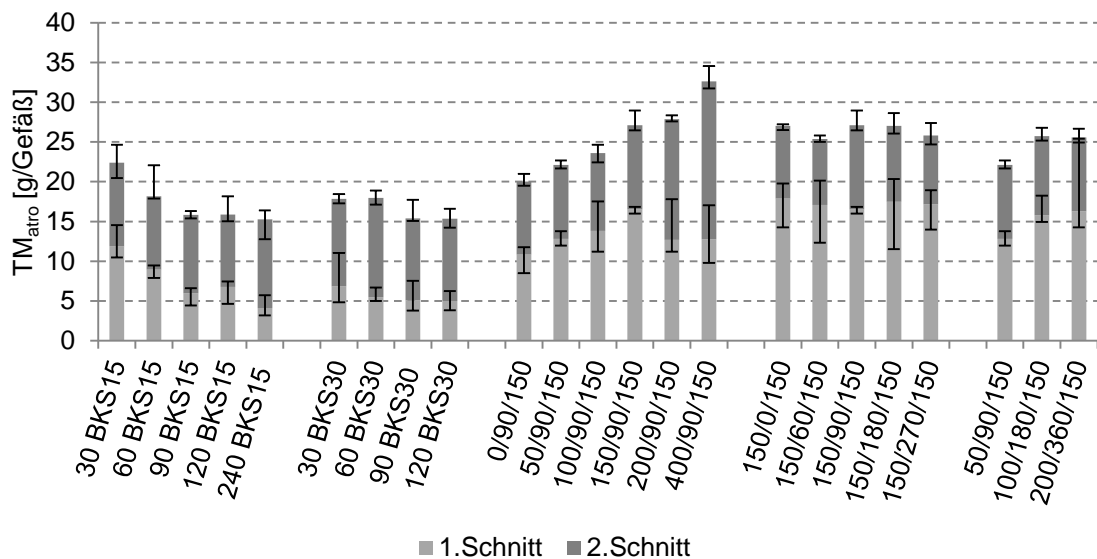


Abbildung 28: Knaulgraserträge des ersten und zweiten Schnittes auf dem Boden Zinnitz (BKS [t/ha], Mineraldünger N/P/K [kg/ha]; Median, Min., Max., n = 4)

Signifikante Unterschiede zum ersten Erntetermin liegen zwischen der Variante 240 BKS15 und den Varianten 150/0/150 und 150/270/150 (Anhang 1.4) vor. Zum zweiten Erntetermin, nach einer einmaligen Gabe von 100 kg N/ha zu allen Varianten, erzielen die BKS15- und BKS30-Varianten das Ertragsniveau der Referenzvariante. Die Varianten 240 BKS15 und 60 BKS30 weisen einen tendenziell höheren Ertrag auf als die Referenzvariante. Die Varianten mit gesteigerter N-Düngung (von 0 bis 150 kg N/ha) weisen ein vergleichbares Ertragsniveau im Bereich von 9,3 bis 10,8 g/Gefäß TM<sub>atro</sub> auf. In den Varianten 200/90/150 und insbesondere 400/90/150 werden die höchsten Erträge erzielt. Die Steigerung der Phosphordüngung sowie die parallele Steigerung der N- und P-Gaben zeigen eindeutige Auswirkungen auf den Ertrag. In Anhang 1.4 sind die signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten dargestellt. Die Variante 60 BKS30 weist einen signifikanten Mehrertrag gegenüber der Variante 150/60/150 auf. Im Weiteren liegen signifikante Mehrerträge der Variante 200/90/150 gegenüber der Variante 150/60/150 sowie zwischen der Variante 400/90/150 gegenüber den Varianten 150/60/150 und 150/270/150 vor.

In der Summe beider Schnitte ist ein tendenzieller Ertragsrückgang von den BKS-Varianten mit 30 t/ha bis zu den höchsten BKS-Gaben von 240 t/ha (BKS15) bzw. 120 t/ha (BKS30) zu verzeichnen (Abbildung 28). Die Erträge aller BKS-Varianten liegen deutlich unter dem Ertragsniveau der Referenzvariante.

Mit Erhöhung der mineralischen N-Düngung nimmt der Ertrag in der N-

Steigerungsvariante kontinuierlich zu. Die Referenzvariante 150/90/150 und die Variante 200/90/150 erreichen ein vergleichbares Ertragsniveau. Die Variante 400/90/150 erzielt den höchsten Ertrag. Die Varianten der P- sowie der N- und P-Steigerungsreihe haben ein vergleichbares Ertragsniveau, lediglich die Variante 50/90/150 fällt etwas ab. In der Summe der Erträge liegt ein signifikanter Mehrertrag der Variante 400/90/150 gegenüber den Varianten 90 BKS15, 120 BKS15, 240 BKS15, 90 BKS30 und 120 BKS30 vor (Anhang 1.4).

#### 4.1.2.3 N-Mineraldüngeräquivalente

Zur Ableitung N-Mineraldüngeräquivalente für die eingesetzten BKS sind in Abbildung 29 die summierten Trockenmasseerträge auf dem Boden Welzow gegen die Gesamt-N-Düngung abgetragen. Das Ertragsmaximum der mineralisch gedüngten Varianten liegt bei einer N-Gesamtgabe von 380 kg N<sub>t</sub>/ha. Die Ertragsniveaus der BKS sind trotz deutlich höherer N-Gesamtgaben insgesamt wesentlich niedriger als bei den mineralisch gedüngten Varianten. Der Grasaufwuchs auf dem Kippboden Welzow ist zudem geringer als auf dem Ackerboden Zinnitz (vgl.

Abbildung 30). Die N-Mineraldüngeräquivalente liegen in der Summe beider Ernten unter 10 % des in den BKS enthaltenen Gesamt-N (1,34 in BKS15 bzw. 1,14 M.-% in BKS30). Die Erträge können durch die BKS-Gaben nur schwach gesteigert werden. Der Anstieg der Ertragsgeraden durch das BKS15 ist etwas flacher als bei dem BKS30.

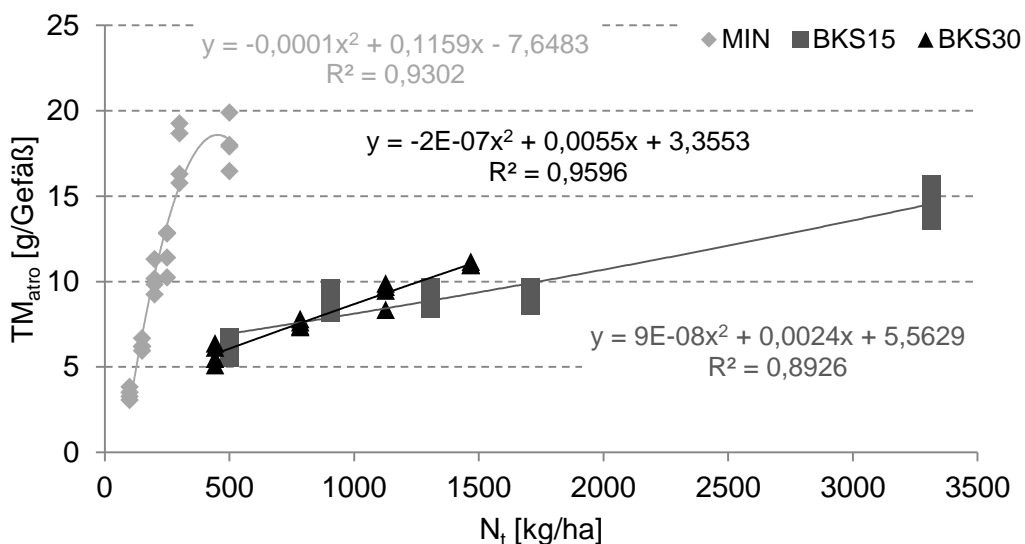


Abbildung 29: Summierte Trockenmasseerträge in Abhängigkeit der Gesamt-N-Gaben auf dem Boden Welzow (MIN = Mineraldünger)

Zur Ableitung N-Mineraldüngeräquivalente für die eingesetzten BKS sind in Abbildung 30 die summierten Trockenmasseerträge auf dem Boden Zinnitz gegen die Gesamt-N-Düngung abgetragen. Das Ertragsmaximum der mineralisch gedüngten Varianten liegt bei einer N-Gesamtgabe von 400 kg N<sub>t</sub>/ha. Die Ertragsniveaus der BKS sind trotz deutlich höherer N-Gesamtgaben insgesamt wesentlich niedriger als bei den mineralisch gedüngten Varianten. Der Grasaufwuchs auf dem Ackerboden Zinnitz ist zudem höher als auf dem Kippboden Welzow (vgl. Abbildung 29). Die N-Mineraldüngeräquivalente liegen in der Summe beider Ernten unter 10 % des in den BKS enthaltenen Gesamt-N (1,34 in BKS15 bzw. 1,14 M.-% in BKS30). Die Erträge nehmen bei der Erhöhung der BKS-Gaben kontinuierlich ab. Der Ertragsrückgang verläuft bei der Düngung mit dem BKS15 steiler als mit dem BKS30.

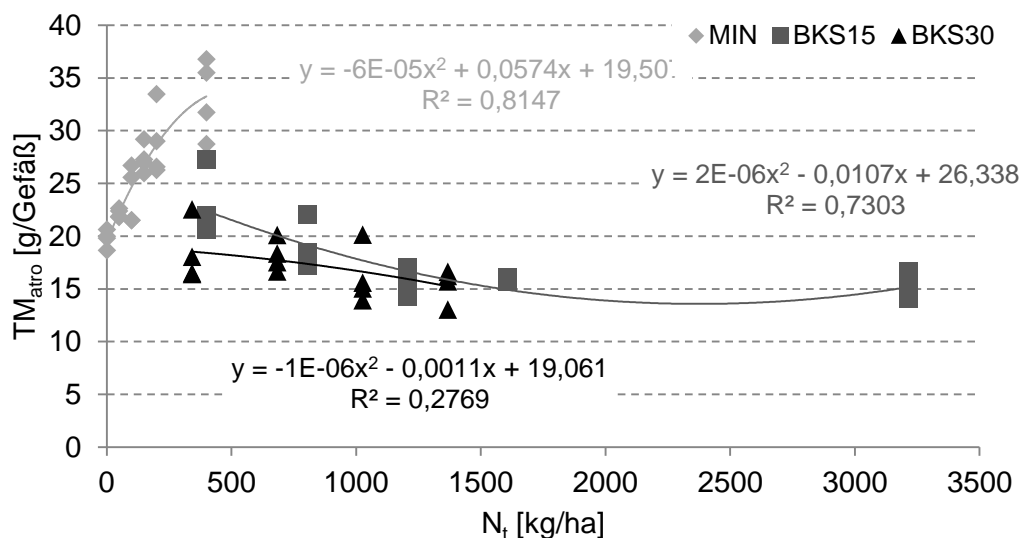


Abbildung 30: Summierte Trockenmasseerträge in Abhängigkeit der Gesamt-N-Gaben auf dem Boden Zinnitz (MIN = Mineraldünger)

#### 4.1.2.4 Gehalte und Entzüge der Makronährstoffe N, P und K mit dem Pflanzenaufwuchs

##### 4.1.2.4.1 Welzow

Die Bestimmung der Mineralstoffgehalte des Ernteguts erfolgte für jedes Gefäß (n = 4). Aufgrund von Materialmangel konnte zum ersten Erntetermin für die Varianten 30 BKS15 und 0/90/150 auf dem Boden Welzow nur eine Einfachbestimmung (n = 1) durchgeführt werden. Die in Abbildung 31 dargestellten **N-Gehalte** im Pflanzenaufwuchs des ersten Schnittes liegen zwischen 9,3 und 28,8 g/kg TS, damit liegen alle Varianten (ausgenommen Variante 400/90/150) deutlich unter den empfohlenen Ge-



halten (2,8 - 4,0 % TM) für Knaulgras von Bergmann (1983). Allerdings gilt diese Empfehlung für den Blühbeginn (BBCH 61). Die Ernte erfolgte im Mittel bei BBCH 23/24 (s. Kapitel 4.1.2). Es ist davon auszugehen, dass mit fortschreitender Entwicklung die Gehalte im Aufwuchs abnehmen, so dass auch bei längerem Wachstum das Erreichen einer optimalen Versorgung nicht zu erwarten ist. Eine weitere Einordnung ist nach Von Wulffen et al. (2008) möglich, der für Wiesengräser zum Rispenschieben (BBCH 51) einen Wert von 2,0 - 3,5 % in der TS empfiehlt. Lediglich die Variante 400/90/150 liegt innerhalb dieser Wertspanne. In den Varianten mit den BKS15 und BKS30 sowie bei einer Steigerung der N-Düngung ist eine tendenzielle Zunahme der N-Gehalte bei Erhöhung der Düngung zu verzeichnen.

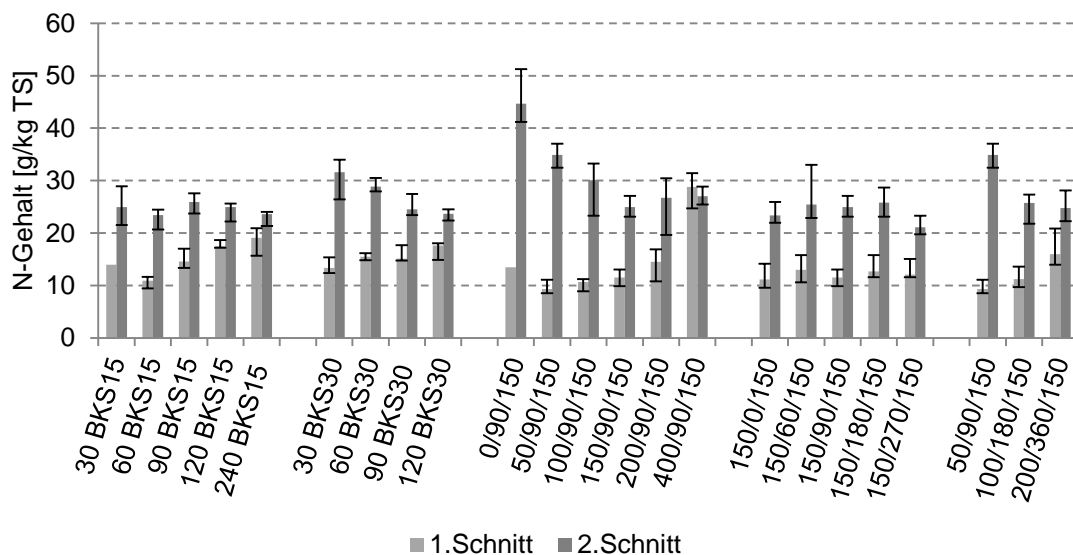


Abbildung 31: N-Gehalte des Knaulgrasaufwuchses des ersten und zweiten Schnittes auf dem Boden Welzow (BKS [t/ha], Mineraldünger N/P/K [kg/ha]; Median, Min., Max., n = 4)

Der N-Gehalt der mineralischen Referenzvariante (11,5 g/kg TS) wird ab der Düngungsstufe 90 BKS15 bzw. 30 BKS30 überschritten. Die Erhöhung der P-Düngung hat keinen Einfluss auf die N-Gehalte des Knaulgrasaufwuchses. Die Varianten 120 und 240 BKS15 weisen signifikant höhere N-Gehalte auf als die Variante 50/90/150 (Anhang 1.5). Die Variante 400/90/150 erzielt signifikant höhere N-Gehalte als die Varianten 60 BKS15, 50/90/150 und 100/90/150.

Nach der einheitlichen mineralischen N-Düngung von 100 kg/ha im April 2012 sind die N-Gehalte im Knaulgrasaufwuchs zum zweiten Erntetermin (Abbildung 31) aller Varianten höher. Die N-Gehalte der Varianten 30 BKS30, 60 BKS30, 50/90/150 und 100/90/150 liegen innerhalb der Wertespanne von Bergmann (1983). Der N-Gehalt der

Variante 0/90/150 ist mit 44,7 g/kg TS oberhalb der Wertspanne nach Bergmann (1983). Der hohe N-Gehalt in der „Nullvariante für N“ ist auf die zusätzliche einheitlich N-Gabe von 100 kg/ha zurückzuführen, die von einem relativ kleinen Pflanzenbestand aufgenommen wurden. Die Einordnung nach Von Wulffen et al. (2008) ergibt, dass alle Varianten einen optimalen N-Gehalt aufweisen. Die Variante 0/90/150 ist auch nach Von Wulffen et al. (2008) als überversorgt einzustufen. Die Variante 50/90/150 liegt mit 34,9 g/kg TS knapp innerhalb der optimalen Versorgung. Die N-Gehalte der BKS15 Varianten entsprechen in etwa dem N-Gehalt der Referenzvariante 150/90/150 von 25,0 g/kg TS. Der Knaulgrasaufwuchs der BKS15-Varianten weist unabhängig von der Steigerung der BKS15-Gaben vergleichbare N-Gehalte zum zweiten Erntetermin auf, was auf die einheitliche mineralische N-Düngung zurückzuführen ist. Die N-Gehalte der BKS30-Varianten verhalten sich gegenläufig zu den Beobachtungen des ersten Schnittes. Es ist eine tendenzielle Abnahme der N-Gehalte von 31,6 (30 BKS30) auf 23,7 (120 BKS30) g/kg TS mit Erhöhung der BKS-Düngung zu verzeichnen. Vermutlich wird N durch die Biokohle gebunden. Ebenso ist eine Abnahme der N-Gehalte mit steigender mineralischer N-Düngung von 44,7 (0/90/150) zu 25,0 g/kg TS (150/90/150) und eine tendenzielle Zunahme von der Variante 150/90/150 zu der Variante 400/90/150 zu verzeichnen. Ein Effekt der P-Düngung ist nicht zu erkennen. Die Variante 0/90/150 weist einen signifikant höheren N-Gehalt auf als die Varianten 60 BKS15 und 150/270/150 (Anhang 1.5). Der N-Gehalt der Variante 50/90/150 ist signifikant höher als der N-Gehalt der Variante 150/270/150.

Die **P-Gehalte** im Pflanzenaufwuchs der BKS-Varianten zum ersten Schnitttermin sind deutlich höher als die P-Gehalte der mineralisch gedüngten Varianten (Abbildung 32). Die P-Gehalte nehmen bei einer Erhöhung von 60 auf 90 t/ha BKS15 zu. Bei einer weiteren Steigerung der BKS15-Gaben nehmen die P-Gehalte im Pflanzenaufwuchs tendenziell ab. Die Varianten 30 und 60 t/ha BKS30 bewirken ebenfalls höhere P-Gehalte im Pflanzenaufwuchs als die Applikation von 90 und 120 t/ha BKS30. Bei einer Einordnung nach Bergmann (1983) (Empfehlung 0,3 - 0,5 % TM) ist der Pflanzenaufwuchs der Varianten 30, 60, 90 und 120 BKS15 sowie 30 und 60 BKS30 und die Variante 0/90/150 tendenziell überversorgt. Die Richtwerte nach Von Wulffen et al. (2008) (Empfehlung 0,28 - 0,35 % TM) sind noch enger gefasst, so dass hier deutliche Überversorgungen aller BKS-Varianten und der Variante 0/90/150 vorliegen. Die Steigerung der mineralischen N-Düngung bei gleichbleibender P-Düngung bewirkt eine tendenzielle Abnahme der P-Gehalte im Pflanzenaufwuchs. Durch das verstärkte Pflanzenwachstum, welches durch höhere Erträge (s. K. 4.1.2.2) belegbar ist, wird der P im Aufwuchs verdünnt. Die Steigerung der P-Düngung bei gleichbleibender N-Düngung hat keinen sichtbaren Einfluss auf den P-Gehalt im Pflanzenaufwuchs. Eine gleichzeiti-

ge Steigerung der N- und P-Düngung bewirkt eine Abnahme des P-Gehaltes im Pflanzenaufwuchs. Alle mineralisch gedüngten Varianten (Ausnahme Variante 0/90/150) weisen P-Gehalte < 2 g/kg TS auf und liegen unterhalb der optimalen Nährstoffgehalte von Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008). Wie in Anhang 1.6 ersichtlich, weist die Variante 90 BKS15 signifikant höhere P-Gehalte auf als die Varianten 200/90/150, 100/180/150, 150/60/150 und 150/270/150.

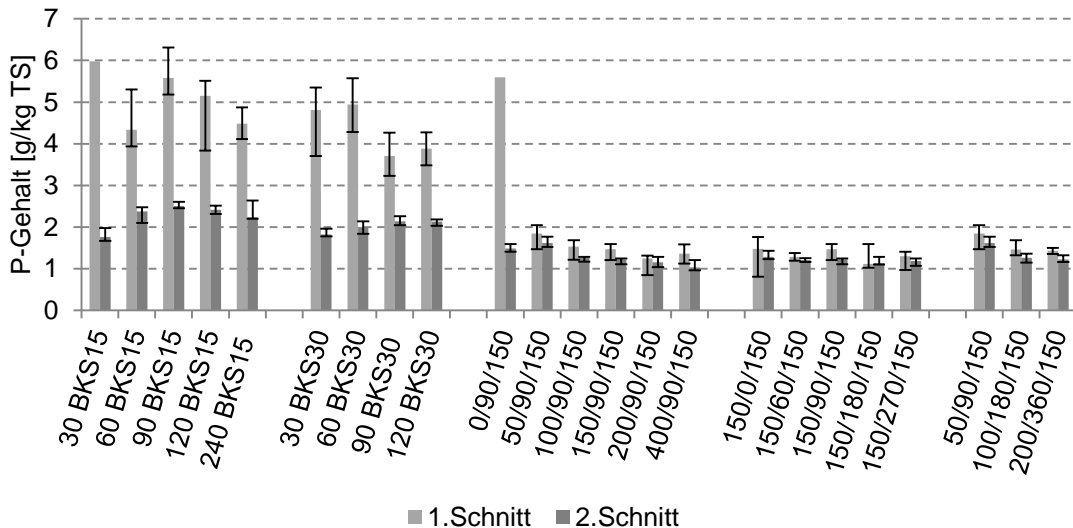


Abbildung 32: P-Gehalte des Knaulgrasaufwuchses des ersten und zweiten Schnittes auf dem Boden Welzow (BKS [t/ha], Mineraldünger N/P/K [kg/ha]; Median, Min., Max., n = 4)

Zum zweiten Erntetermin sind die P-Gehalte des Pflanzenaufwuchses der BKS-Varianten im Mittel um 55 % niedriger als zum ersten Erntetermin (Abbildung 32). Sie weisen nach wie vor ein deutlich höheres Niveau auf als die mineralischen Varianten. Eine tendenzielle Zunahme der P-Gehalte im Pflanzenaufwuchs mit Erhöhung der BKS-Gaben ist bis zu einer Applikationshöhe von 90 t/ha BKS15 und BKS30 zu erkennen. Bei einer weiteren Steigerung der BKS-Applikation stagniert der P-Gehalt im Pflanzenaufwuchs bzw. nimmt tendenziell ab. Auch im zweiten Aufwuchs zeigt sich, dass eine Erhöhung der mineralischen N-Düngung bei gleichbleibender P-Düngung sowie eine gleichzeitig Steigerung der N- und P-Düngung eine Abnahme des P-Gehaltes im Pflanzenaufwuchs bewirken. Die alleinige Steigerung der P-Düngung zeigt keinen Effekt auf den P-Gehalt im Pflanzenaufwuchs. Alle Varianten liegen unterhalb der empfohlenen Nährstoffgehalte von Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008). Die BKS-Varianten kommen dem unteren Grenzwert der Empfehlung am nächsten. Ein signifikant höherer P-Gehalt als die Variante 400/90/150 weisen die Varianten 60, 90, 120 und 240 BKS15 (Anhang 1.6) auf. Ebenso ist der P-Gehalt der Varianten 90 und

120 BKS15 signifikant höher als der der Varianten 200/90/150 und 150/0/150. Die Variante 90 BKS15 weist zudem auch einen signifikant höheren P-Gehalt auf als die Variante 150/60/150.

Zum ersten Schnitt steigen die **K-Gehalte** im Pflanzenaufwuchs mit Erhöhung der BKS-Gaben an (Abbildung 33). Das Niveau der BKS30 ist auf einem geringeren Niveau als bei der BKS15. Eine Gabe von 30 t/ha BKS erzielt bereits höhere (BKS15) bzw. gleichwertige (BKS30) K-Gehalte im Pflanzenaufwuchs als eine mineralische Gabe von 150 K. Alle mineralisch gedüngten Varianten erhielten 150 K kg/ha, so dass die K-Gehalte im Pflanzenaufwuchs geringfügig schwanken. Für die Varianten 90,120 und 240 BKS15 sowie 120 BKS30 liegt nach Bergmann (1983) (Empfehlung 2,5 - 3,5 % TS) und Von Wulffen et al. (2008) (Empfehlung 2,2 - 3,2 % TS) eine Überversorgung mit K vor. Die Varianten 50/90/150, 200/90/150, 400/90/150, 150/90/150, 150/180/150 sind nach Bergmann (1983) als unterversorgt einzuordnen. Nach der Empfehlung von Von Wulffen et al. (2008) liegt eine Unterversorgung nur für die Variante 200/90/150 vor. In Anhang 1.7 sind die signifikant höheren K-Gehalte der Varianten 90, 120 und 240 BKS15 gegenüber der Variante 200/90/150 dargestellt. Zudem weist die Variante 240 BKS15 einen signifikant höheren K-Gehalt auf als die Variante 50/90/150.

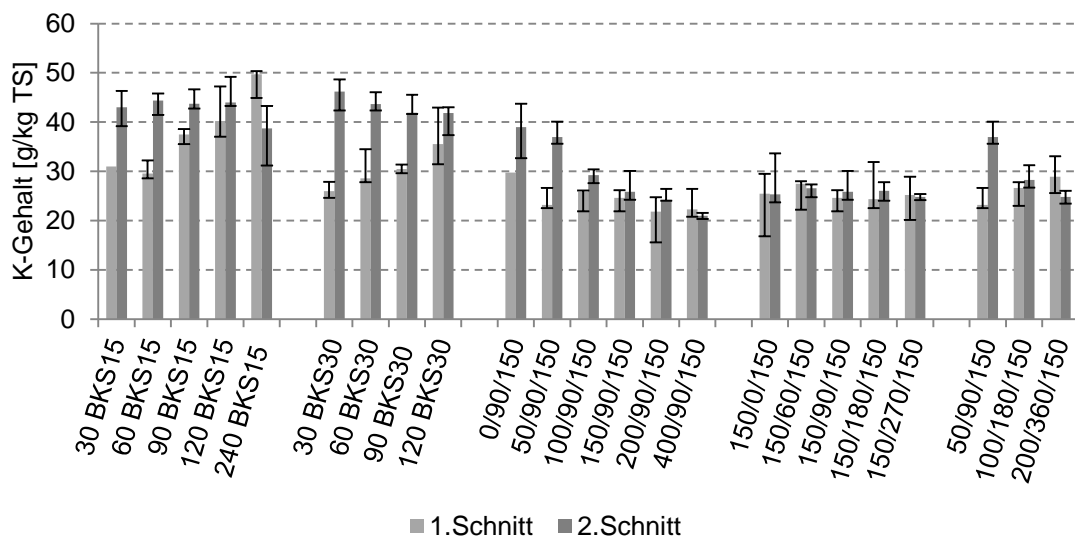


Abbildung 33: K-Gehalte des Knautgrasaufwuchses des ersten und zweiten Schnittes auf dem Boden Welzow (BKS [t/ha], Mineraldünger N/P/K [kg/ha]; Median, Min., Max., n = 4)

Zum zweiten Erntetermin (Abbildung 33) liegt der K-Gehalt der BKS-Varianten insgesamt auf einem höheren Niveau als zum ersten Schnitt. Die BKS30-Varianten erzielen in etwa das gleiche Niveau wie die BKS15-Varianten. Insgesamt ist eine tendenzielle Abnahme der K-Gehalte mit Erhöhung der BKS-Gaben sowohl für die BKS15 als auch

für die BKS30 zu verzeichnen. Die K-Gehalte im Pflanzenaufwuchs der gesteigerten N-Düngungsvarianten nehmen mit einer Erhöhung der N-Düngung ab. Dieser Effekt ist auch bei einer gleichzeitigen Steigerung der N- und P-Düngung zu erkennen. Eine alleinige Steigerung der P-Düngung hat auch zu dem zweiten Erntetermin keinen Effekt auf die K-Gehalte im Pflanzenaufwuchs. Nach Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008) sind die K-Gehalte im Pflanzenaufwuchs aller BKS-Varianten sowie der Varianten 0/90/150 und 50/90/150 als überversorgt einzuordnen. Eine Unterversorgung liegt nach Bergmann (1983) in den Varianten 400/90/150, 150/270/150 und 200/360/150 vor. Bei einer Einordnung nach Von Wulffen et al. (2008) ist nur die Variante 400/90/150 als unterversorgt einzustufen. Die K-Gehalte im Pflanzenaufwuchs der BKS-Varianten 30, 60, 90 und 120 BKS15 sowie 30 und 60 BKS30 sind signifikant höher als die der Variante 400/90/150 (Anhang 1.7).

Die Gesamtgehalte der **Nährstoffe Mg, Mn, Cu und Zn** in dem Knautgrasaufwuchs zu den beiden Schnittterminen auf dem Boden Welzow sind in Tabelle 37 dargestellt. Die Einordnung der Nährstoffgehalte erfolgt nach den Angaben von Bergmann (1983) zum Blühbeginn (BBCH 61) für Mg 0,15 - 0,3 % TS, Mn 40 - 150 ppm TS, Cu 6 - 15 ppm TS und Zn 20 - 50 ppm TS und nach Von Wulffen et al. (2008) zum Rispschieben (BBCH 51) des ersten Aufwuchses für Mg 0,1 - 0,3 % TS, Mn 28 - 140 mg/kg TS und Cu 5,0 - 15,0 mg/kg TS.

Die Mg-, Mn-, Cu- und Zn-Gehalte liegen in den Varianten, die eine BKS-Düngung erfahren haben, auf einem höheren Niveau als in den mineralisch gedüngten Varianten. Der Mg-Gehalt im Aufwuchs wird nicht durch die BKS-Gabenhöhe beeinflusst. Im zweiten Aufwuchs ist der Mg-Gehalt tendenziell höher. Insbesondere die mineralisch gedüngten Varianten weisen zum zweiten Erntetermin deutlich höhere Mg-Gehalte im Vergleich zum ersten Schnitt auf. Über den gesamten Zeitraum sind die Mg-Gehalte aller Varianten nach Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008) als optimal versorgt einzuschätzen. Der Mn-Gehalt des Aufwuchses ist im zweiten Schnitt in den BKS-Varianten deutlich geringer im Vergleich zu dem ersten Schnitt. Er verringert sich auch mit Erhöhung der BKS-Gaben. In den mineralisch gedüngten Varianten steigt der Mn-Gehalt im Aufwuchs zum zweiten Schnitt an. Die Mn-Versorgung aller Varianten ist über den gesamten Versuchszeitraum als optimal einzuschätzen (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Die BKS15- und BKS30-Varianten mit einer Gabenhöhe von 30 und 60 t/ha weisen zum ersten Schnitt erhöhte Mn-Gehalte im Aufwuchs und damit eine Überversorgung mit Mn auf.

Tabelle 37: Gesamtgehalte der Nährstoffe Mg, Mn, Cu und Zn des Knaulgrasaufwuchses auf dem Boden Welzow zu den beiden Ernteterminen (KW-Auszug; n = 1)

Parameter	Termin	Mg <sup>1)</sup>	Mn <sup>1)</sup>	Cu <sup>1)</sup>	Zn <sup>1)</sup>
		[mg/kg TS]			
30 BKS15	1. S.	3091	284,1	5,0	28,5
	2. S.	2193	67,3	5,8	23,0
60 BKS15	1. S.	2415	188,2	4,4	19,2
	2. S.	2503	67,2	6,1	25,4
90 BKS15	1. S.	2413	109,7	11,6	23,7
	2. S.	2635	53,2	6,1	29,3
120 BKS15	1. S.	2211	139,1	7,0	28,0
	2. S.	2491	43,0	6,0	27,5
240 BKS15	1. S.	2053	104,5	6,6	32,9
	2. S.	2013	35,8	5,6	33,1
30 BKS30	1. S.	2776	187,8	7,0	26,4
	2. S.	2740	64,3	6,7	22,3
60 BKS30	1. S.	2593	202,5	6,2	26,3
	2. S.	2377	52,9	5,9	25,9
90 BKS30	1. S.	2382	154,1	5,8	22,6
	2. S.	2428	52,0	6,1	29,5
120 BKS30	1. S.	2320	122,7	6,3	27,3
	2. S.	2741	53,4	5,8	33,8
50/90/150	1. S.	1793	99,9	3,1	10,4
	2. S.	3042	95,0	5,9	22,4
100/180/150	1. S.	1581	60,4	3,1	9,7
	2. S.	2649	114,8	4,8	19,9
150/270/150	1. S.	1549	74,5	3,1	8,8
	2. S.	2478	122,1	4,9	17,5
200/360/150	1. S.	1985	64,1	3,4	10,2
	2. S.	2683	110,8	5,1	19,2

<sup>1)</sup> Optimale Gehalte nach Bergmann (1983) zum Blühbeginn (BBCH 61) für Mg 0,15 - 0,3 % TS, Mn 40 - 150 ppm TS, Cu 6 - 15 ppm TS und Zn 20 - 50 ppm TS sowie nach Von Wulffen et al. (2008) zum Rispschieben (BBCH 51) des ersten Aufwuchses für Mg 0,1 - 0,3 % TS, Mn 28 - 140 mg/kg TS und Cu 5,0 - 15,0 mg/kg TS.

Der Cu-Gehalt des Knaulgrasaufwuchses ist in den Varianten mit BKS-Düngung tendenziell höher als in den mineralisch gedüngten Varianten. Allerdings wird ein Einfluss der BKS-Gabenhöhe auf den Cu-Gehalt nicht deutlich. Zum zweiten Schnitt sind die Cu-Gehalte im Aufwuchs der BKS-Varianten tendenziell geringer (außer 30 BKS15, 60 BKS15 und 90 BKS30) als zum ersten Schnitt. Die Cu-Gehalte der BKS-Varianten liegen im Rahmen der empfohlenen Gehalten von Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008). Die Zn-Gehalte in dem Aufwuchs der BKS-Varianten sind vergleichbar und

weisen auf eine optimale Versorgung mit Zn hin (Bergmann, 1983). Die mineralisch gedüngten Varianten sind nach (Bergmann, 1983) nur unzureichend mit Zn versorgt.

In Tabelle 38 sind die **Entzüge** der Nährstoffe N, P und K mit dem Pflanzenaufwuchs sowohl zu den beiden Schnittterminen als auch in der Summe und deren Relation zur mineralischen Referenzvariante (150/90/150) dargestellt. Die Entzüge an N, P und K sind mit dem ersten Schnitt bei allen Varianten deutlich geringer als die Entzüge mit dem zweiten Schnitt. Dies ist auf den höheren Ertrag zum zweiten Erntetermin zurückzuführen (Abbildung 27). Eine Ausnahme bildet die Variante 400/90/150, deren Entzüge zum ersten Schnitt tendenziell höher sind als zum zweiten Schnitt, da die Erträge zu beiden Terminen vergleichbar sind. Die Variante 150/270/150 weist zum ersten Schnitt leicht erhöhte P-Entzüge bei einem tendenziell geringeren Ertrag im Vergleich zum zweiten Schnitt auf. Dies ist auf die erhöhte P-Verfügbarkeit durch die höhere P-Düngung (270 kg/ha P) zurückzuführen. Die N-, P- und K-Entzüge in den BKS15-Varianten sind zu beiden Ernteterminen tendenziell höher als die der BKS30-Varianten. Im Vergleich zu der mineralischen Referenzvariante (150/90/150) liegen die N-Entzüge der BKS-Varianten auf einem tendenziell geringeren Niveau. Lediglich die Varianten 90 BKS15, 240 BKS15 und 120 BKS30 erreichen und übertreffen das Niveau der mineralischen Referenz. Hingegen liegen die P-Entzüge aller BKS-Varianten, außer 30 BKS30, deutlich über den Entzügen der mineralischen Referenz. Auch die K-Entzüge liegen ab einer Düngung von 60 t/ha BKS15 bzw. BKS30 über denen der mineralischen Referenz. Die Steigerung des K-Entzuges mit Erhöhung der BKS-Düngung ist etwas verhaltener im Vergleich zu dem P-Entzug.

Tabelle 38: Entzüge (N, P, K) mit dem Pflanzenaufwuchs auf dem Boden Welzow nach Ernteterminen sowie in der Summe und in Relation zu der mineralischen Referenzvariante

Variante	Termin	N					Rel. zu 150/90/ 150	P				Rel. zu 150/90/ 150	K				Rel. zu 150/90/ 150
		Min	Med	Max	Σ	Min		Med	Max	Σ	Min		Med	Max	Σ		
		[kg/ha]				[%]		[kg/ha]					[%]	[kg/ha]			
30 BKS15 <sup>1)</sup>	1. S.	-	20,6	-	68,2	96,2	-	1,9	-	5,2	110,4	-	14,9	-	93,8	99,4	
	2. S.	44,0	47,7	50,6	68,2	96,2	3,3	3,4	3,6	5,2	110,4	78,4	79,0	90,0	93,8	99,4	
60 BKS15	1. S.	3,7	5,2	5,9	61,3	86,5	1,4	2,2	2,6	7,7	163,3	9,2	15,4	16,5	122,7	130,0	
	2. S.	47,0	56,2	62,7	61,3	86,5	5,3	5,5	6,2	7,7	163,3	93,3	107,2	115,7	122,7	130,0	
90 BKS15	1. S.	4,0	4,9	5,4	71,1	100,3	1,5	1,9	2,0	8,4	178,1	10,0	12,4	13,4	127,3	134,9	
	2. S.	64,1	66,2	70,0	71,1	100,3	6,1	6,5	6,8	8,4	178,1	108,5	114,8	119,5	127,3	134,9	
120 BKS15	1. S.	2,7	3,8	6,4	69,4	97,8	0,8	1,0	1,9	7,4	155,9	7,3	8,0	15,1	127,2	134,8	
	2. S.	59,6	65,5	69,3	69,4	97,8	6,2	6,4	6,7	7,4	155,9	116,3	119,1	124,8	127,2	134,8	
240 BKS15	1. S.	10,1	11,9	12,7	105,4	148,6	2,2	2,8	3,6	12,2	258,7	24,2	31,2	35,9	184,5	195,6	
	2. S.	82,0	93,5	103,9	105,4	148,6	9,1	9,4	9,5	12,2	258,7	133,0	153,3	168,5	184,5	195,6	
30 BKS30	1. S.	0,8	1,9	2,5	55,0	77,5	0,3	0,6	0,9	3,7	78,5	1,3	3,8	5,0	79,0	83,8	
	2. S.	46,1	53,1	57,3	55,0	77,5	3,0	3,1	3,4	3,7	78,5	73,1	75,2	88,4	79,0	83,8	
60 BKS30	1. S.	2,6	3,3	3,5	66,0	93,0	0,8	1,1	1,2	5,5	116,5	4,9	6,2	7,1	103,2	109,4	
	2. S.	59,4	62,7	70,5	66,0	93,0	3,9	4,4	4,7	5,5	116,5	89,9	97,0	101,6	103,2	109,4	
90 BKS30	1. S.	5,9	6,1	7,0	69,4	97,8	1,3	1,4	1,8	6,9	146,0	10,4	12,1	14,4	124,0	131,5	
	2. S.	62,7	63,3	66,9	69,4	97,8	5,3	5,5	5,9	6,9	146,0	98,0	111,9	118,0	124,0	131,5	
120 BKS30	1. S.	5,1	5,4	6,5	79,4	111,9	1,0	1,2	1,9	7,9	166,6	9,0	11,7	16,3	144,3	153,0	
	2. S.	71,4	74,0	79,9	79,4	111,9	6,5	6,7	7,0	7,9	166,6	119,8	132,6	135,1	144,3	153,0	
0/90/150 <sup>1)</sup>	1. S.	-	29,5	-	76,7	108,2	-	2,5	-	4,0	83,7	-	9,6	-	48,4	51,3	
	2. S.	44,9	47,2	49,9	76,7	108,2	1,4	1,5	1,9	4,0	83,7	32,5	38,8	53,0	48,4	51,3	
50/90/150	1. S.	4,5	4,7	5,5	56,4	79,5	0,8	0,8	1,2	3,3	69,0	9,4	12,0	15,9	67,9	72,0	
	2. S.	46,0	51,7	56,4	56,4	79,5	2,3	2,4	2,5	3,3	69,0	51,9	55,9	56,8	67,9	72,0	
100/90/150	1. S.	11,9	13,0	15,2	68,7	96,9	1,6	1,9	2,2	4,3	91,3	28,5	31,9	35,8	88,0	93,2	
	2. S.	47,6	55,7	65,4	68,7	96,9	2,4	2,4	2,4	4,3	91,3	55,8	56,1	56,4	88,0	93,2	



Tabelle 38 (F.): Entzüge (N, P, K) mit dem Pflanzenaufwuchs auf dem Boden Welzow nach Ernteterminen sowie in der Summe und in Relation zu der mineralischen Referenzvariante

Variante	Termin	N				Rel. zu	P				Rel. zu	K				Rel. zu
		Min	Med	Max	Σ	150/90/ 150	Min	Med	Max	Σ	150/90/ 150	Min	Med	Max	Σ	150/90/ 150
		[kg/ha]				[%]	[kg/ha]				[%]	[kg/ha]				[%]
150/90/150	1. S.	15,3	19,3	21,9	70,9	100,0	2,1	2,2	3,0	4,7	100,0	33,7	39,3	49,2	94,3	100,0
	2. S.	50,0	51,6	56,7			2,4	2,5	2,6			53,0	55,1	58,3		
200/90/150	1. S.	27,8	34,4	40,2	113,1	159,5	2,3	2,9	3,2	6,6	140,5	40,9	52,0	57,9	128,4	136,1
	2. S.	60,9	78,7	94,2			2,7	3,7	3,9			58,8	76,3	90,7		
400/90/150	1. S.	64,1	78,0	99,9	155,6	219,4	3,5	3,7	4,0	6,8	144,5	59,5	63,5	68,8	126,6	134,2
	2. S.	73,1	77,6	89,6			3,0	3,1	3,1			53,4	63,1	66,8		
150/0/150	1. S.	6,9	27,1	33,5	78,4	110,5	1,3	2,7	3,6	5,5	117,4	18,5	51,8	66,8	108,6	115,1
	2. S.	44,4	51,2	53,5			2,5	2,9	2,9			54,9	56,8	57,7		
150/60/150	1. S.	17,5	25,2	28,8	83,7	117,9	1,5	2,7	2,8	5,3	112,0	30,9	54,6	57,9	110,7	117,3
	2. S.	44,9	58,5	67,9			2,3	2,6	2,9			53,7	56,1	60,4		
150/90/150	1. S.	15,3	19,3	21,9	70,9	100,0	2,1	2,2	3,0	4,7	100,0	33,7	39,3	49,2	94,3	100,0
	2. S.	50,0	51,6	56,7			2,4	2,5	2,6			53,0	55,1	58,3		
150/180/ 150	1. S.	23,6	27,4	31,8	86,9	122,5	2,3	2,5	2,6	5,1	108,5	44,3	54,4	63,0	114,3	121,2
	2. S.	51,8	59,5	61,9			2,5	2,6	2,8			53,8	60,0	60,1		
150/270/ 150	1. S.	24,1	30,5	32,4	80,2	113,0	2,0	3,1	3,5	5,9	124,9	41,9	61,0	67,6	119,4	126,6
	2. S.	46,4	49,7	62,9			2,5	2,8	3,3			56,7	58,4	68,5		
50/90/150	1. S.	4,5	4,7	5,5	56,4	79,5	0,8	0,8	1,2	3,3	69,0	9,4	12,0	15,9	67,9	72,0
	2. S.	46,0	51,7	56,4			2,3	2,4	2,5			51,9	55,9	56,8		
100/180/ 150	1. S.	13,5	15,9	19,4	68,6	96,6	1,7	2,1	2,5	4,8	100,8	27,5	36,9	48,4	96,4	102,1
	2. S.	47,1	52,7	56,5			2,4	2,6	2,9			49,9	59,5	70,1		
200/360/ 150	1. S.	29,2	32,0	36,5	92,6	130,5	2,3	2,8	3,5	5,8	123,5	49,9	53,0	73,7	115,0	121,9
	2. S.	51,7	60,6	72,6			2,5	3,1	3,5			53,8	62,0	64,9		

<sup>1)</sup> Einfachbestimmung aufgrund von Materialmangel zum ersten Erntetermin

#### 4.1.2.4.2 Zinnitz

Die **N-Gehalte** im Pflanzenaufwuchs des ersten Schnittes auf dem Boden Zinnitz liegen zwischen 8,5 und 43,1 g/kg TS (Abbildung 34). Damit liegen alle Varianten (ausgenommen Variante 400/90/150) deutlich unter den empfohlenen N-Gehalten (2,8 - 4,0 % TS) für Knautgras von Bergmann (1983) für den Blühbeginn (BBCH 61). Eine weitere Einordnung ist nach Von Wulffen et al. (2008) möglich, der für Wiesengräser zum Rispschieben (BBCH 51) einen Wert von 2,0 - 3,5 % in der TS empfiehlt. Innerhalb dieser Empfehlung liegen die N-Gehalte der Varianten 240 BKS15, 200/90/150, 400/90/150, 150/60/150, 100/180/150, 200/360/150. Diese Varianten sowie die Variante 90 BKS30 weisen einen höheren N-Gehalt im Aufwuchs auf als die mineralische Referenzvariante (17,8 g/kg TS). Die N-Gehalte des Pflanzenaufwuchses nehmen mit Erhöhung der BKS- und N-Düngergaben zu. Die Erhöhung von 90 t/ha BKS30 auf 120 t/ha BKS30 bewirkte eine Abnahme des N-Gehalts im Pflanzenaufwuchs. Die Erhöhung der P-Düngung bewirkt ab der Düngungsstufe 60 kg P/ha einen Rückgang der N-Gehalte im Knautgrasaufwuchs. Wie in Anhang 1.8 deutlich wird, sind die N-Gehalte der Variante 400/90/150 signifikant höher als die der Varianten 30 BKS15, 30 BKS30, 0/90/150 und 100/90/150. Zudem ist der N-Gehalt der Variante 30 BKS30 signifikant geringer als die N-Gehalte der Varianten 240 BKS15, 200/90/150 und 200/360/150.

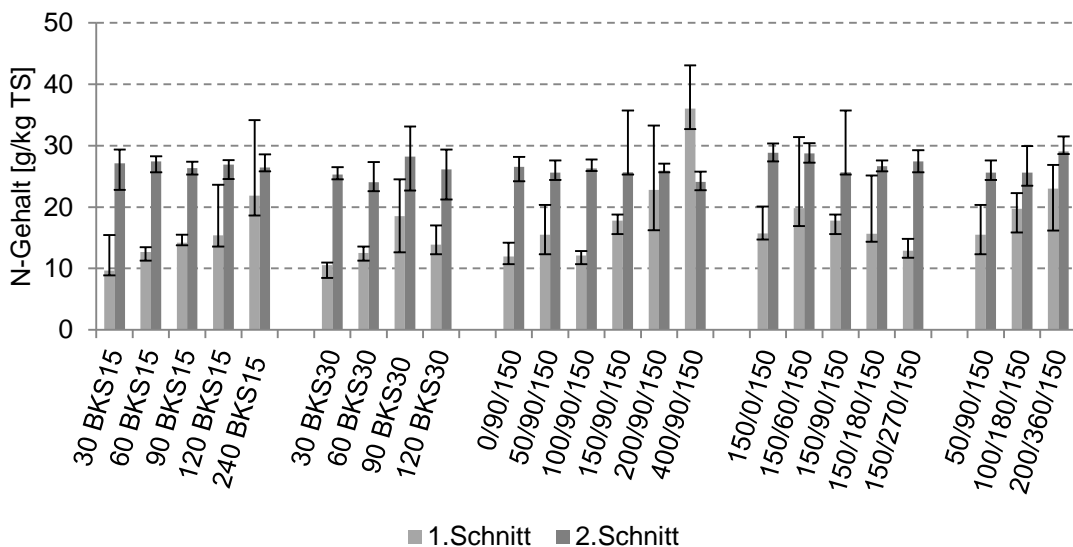


Abbildung 34: N-Gehalte des Knautgrasaufwuchses des ersten und zweiten Schnittes auf dem Boden Zinnitz (BKS [t/ha], Mineraldünger N/P/K [kg/ha]; Median, Min., Max., n = 4)

Zum zweiten Erntetermin sind die N-Gehalte des Knautgrasaufwuchses aller Varianten vergleichbar, was auf die einheitliche N-Gabe von 100 kg N/ha zum Vegetationsbeginn

zurückzuführen ist. Bei einer Einordnung der N-Gehalte nach Bergmann (1983) liegen fast alle Varianten knapp unterhalb der empfohlenen 2,8 - 4,0 % N TS. Die Varianten 90 BKS30, 150/0/150, 150/60/150 und 200/360/150 liegen innerhalb dieser Wertspanne. Nach Von Wulffen et al. (2008) sind alle Varianten ausreichend mit N versorgt. Da die N-Gehalte aller Varianten vergleichbar sind, liegt nur zwischen den Varianten 200/360/150 und 400/90/150 ein signifikanter Unterschied vor (Anhang 1.8).

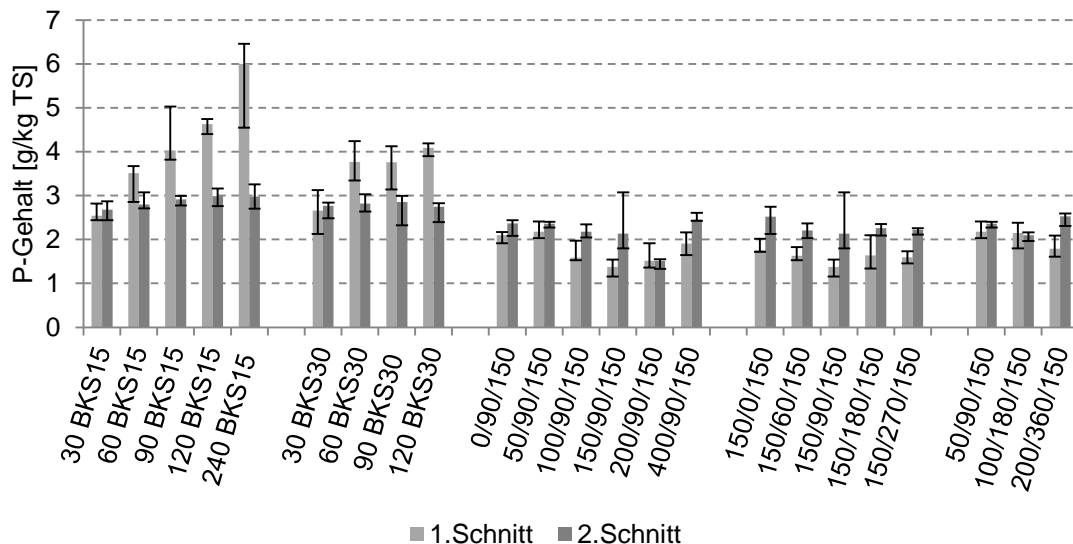


Abbildung 35: P-Gehalte des Knaulgrasaufwuchses des ersten und zweiten Schnittes auf dem Boden Zinnitz (BKS [t/ha], Mineraldünger N/P/K [kg/ha]; Median, Min., Max., n = 4)

Die **P-Gehalte** des Pflanzenaufwuchses nehmen mit Erhöhung der BKS-Gaben deutlich zu (Abbildung 35). Das BKS15 bewirkt eine starke Zunahme der P-Gehalte als das BKS30. Alle BKS-Varianten weisen höhere P-Gehalte auf als die mineralisch gedüngten Varianten. Die Empfehlung 0,3 - 0,5 % P TS von Bergmann (1983) erreichen die mineralisch gedüngten Varianten 30 BKS15 und 30 BKS30 nicht. Die anderen BKS-Varianten liegen innerhalb dieser Empfehlung. Eine Ausnahme bildet die Variante 240 BKS15, die als überversorgt einzustufen ist. Von Wulffen et al. (2008) fast die Richtwerte zur P-Versorgung etwas enger (0,28-0,35 % TS). Die mineralisch gedüngten Varianten 30 BKS15 und 30 BKS30 sind auch nach Von Wulffen et al. (2008) als unterversorgt einzuordnen. Die weiteren BKS-Varianten sind als leicht bis deutlich überversorgt einzustufen. Die Steigerung der mineralischen N-Düngung bei gleichbleibender P-Düngung bewirkt eine tendenzielle Abnahme der P-Gehalte im Pflanzenaufwuchs. Hingegen hat die Steigerung der P-Düngung bei gleichbleibender N-Düngung keinen sichtbaren Einfluss auf den P-Gehalt im Pflanzenaufwuchs. Eine gleichzeitige

Steigerung der N- und P-Düngung bewirkt eine Abnahme des P-Gehaltes im Pflanzenaufwuchs.

Wie in Anhang 1.9 ersichtlich, weisen die Varianten 90 BKS15 und 120 BKS30 einen signifikant höheren P-Gehalt auf als die Variante 150/90/150. Signifikant höhere P-Gehalte liegen auch in der Variante 120 BKS15 im Vergleich zu den Varianten 150/90/150, 200/90/150 und 150/270/150 vor. Die Variante 240 BKS15 weist einen signifikant höheren P-Gehalt auf als die Varianten 100/90/150, 150/90/150, 200/90/150, 150/60/150, 150/180/150 und 150/270/150.

Zum zweiten Erntetermin tritt keine Steigerung der P-Gehalte in den BKS-Varianten auf (Abbildung 35). Die P-Gehalte der BKS-Varianten sind ausgeglichener, liegen aber immer noch auf einem höheren Niveau als die der mineralisch gedüngten Varianten. Es lassen sich keine Trends zwischen den Variationen der mineralischen N- und P-Düngung erkennen. Die Einordnung der P-Gehalte nach Bergmann (1983) ergibt eine Unterversorgung für alle Varianten, ausgenommen der Varianten 120 BKS15 und 240 BKS15. Nach Von Wulffen et al. (2008) sind alle BKS-Varianten, außer der Variante 30 BKS15, als ausreichend versorgt einzustufen. Die mineralisch gedüngten Varianten und die Variante 30 BKS15 gelten auch nach diesem Richtwert als unterversorgt. Wie in Anhang 1.9 deutlich wird, liegen die P-Gehalte der Variante 200/90/150 signifikant unter denen der Varianten 60 BKS15, 90 BKS15, 120 BKS15, 240 BKS15 und 60 BKS30. Der P-Gehalt der Variante 120 BKS15 liegt zudem signifikant über dem P-Gehalt der Variante 100/180/150.

Die **K-Gehalte** im Pflanzenaufwuchs nehmen mit Erhöhung der BKS-Gaben zum ersten Schnitt zu (Abbildung 36). Alle mineralisch gedüngten Varianten erhielten 150 kg K/ha. Die Schwankungen der K-Gehalte im Pflanzenaufwuchs in diesen Varianten müssen auf andere Ursachen, wie beispielsweise einen höheren Ertrag, zurückgeführt werden. Eine Gabe von 30 t BKS/ha bewirkt höhere K-Gehalte im Pflanzenaufwuchs im Vergleich zu der mineralischen Referenzvariante 150/90/150 und auch im Vergleich zum Mittel aller mineralisch gedüngten Varianten. Bergmann (1983) empfiehlt eine K-Versorgung von 2,5 - 3,5 % K in der TS. Innerhalb dieser Empfehlung liegen die K-Gehalte der Varianten 30 BKS15, 30 BKS30, 60 BKS30, 0/90/150, 50/90/150, 200/90/150, 150/0/150, 150/60/150, 150/270/150 und 100/180/150. Als überversorgt sind alle übrigen BKS-Varianten und die mineralisch gedüngten Varianten 400/90/150, 200/360/150 einzustufen. Die übrigen mineralisch gedüngten Varianten gelten als unterversorgt. Die optimale Versorgung nach Von Wulffen et al. (2008) spiegelt sich im Bereich von 2,2 bis 3,2 % TS wider. Im Bereich der optimalen Versorgung liegen die K-Gehalte fast aller mineralisch gedüngten Varianten. Als Ausnahmen sind die Varianten 100/90/150 (unterversorgt), 50/90/150, 400/90/150 und 200/360/150 (überversorgt) zu

nennen. Die BKS-Varianten sind ebenfalls als überversorgt einzuordnen, mit Ausnahme der Varianten 30 BKS15 und BKS30, die optimal versorgt sind. Die signifikanten Unterschiede sind in Anhang 1.10 dargestellt. Die Varianten 120 BKS15 und 240 BKS15 weisen einen signifikant höheren K-Gehalt auf als die Varianten 0/90/150, 100/90/150 und 150/90/150. Der K-Gehalt der Variante 240 BKS15 ist zudem signifikant höher als der der Variante 150/270/150. Auch für die Variante 120 BKS30 liegt eine signifikant höherer K-Gehalt im Vergleich zu der Variante 100/90/150 vor.

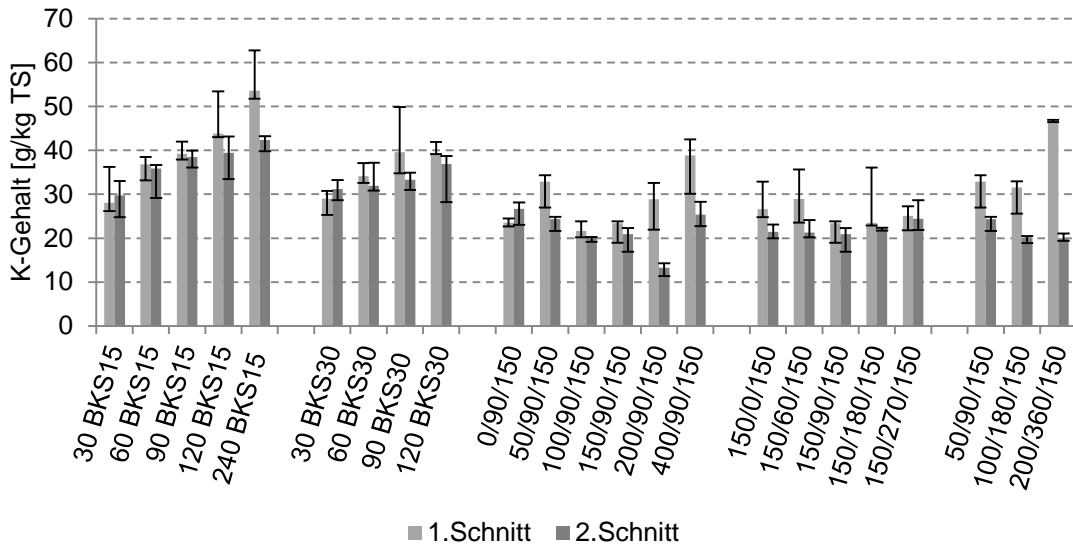


Abbildung 36: K-Gehalte des Knautgrasaufwuchses des ersten und zweiten Schnittes auf dem Boden Zinnitz (BKS [t/ha], Mineraldünger N/P/K [kg/ha]; Median, Min., Max., n = 4)

Zum zweiten Erntetermin (Abbildung 36) liegt der K-Gehalt der BKS-Varianten im Mittel auf einem geringeren Niveau als zum ersten Schnitt, wobei die BKS-Varianten nach wie vor ein deutlich höheres Niveau aufweisen als die mineralisch gedüngten Varianten. Die BKS30-Varianten weisen ein tendenziell geringeres Niveau auf als die BKS15-Varianten. Die BKS-Varianten zeigen auch zum zweiten Erntetermin noch eine Zunahme der K-Gehalte mit gesteigerten BKS-Gaben. Die K-Gehalte im Pflanzenaufwuchs nehmen mit der Erhöhung der N-Düngung tendenziell ab. Dieser Effekt ist auch bei einer gleichzeitigen Steigerung der N- und P-Düngung zu erkennen. Eine alleinige Steigerung der P-Düngung hat auch zu dem zweiten Erntetermin keinen Effekt auf die K-Gehalte im Pflanzenaufwuchs. Nach Bergmann (1983) sind folgende Varianten optimal versorgt: 30 BKS15, 30 BKS30, 60 BKS30, 90 BKS30, 0/90/150, 400/90/150. Folgende Varianten sind als überversorgt einzustufen: 60 BKS15, 90 BKS15, 120 BKS15, 240 BKS15, 120 BKS30. Die weiteren Varianten gelten als unterversorgt. Nach Von Wulffen et al. (2008) sind folgende Varianten optimal versorgt 30 BKS15, 30

BKS30, 60 BKS30, 0/90/150, 50/90/150 400/90/150, 150/180/150 und 150/270/150. Folgende Varianten sind als überversorgt einzustufen: 60 BKS15, 90 BKS15, 120 BKS15, 240 BKS15, 90 BKS30, 120 BKS30. Die weiteren Varianten gelten als unterversorgt. Anhang 1.10 zeigt die signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten auf. Die Varianten 60 BKS15 und 90 BKS15 weisen signifikant höhere K-Gehalte auf als die Variante 200/90/150. Der K-Gehalt der Variante 90 BKS15 ist zudem signifikant höher als der der Variante 100/180/150. Signifikant höhere K-Gehalte liegen auch in den Varianten 120 BKS15 und 240 BKS15 gegenüber der Varianten 100/90/150, 200/90/150 und 100/180/150 vor. Der K-Gehalt der Variante 240 BKS15 ist darüber hinaus auch signifikant höher als der der Varianten 150/90/150 und 200/360/150. Der K-Gehalt der Variante 120 BKS30 ist signifikant höher als der der Variante 200/90/150.

Die Gesamtgehalte der **Nährstoffe Mg, Mn, Cu und Zn** in dem Knaulgrasaufwuchs (n = 1) des gewachsenen Ackerboden Zinnitz (Tabelle 39) weisen ein vergleichbares Niveau zu dem Kippboden Welzow auf. Die Einordnung der Nährstoffgehalte erfolgt nach den Angaben von Bergmann (1983) zum Blühbeginn (BBCH 61) für Mg 0,15 - 0,3 % TS, Mn 40 - 150 ppm TS, Cu 6 - 15 ppm TS und Zn 20 - 50 ppm TS und nach Von Wulffen et al. (2008) zum Rispschieben (BBCH 51) des ersten Aufwuchses für Mg 0,1 - 0,3 % TS, Mn 28 - 140 mg/kg TS und Cu 5,0 - 15,0 mg/kg TS.

Die Mg-Gehalte im Aufwuchs sind in der Regel zum zweiten Erntetermin höher als zu dem ersten Erntetermin. Auch weisen die mineralisch gedüngten Varianten deutlich höhere Mg-Gehalte auf als die BKS-Varianten. Dementsprechend ist die Mg-Versorgung der BKS-Varianten im gesamten Versuchszeitraum als optimal einzuschätzen, wohingegen bei den mineralisch gedüngten Varianten eine Überversorgung vorliegt (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Die Mn-Gehalte im Pflanzenaufwuchs der BKS-Varianten sind zu beiden Ernteterminen tendenziell geringer als die Mn-Gehalte der mineralisch gedüngten Varianten. Insbesondere die Mn-Gehalte der hohen BKS15-Gaben von 120 und 240 t/ha sowie die Gabe von 90 t/ha BKS30 weisen auf eine unzureichende Mn-Versorgung hin (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Die mineralisch gedüngten Varianten liegen im gesamten Versuchszeitraum innerhalb der Empfehlungen von Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008). Die Cu-Gehalte aller Varianten sind vergleichbar. Der Aufwuchs des zweiten Schnittes weist in allen Düngevarianten tendenziell höhere Cu-Gehalte auf. Die Cu-Gehalte im Aufwuchs aller Varianten liegen in dem gesamten Zeitraum innerhalb der Empfehlungen von Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008). Der Zn-Gehalt steigt mit Erhöhung der BKS15 und BKS30-Gabe an. Die Zn-Gehalte im Aufwuchs des ersten

Schnittes aller Varianten sind nach der Empfehlung von Bergmann (1983) unzureichend (außer 120 BKS15 und 240 BKS15). Zum zweiten Schnitt steigen insbesondere die Zn-Gehalte der BKS-Varianten an und sind in den optimalen Bereich nach Bergmann (1983) einzuordnen.

Tabelle 39: Gesamtgehalte der Nährstoffe Mg, Mn, Cu und Zn des Knautgrasaufwuchses auf dem Boden Zinnitz zu den beiden Ernteterminen (KW-Auszug; n = 1)

Parameter	Termin	Mg <sup>1)</sup>	Mn <sup>1)</sup>	Cu <sup>1)</sup>	Zn <sup>1)</sup>
		[mg/kg TS]			
30 BKS15	1. S.	2056	37,1	3,7	13,0
	2. S.	3200	63,2	5,8	36,4
60 BKS15	1. S.	2309	61,9	4,5	13,2
	2. S.	3036	61,3	6,6	36,8
90 BKS15	1. S.	2555	55,9	5,7	19,3
	2. S.	3057	48,7	6,5	38,8
120 BKS15	1. S.	2382	26,0	5,9	21,4
	2. S.	2999	33,8	6,2	41,0
240 BKS15	1. S.	2280	31,2	8,1	30,7
	2. S.	2811	32,1	5,8	40,0
30 BKS30	1. S.	1757	33,0	3,4	9,9
	2. S.	3082	62,9	6,1	36,4
60 BKS30	1. S.	2123	56,8	4,7	12,9
	2. S.	2858	60,6	6,3	35,0
90 BKS30	1. S.	2245	17,9	5,6	17,6
	2. S.	3111	46,7	7,5	46,1
120 BKS30	1. S.	2483	30,4	5,4	19,1
	2. S.	2872	41,2	6,8	41,7
50/90/150	1. S.	2799	48,7	5,0	15,5
	2. S.	4043	88,4	7,0	34,0
100/180/150	1. S.	3025	52,2	5,8	20,0
	2. S.	4075	75,8	6,6	33,2
150/270/150	1. S.	2697	70,5	4,2	12,1
	2. S.	3626	132,8	6,8	30,0
200/360/150	1. S.	2911	49,4	6,0	19,6
	2. S.	4006	95,1	7,1	34,4

<sup>1)</sup> Optimale Gehalte nach Bergmann (1983) zum Blühbeginn (BBCH 61) für Mg 0,15 - 0,3 % TS, Mn 40 - 150 ppm TS, Cu 6 - 15 ppm TS und Zn 20 - 50 ppm TS sowie nach Von Wulffen et al. (2008) zum Rispschieben (BBCH 51) des ersten Aufwuchses für Mg 0,1 - 0,3 % TS, Mn 28 - 140 mg/kg TS und Cu 5,0 - 15,0 mg/kg TS.

In Tabelle 40 sind die **Entzüge** der Nährstoffe N, P und K mit dem Pflanzenaufwuchs sowohl zu den beiden Schnittterminen als auch in der Summe und deren Relation zur mineralischen Referenzvariante (150/90/150) dargestellt. Die Entzüge an N, P und K

der BKS-Varianten sind zum zweiten Schnitt höher als die Entzüge mit dem ersten Schnitt. Die Erhöhung der N-Entzüge zum zweiten Schnitt ist auch auf die erhöhten N-Gehalte, die durch die zusätzliche mineralische N-Gabe bedingt sind, zurückzuführen. Die mittleren K-Entzüge der mineralisch gedüngten Varianten sind zum ersten Erntetermin höher als zum zweiten Erntetermin. Dies ist auf die Ertragssteigerung vom ersten zum zweiten Schnitt zurückzuführen. Insbesondere bei den mineralisch gedüngten Varianten fällt der Ertrag zum zweiten Erntetermin geringer aus (vgl. Abbildung 28). Die N-, P- und K-Entzüge in den BKS15-Varianten sind zu beiden Ernteterminen tendenziell höher als die der BKS30-Varianten. Die summierten N-Entzüge der BKS-Varianten sind geringer als die der mineralischen Referenzvariante (150/90/150). Die P-Entzüge der BKS15-Varianten liegen im Mittel um 26 % und die K-Entzüge um 10 % über denen der mineralischen Referenzvariante (150/90/150). Die BKS30-Varianten weisen im Mittel um 10 % höhere P-Entzüge und um 5 % geringere K-Entzüge im Vergleich zur mineralischen Referenzvariante (150/90/150) auf. Die gesteigerte N-Düngung bewirkt eine Zunahme des N-Entzuges. Ein vergleichbarer Effekt für die Steigerung der P-Düngung ist auf einem geringeren Niveau vorhanden. Die gleichzeitige Erhöhung der N- und P-Düngung bewirkt aufgrund der Ertragssteigerung auch eine Zunahme des K-Entzuges.



Tabelle 40: Entzüge (N, P, K) mit dem Pflanzenaufwuchs auf dem Boden Zinnitz nach Ernteterminen sowie in der Summe und in Relation zu der mineralischen Referenzvariante

Variante	Termin	N					Rel. zu 150/90/ /150	P				Rel. zu 150/90/ 150	K				Rel. zu 150/90/ 150			
		Min	Med	Max	Σ	Min		Me d	Max	Σ	Min		Med	Max	Σ					
		[kg/ha]				[%]		[kg/ha]					[%]	[kg/ha]				[%]		
30 BKS15	1. S.	34,8	39,8	51,4			69,0	8,7	9,9	11,5			131,7	103,1	114,6	120,9			212,9	112,4
	2. S.	80,0	87,1	99,7	126,9			7,7	8,9	9,9	18,9			90,0	98,3	101,3			212,9	112,4
60 BKS15	1. S.	32,1	34,8	38,3			63,1	8,6	9,4	10,4			126,0	95,0	100,8	109,7			207,5	109,6
	2. S.	79,6	81,2	107,3	116,1			8,0	8,6	11,3	18,0			102,3	106,7	121,8			207,5	109,6
90 BKS15	1. S.	21,9	26,9	29,0			59,9	7,1	7,6	8,0			116,7	59,5	73,4	81,7			193,7	102,3
	2. S.	79,1	83,2	86,2	110,1			8,7	9,1	9,7	16,7			114,3	120,3	126,9			193,7	102,3
120 BKS15	1. S.	30,4	33,6	35,9			60,8	7,0	10,0	10,5			131,4	79,3	94,0	103,1			208,3	110,0
	2. S.	72,6	78,1	89,1	111,7			8,0	8,8	10,0	18,8			113,3	114,3	121,5			208,3	110,0
240 BKS15	1. S.	27,4	31,8	34,6			67,9	5,6	8,1	9,1			128,1	63,7	70,4	94,6			223,1	117,8
	2. S.	78,5	93,0	102,2	124,9			8,6	10,3	11,7	18,3			109,4	152,6	162,7			223,1	117,8
30 BKS30	1. S.	16,9	20,5	37,0			59,5	4,8	5,2	9,1			104,0	47,4	59,2	100,3			167,0	88,2
	2. S.	81,2	88,8	97,1	109,3			8,2	9,7	10,5	14,9			104,6	107,8	113,6			167,0	88,2
60 BKS30	1. S.	20,9	22,2	24,0			64,6	5,7	6,6	8,4			124,8	55,1	60,6	71,9			195,2	103,1
	2. S.	94,1	96,6	101,4	118,8			10,5	11,3	12,0	17,9			117,1	134,5	137,8			195,2	103,1
90 BKS30	1. S.	28,4	30,0	31,7			70,2	5,0	6,1	7,5			107,5	56,0	64,4	89,7			175,5	92,7
	2. S.	72,1	99,0	117,1	129,0			7,5	9,3	12,0	15,4			103,0	111,1	129,1			175,5	92,7
120 BKS30	1. S.	17,8	22,7	26,3			58,6	5,0	6,4	8,1			106,6	48,0	64,1	78,8			178,8	94,4
	2. S.	78,5	85,0	88,2	107,6			8,2	8,9	9,3	15,3			104,3	114,7	127,2			178,8	94,4
0/90/150	1. S.	32,2	39,2	53,1			63,6	5,9	7,1	7,4			96,8	64,7	79,3	91,6			153,7	81,1
	2. S.	72,5	77,7	83,0	117,0			6,3	6,7	7,6	13,9			69,6	74,4	90,8			153,7	81,1
50/90/150	1. S.	52,7	59,6	89,1			74,3	8,7	9,0	9,2			111,1	115,6	127,0	149,2			198,8	105,0
	2. S.	68,9	77,0	83,8	136,6			6,7	6,9	7,4	15,9			61,5	71,8	78,1			198,8	105,0
100/90/150	1. S.	42,7	52,1	68,3			72,6	6,5	7,2	8,5			97,9	85,0	95,4	112,3			158,0	83,4
	2. S.	76,0	81,3	89,8	133,4			6,4	6,8	7,1	14,0			52,5	62,6	69,9			158,0	83,4

Tabelle 40 (F.): Entzüge (N, P, K) mit dem Pflanzenaufwuchs auf dem Boden Zinnitz nach Ernteterminen sowie in der Summe und in Relation zu der mineralischen Referenzvariante

Variante	Termin	N					Rel. zu 150/90/ 0/150	P				Rel. zu 150/90/ 150	K				Rel. zu 150/90/ 150
		Min	Med	Max	Σ	Min		Med	Max	Σ	Min		Med	Max	Σ		
		[kg/ha]				[%]	[kg/ha]				[%]	[kg/ha]				[%]	
150/90/150	1. S.	83,1	92,3	98,8	183,8	100,0	6,2	7,2	7,9	14,3	100,0	101,1	122,2	123,9	189,4	100,0	
	2. S.	81,5	91,5	125,1			6,6	7,1	10,8			66,3	67,1	78,0			
200/90/150	1. S.	70,7	100,9	123,5	225,7	122,8	5,2	6,7	8,3	14,1	98,3	109,6	119,4	124,5	182,8	96,5	
	2. S.	123,1	124,8	134,9			6,6	7,3	7,4			55,3	63,4	71,2			
400/90/150	1. S.	134,5	145,9	177,2	299,7	163,0	6,7	7,7	9,1	23,6	165,1	132,8	157,6	163,3	325,3	171,8	
	2. S.	151,5	153,8	157,5			14,6	16,0	17,1			137,1	167,7	178,0			
150/0/150	1. S.	87,8	91,2	92,6	174,5	94,9	8,1	10,6	11,0	18,1	126,3	143,6	152,9	159,0	214,5	113,3	
	2. S.	76,3	83,3	90,6			5,8	7,5	7,9			59,5	61,6	64,8			
150/60/150	1. S.	104,8	109,1	123,3	185,2	100,7	7,2	8,9	9,8	14,5	101,2	139,9	151,7	160,3	208,8	110,3	
	2. S.	75,0	76,1	76,6			5,5	5,6	6,6			54,2	57,2	60,8			
150/90/150	1. S.	83,1	92,3	98,8	183,8	100,0	6,2	7,2	7,9	14,3	100,0	101,1	122,2	123,9	189,4	100,0	
	2. S.	81,5	91,5	125,1			6,6	7,1	10,8			66,3	67,1	78,0			
150/180/ 150	1. S.	80,6	92,5	93,9	173,4	94,3	7,7	8,6	9,5	15,7	109,6	118,7	137,3	148,3	204,2	107,8	
	2. S.	75,2	80,9	91,4			6,0	7,1	7,4			60,5	66,8	78,7			
150/270/ 150	1. S.	66,0	69,4	72,8	147,2	80,0	7,7	8,6	8,9	14,8	103,1	121,4	134,0	137,7	197,7	104,4	
	2. S.	66,2	77,8	83,5			5,1	6,1	7,3			58,0	63,7	93,4			
50/90/150	1. S.	52,7	59,6	89,1	136,6	74,3	8,7	9,0	9,2	15,9	111,1	115,6	127,0	149,2	198,8	105,0	
	2. S.	68,9	77,0	83,8			6,7	6,9	7,4			61,5	71,8	78,1			
100/180/ 150	1. S.	92,1	97,0	110,4	178,8	97,3	10,1	10,9	11,5	17,6	122,9	148,8	156,6	161,3	220,6	116,5	
	2. S.	78,1	81,8	91,7			5,9	6,7	7,4			59,8	64,0	66,6			
200/360/ 150	1. S.	115,9	121,9	130,7	210,7	114,6	8,6	9,8	13,0	16,9	118,3	157,9	172,7	191,7	233,8	123,5	
	2. S.	80,1	88,8	95,8			6,9	7,2	8,6			53,7	61,1	65,0			

#### 4.1.2.5 Schwermetallgehalte in dem Pflanzenaufwuchs

Die Gesamtgehalte der Schwermetalle Pb, Cd, Cr und Ni in dem Knaulgrasaufwuchs (n = 1) zu den beiden Schnittterminen auf dem Boden Welzow sind in Tabelle 41 und auf dem Boden Zinnitz in Tabelle 42 dargestellt. Die Schwermetallgehalte im Aufwuchs aller Varianten auf beiden Böden sind im gesamten Versuchszeitraum sehr gering. Die Grenzwerte der FuttMV (1981) für Pb (45 mg/kg TS) und Cd (1,1 mg/kg TS) werden deutlich unterschritten. In dem Aufwuchs des zweiten Schnittes 2103 sind tendenziell höhere Ni- und Cr-Gehalte im Vergleich zu dem ersten Schnitt festzustellen. Für die Elemente Ni und Cr gibt es aktuell keine Grenzwerte in Grünfütter.

Tabelle 41: Gesamtgehalte der Schwermetalle Pb, Cd, Cr und Ni des Knaulgrasaufwuchses auf dem Boden Welzow zu den beiden Ernteterminen (KW-Auszug; n = 1)

Parameter	Termin	[mg/kg TS]			
		Pb	Cd <sup>1)</sup>	Cr	Ni <sup>1)</sup>
30 BKS15	1. S.	0,3	0,06	0,8	< 1
	2. S.	0,3	< 0,5	1,7	1,4
60 BKS15	1. S.	0,2	0,05	0,2	< 1
	2. S.	0,3	< 0,5	1,4	1,2
90 BKS15	1. S.	0,2	0,03	0,6	< 1
	2. S.	0,3	< 0,5	1,2	1,7
120 BKS15	1. S.	0,3	0,04	0,5	< 1
	2. S.	0,3	< 0,5	1,2	1,0
240 BKS15	1. S.	0,2	0,04	0,5	< 1
	2. S.	0,9	< 0,5	3,3	2,3
30 BKS30	1. S.	0,5	0,06	0,9	1,2
	2. S.	0,2	< 0,5	1,9	1,6
60 BKS30	1. S.	0,3	0,06	0,5	< 1
	2. S.	0,3	< 0,5	1,2	1,1
90 BKS30	1. S.	0,2	0,04	0,6	< 1
	2. S.	0,4	< 0,5	1,4	1,1
120 BKS30	1. S.	0,2	0,05	0,2	< 1
	2. S.	0,6	< 0,5	1,5	1,1
50/90/150	1. S.	0,2	0,06	0,2	< 1
	2. S.	0,5	< 0,5	2,4	1,7
100/180/150	1. S.	0,1	0,05	1,5	< 1
	2. S.	0,3	< 0,5	1,6	1,5
150/270/150	1. S.	0,2	0,05	0,5	1,2
	2. S.	0,3	< 0,5	1,2	1,6
200/360/150	1. S.	0,1	0,05	0,6	< 1
	2. S.	0,5	< 0,5	2,2	1,6

<sup>1)</sup> Bestimmungsgrenze < 0,5 (Cd) bzw. < 1 (Ni)

Tabelle 42: Gesamtgehalte der Schwermetalle Pb, Cd, Cr und Ni des Knaulgras-aufwuchses auf dem Boden Zinnitz zu den beiden Ernteterminen (KW-Auszug; n = 1)

Parameter	Termin	Pb	Cd <sup>1)</sup>	Cr	Ni <sup>1)</sup>
30 BKS15	1. S.	0,2	0,08	1,3	< 1
	2. S.	0,6	< 0,5	1,9	1,0
60 BKS15	1. S.	0,1	0,07	1,3	< 1
	2. S.	0,6	< 0,5	1,9	1,3
90 BKS15	1. S.	0,2	0,09	0,9	< 1
	2. S.	0,6	< 0,5	1,6	1,0
120 BKS15	1. S.	0,2	0,08	1,3	< 1
	2. S.	0,5	< 0,5	1,3	< 1
240 BKS15	1. S.	0,2	0,07	0,7	< 1
	2. S.	0,6	< 0,5	1,1	0,9
30 BKS30	1. S.	0,2	0,05	1,1	< 1
	2. S.	0,5	< 0,5	1,6	1,2
60 BKS30	1. S.	0,2	0,06	0,6	< 1
	2. S.	0,8	< 0,5	2,1	1,7
90 BKS30	1. S.	0,3	0,09	0,6	< 1
	2. S.	0,8	< 0,5	2,1	1,2
120 BKS30	1. S.	0,3	0,07	0,2	< 1
	2. S.	0,5	< 0,5	1,7	1,1
50/90/150	1. S.	0,1	0,13	0,8	< 1
	2. S.	0,5	< 0,5	1,8	1,8
100/180/150	1. S.	0,2	0,16	1,1	< 1
	2. S.	0,6	< 0,5	1,9	1,4
150/270/150	1. S.	0,2	0,12	1,1	< 1
	2. S.	0,6	< 0,5	1,5	0,9
200/360/150	1. S.	0,1	0,16	1,0	< 1
	2. S.	0,6	< 0,5	1,6	1,2

<sup>1)</sup> Bestimmungsgrenze < 0,5 (Cd) bzw. < 1 (Ni)

Für eine ungefähre Einordnung kann die BioAbfV (2012) § 4 Abs. 3 hinzugezogen werden. Diese Grenzwerte gelten allerdings in Bezug auf die Ausbringung von pflanzlichen Reststoffen. Bei der Ausbringung von < 30 t TM/ha × 3a gelten reduzierte Schwermetallgrenzwerte: Pb 100 mg/kg TS, Cd 1,0 mg/kg TS, Cr 70 mg/kg TS, Ni 35 mg/kg TS, Cu 70 mg/kg TS und Zn 300 mg/kg TS (BioAbfV (2012), §4 Abs. 3 gemäß § 6 Abs. 1 Satz 2). Die festgestellten Cr- und Ni-Gehalte sind bei einer Einordnung nach der BioAbfV (2012) als gering einzuschätzen. Die Schwermetalle Cu und Zn sind als Spurennährstoffe im Kapitel 4.2.3.3 aufgeführt. Der Einordnung entsprechend der BioAbfV (2012) sind die Cu- und Ni-Gehalte in dem Knaulgrasaufwuchs als gering einzuordnen.

## 4.2 Gefäßversuch II

### 4.2.1 Eigenschaften der Biokohlesubstrate Q1 bis Q15

Die Biokohlesubstrate (BKS) weisen aufgrund der unterschiedlichen Inputstoffe und Produktionsparameter eine große Variation ihrer Eigenschaften auf (Tabelle 43). Der pH-Wert der BKS liegt im Schwankungsbereich von 5,7 und 8,0. Die pH-Werte der BKS mit Braunkohle (BrK) liegen unterhalb der Mittelwerte 7,0 - 8,3 für das Land Brandenburg (LAGA, 1995).

Die BKS mit BrK weisen ein etwas weiteres C/N-Verhältnis (17 - 31) als die BKS mit BK (14 - 23) auf, was auf den höheren Masseanteil der Braunkohle durch die volumetrische Abmessung zurückzuführen ist. Eine Ausnahme bildet das BKS Q9. Hier ist das C/N-Verhältnis enger (17), da durch das GPMII der N<sub>t</sub>-Gehalt im BKS erhöht wird. Die BKS mit Kompost (1,1 - 1,5 M.-% N<sub>t</sub>) weisen in der Regel geringere N<sub>t</sub>-Gehalte auf als die BKS mit dem Inputstoff Gewässerpflegematerial (GPM) des Rottegrades II und IV (1,5 - 1,8 M.-%). Letztere liegen teilweise oberhalb des üblichen Schwankungsbereichs von 0,8 - 1,5 M.-% (LAGA, 1995). Die höheren N<sub>t</sub>-Gehalte in dem GPM, welches hauptsächlich aus schilffartige Biomasse besteht, sind auf die mineralische Düngung (Kompostbeschleuniger) zur Förderung der zurückzuführen (s. Kapitel 3.2.2.1). Der S<sub>t</sub>-Gehalt schwankt im Bereich von 0,3 bis 1,9 M.-%. Nur die BKS Q1, Q2, Q10, Q11 und Q12 (Inputstoffe Biokohle und Kompost) liegen mit 0,3 M.-% S<sub>t</sub> innerhalb der üblichen Spanne von 0,1 - 0,5 % TS (Gutser und Ebertseder, 2002) für Bioabfallkomposte. Der S<sub>t</sub>-Gehalt steigt bei der Substitution des Laubkompostes durch GPM (II und IV) an. Die Substitution der Biokohle mit Braunkohle erhöht ihn abermals. Die BKS mit dem Zuschlagstoff Gips erreichen die höchsten S<sub>t</sub>-Gehalte.

Die P-Gesamtgehalte der BKS (Tabelle 44) liegen im Rahmen der Mittelwerte von 0,4 - 1,0 % TS P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> bzw. 0,2 - 0,4 % TS P für das Land Brandenburg (LAGA, 1995). Lediglich die BKS mit dem Zuschlagstoff Silage mit 0,5 M.-% P überschreiten diese Spanne (LAGA, 1995). Die BKS mit Braunkohle weisen etwas geringere K-Gesamtgehalte auf, die den Mittelwertbereich von 0,6 - 1,5 % TS K<sub>2</sub>O bzw. 0,5 - 1,3 % TS K (LAGA, 1995) leicht unterschreiten. Die übrigen BKS befinden sich im oberen Teil dieses Bereiches (LAGA, 1995) bzw. leicht darüber. Die Cu- und Zn-Gehalte liegen größtenteils unterhalb der Medianwerte von Komposten im Land Brandenburg (LUA, 2001). Alle BKS erfüllen in Hinblick auf die Cu- und Zn-Gehalte die Aufbringungsgrenzwerte der BioAbfV (2012).

Tabelle 43: Eigenschaften der eingesetzten BKS Q1 bis BKS Q15

Parameter	pH	N <sub>min</sub>	C <sub>org</sub>	N <sub>t</sub>	C/N-	S <sub>t</sub>	elektr. LF	KAK <sub>pot</sub>	K <sub>DL</sub>	P <sub>DL</sub>
BKS   Kurzbeschreibung <sup>1)</sup>	(CaCl <sub>2</sub> )	[mg/kg]	[M.-%]	[M.-%]	Verhält.	[M.-%]	[μS/cm]	[cmol <sub>c</sub> /kg]	[mg/kg]	[mg/kg]
Q1   15%BK	7,9	23	23,8	1,4	17	0,3	4,32	54,0	10737	1480
Q2   30%BK	7,4	893	30,8	1,5	20	0,3	5,12	52,3	10599	1410
Q3   15%BrK	6,2	1104	28,9	1,3	22	0,5	5,38	53,1	9258	1180
Q4   30%BrK	5,8	729	35,1	1,1	31	0,6	4,07	51,0	7078	823
Q5   15%BK+0,5kgGips	7,1	550	21,9	1,4	16	1,2	8,06	43,2	9515	1450
Q6   15%BK+1kgGips	7,1	696	16,6	1,3	13	1,9	n. b.	41,8	10300	1410
Q7   15%BrK+0,5kgGips	6,2	796	25,0	1,2	21	1,3	n. b.	45,5	8190	1090
Q8   15%BK+GPMII	7,3	69	22,4	1,6	14	0,7	n. b.	73,2	9880	765
Q9   15%BrK+GPMII+0,5kgGips	5,7	1869	24,6	1,5	17	1,8	n. b.	55,5	6080	546
Q10   30%BK H1T2	8,0	159	27,2	1,2	22	0,3	n. b.	45,9	11200	1560
Q11   30%BK H2T1	8,0	109	27,9	1,3	21	0,3	n. b.	49,9	10900	1410
Q12   30%BK H2T2	8,0	140	28,5	1,2	23	0,3	4,70	48,3	13053	1460
Q13   15%BK+GPMII+Sil	7,2	834	30,8	1,8	17	0,7	7,55	60,2	11035	716
Q14   15%BK+GPMIV+Sil	7,3	399	26,0	1,6	16	0,6	6,07	72,3	9713	672
Q15   15%BK+GPMIV+Sil H2T1	7,3	318	24,2	1,7	14	0,6	n. b.	70,6	10700	409

<sup>1)</sup> Es sind nur die Abweichungen von den Standardfermentationsparametern H1T1 angegeben: Fermentationsdauer: H1 = 2 Wochen; H2 = 4 Wochen; Fermentationstemperatur: T1 = 25 - 30 °C; T2 = 35 - 40 °C.

Tabelle 44: Gesamtgehalte nach Königswasseraufschluss der BKS Q1 bis BKS Q15

Parameter BKS	Kurzbeschreibung <sup>1)</sup>	P		K		Cu <sup>2)</sup>	Zn <sup>3)</sup>
		[mg/kg]	[%]	[mg/kg]	[%]	[mg/kg]	[mg/kg]
Q1	15%BK	2620	0,3	11400	1,1	69,0	204,4
Q2	30%BK	2660	0,3	12400	1,2	44,7	198,5
Q3	15%BrK	2230	0,2	11200	1,1	32,0	158,9
Q4	30%BrK	1710	0,2	8120	0,8	22,9	118,7
Q5	15%BK+0,5kg Gips	2750	0,3	12200	1,2	42,9	187,2
Q6	15%BK+1kg Gips	2530	0,3	10700	1,1	37,4	243,2
Q7	15%BrK+0,5kg Gips	2000	0,2	9300	0,9	28,0	147,4
Q8	15%BK+GPMII	4380	0,4	10800	1,1	21,8	86,7
Q9	15%BrK+GPMII+0,5kg Gips	3220	0,3	6930	0,7	14,9	51,5
Q10	30%BK H1T2	2740	0,3	14200	1,4	43,4	196,3
Q11	30%BK H2T1	2570	0,3	13000	1,3	43,3	182,3
Q12	30%BK H2T2	2670	0,3	13500	1,4	58,5	185,9
Q13	15%BK+GPMII+Sil	4630	0,5	12800	1,3	22,9	93,1
Q14	15%BK+GPMIV+Sil	4730	0,5	11400	1,1	21,9	89,8
Q15	15%BK+GPMIV+Sil H2T1	4980	0,5	13000	1,3	19,7	87,5

<sup>1)</sup> Es sind nur die Abweichungen von den Standardfermentationsparametern H1T1 angegeben: Fermentationsdauer: H1 = 2 Wochen; H2 = 4 Wochen; Fermentationstemperatur: T1 = 25 - 30 °C; T2 = 35 - 40 °C; <sup>2),3)</sup> (BioAbfV, 2012): Aufbringungsgrenzwerte gemäß § 4 Abs. 3 (gemäß § 6 Abs. 1 Satz 2) für <sup>2)</sup> 100(70) mg/kg und <sup>3)</sup> 400(300) mg/kg

Die Bestimmung der löslichen C- und N-Fractionen (Tabelle 45) erfolgt an ausgewählten BKS (Q1 - Q5, Q12 - Q14). Die Erhöhung des Kohleanteils von 15 auf 30 % führt zu geringeren Gehalten der gemessenen C-Fractionen und des  $N_{\text{pyro}}$  (Q1 vs. Q2 bzw. Q3 vs. Q4). Der heißwasserlösliche N ( $N_{\text{hwl}}$ ) nimmt mit der Erhöhung des Biokohleanteils zu (Q1 vs. Q2), während eine Erhöhung des Braunkohleanteils zu einer Reduzierung des  $N_{\text{hwl}}$  führt (Q3 vs. Q4). Insgesamt sind die Gehalte der löslichen C- und N-Fractionen (Ausnahme  $C_{\text{pyro}}$  Q2 vs. Q4) in den BKS mit BK (Q1, Q2) höher als in den BKS, in denen die Biokohle mit Braunkohle substituiert wird (Q3, Q4). Der Zusatz von Gips bewirkt eine Reduzierung der Gehalte der löslichen C- und N-Fractionen mit Ausnahme des  $N_{\text{hwl}}$ , der tendenziell erhöht wird (Q5 vs. Q1). Die Veränderung der Fermentationsparameter zieht eine zum Teil sehr deutliche Zunahme der Gehalte der löslichen C-Fractionen und eine Reduzierung der Gehalte der löslichen N-Fractionen nach sich (Q12 vs. Q2). Die Substitution des Laubkompostes mit GPM und Silage in den BKS führt zu einer Reduzierung der  $C_{\text{wl}}$ - und  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte und einer Erhöhung der  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte (Q13 und Q14 vs. Q1). Das BKS mit GPMIV (Q13) erhöht die Gehalte der C-Fractionen und senkt die Gehalte der N-Fractionen im Vergleich zu dem BKS mit GPMII (Q14).

Tabelle 45: Lösliche C- und N-Fractionen ausgewählter BKS

Parameter		$C_{\text{wl}}$	$C_{\text{hwl}}$	$C_{\text{pyro}}$	$N_{\text{hwl}}$	$N_{\text{pyro}}$
BKS	Kurzbeschreibung <sup>1</sup>	[mg/kg]				
Q1	15%BK	3547	7991	17448	1177	2096
Q2	30%BK	2063	6890	13301	2063	1517
Q3	15%BrK	1585	4624	16307	1464	1218
Q4	30%BrK	1563	3258	14260	887	1017
Q5	15%BK+0,5kg Gips	1311	3921	14638	1319	1683
Q12	30%BK H2T2	4776	13261	15141	1893	1796
Q13	15%BK+GPMII+Sil	1466	5612	22174	1885	2238
Q14	15%BK+GPMIV+Sil	1557	5835	25039	1548	2076

<sup>1</sup> Es sind nur die Abweichungen von den Standardfermentationsparametern H1T1 angegeben: Fermentationsdauer: H1 = 2 Wochen; H2 = 4 Wochen; Fermentationstemperatur: T1 = 25 - 30 °C; T2 = 35 - 40 °C

## 4.2.2 Bodenparameter

### 4.2.2.1 Physikalische Bodenkennwerte

Abbildung 37 zeigt, dass die Trockenrohdichte ( $R_t$ ) beider Versuchsböden mit der Applikation der BKS im Vergleich zu der mineralischen Referenzvariante (150/90/150)



sinkt. Die Steigerung der Gabenhöhe von 30 auf 90 t/ha BKS führt zu einer weiteren Reduzierung der Trockenrohddichte. Die Substitution der Biokohle mit der Braunkohle (Q1 vs. Q3, Q2 vs. Q4) sowie die Erhöhung des Kohlegehaltes von 15 auf 30 Vol.-% in dem BKS (Q1 vs. Q2; Q3 vs. Q4) haben keinen Einfluss auf die Trockenrohddichte. Ebenso ist für den Zusatz des Gipses (Q5, Q6 vs. Q1 bzw. Q7, Q9 vs. Q3) und die Variation der Fermentationsparameter (Q10 - 12 vs. Q2) kein Einfluss auf die Trockenrohddichte festzustellen. Die Substitution des FK mit GPM (Q8) in den BKS, insbesondere mit dem Silagezusatz (Q13 -15) bewirken vor allem in dem Boden Zinnitz eine signifikante Reduzierung der Trockenrohddichte. In dem Boden Welzow ist dieser Effekt erkennbar aber nicht so deutlich ausgeprägt. In dem Boden Welzow weisen die Varianten MIN, Q1 und Q3 signifikant höhere Trockenrohddichten auf als die Variante Q13. Die Varianten MIN und Q3+N des Bodens Zinnitz weisen signifikant höhere Trockenrohddichten auf als die Varianten Q13, Q14 und Q15. Zudem ist die Trockenrohddichte der Variante MIN signifikant höher als die der Variante Q8.

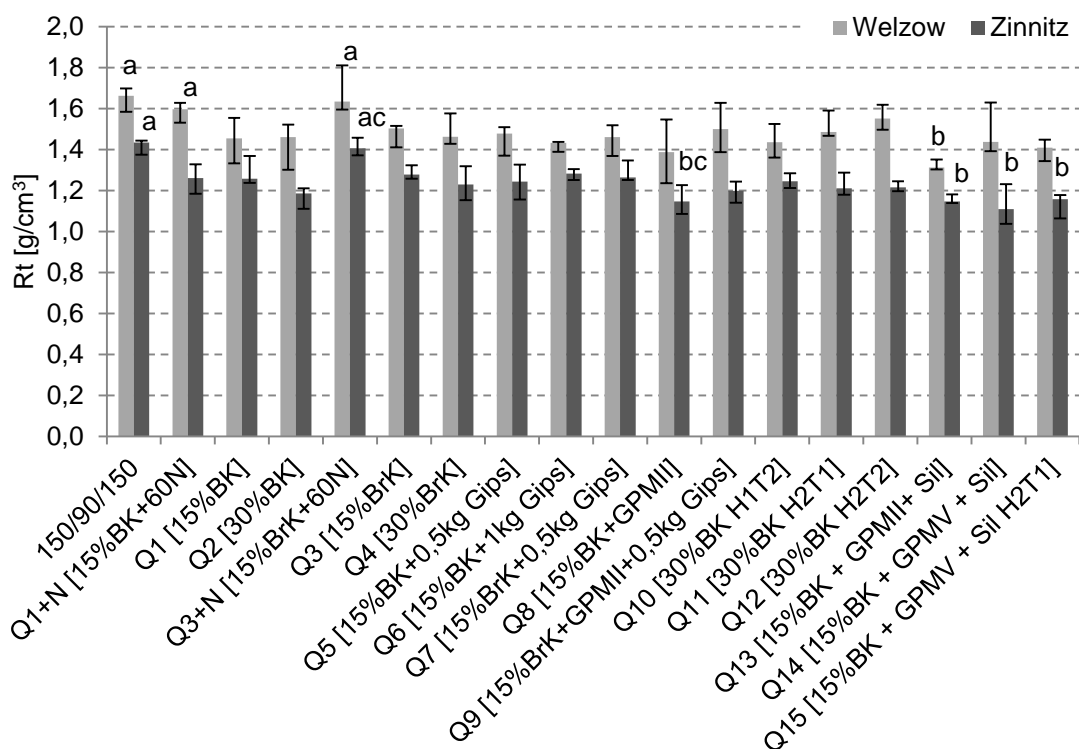


Abbildung 37: Trockenrohddichte (Rt) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; NEMENYI-Test p < 0,05)

Das Gesamtporenvolumen (GPV) wird durch die BKS-Gabe in beiden Böden erhöht (Abbildung 38). Das Gesamtporenvolumen des Bodens Welzow bewegt sich auf einem

geringen bis mittleren Niveau, während der Boden Zinnitz ein hohes bis sehr hohes Niveau aufweist (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Die Zunahme des Gesamtporenvolumens durch die BKS-Gabe ist in dem Boden Zinnitz stärker als in dem Boden Welzow. Die Erhöhung der BKS-Gabe von 30 auf 90 t/ha zeigt eine tendenzielle Steigerung des Gesamtporenvolumens (Ausnahme Boden Zinnitz (Q1+N vs. Q1)). Die Steigerung des Kohlegehaltes von 15 auf 30 Vol.-% führt in den Braunkohlevarianten vor allem in dem Boden Zinnitz zu einer stärkeren tendenziellen Erhöhung des Gesamtporenvolumens. Der Gipszusatz zeigt in beiden Böden keinen Effekt auf das Gesamtporenvolumen. Die Varianten, in denen der FK mit GPM substituiert und teilweise Silage als Zuschlagstoff verwendet wurde, weisen tendenzielle und auch signifikant erhöhte Gesamtporenvolumina auf. In dem Boden Welzow liegt ein signifikanter Unterschied zwischen der Variante Q13 und den Varianten 150/90/150, Q1+N und Q3+N vor. In dem Boden Zinnitz ist das Gesamtporenvolumen der Variante 150/90/150 signifikant geringer als das der Varianten Q2, Q8, Q13, Q14 und Q15. Darüber hinaus ist das Gesamtporenvolumen der Variante Q3+N signifikant geringer als das der Varianten Q14 und Q15.

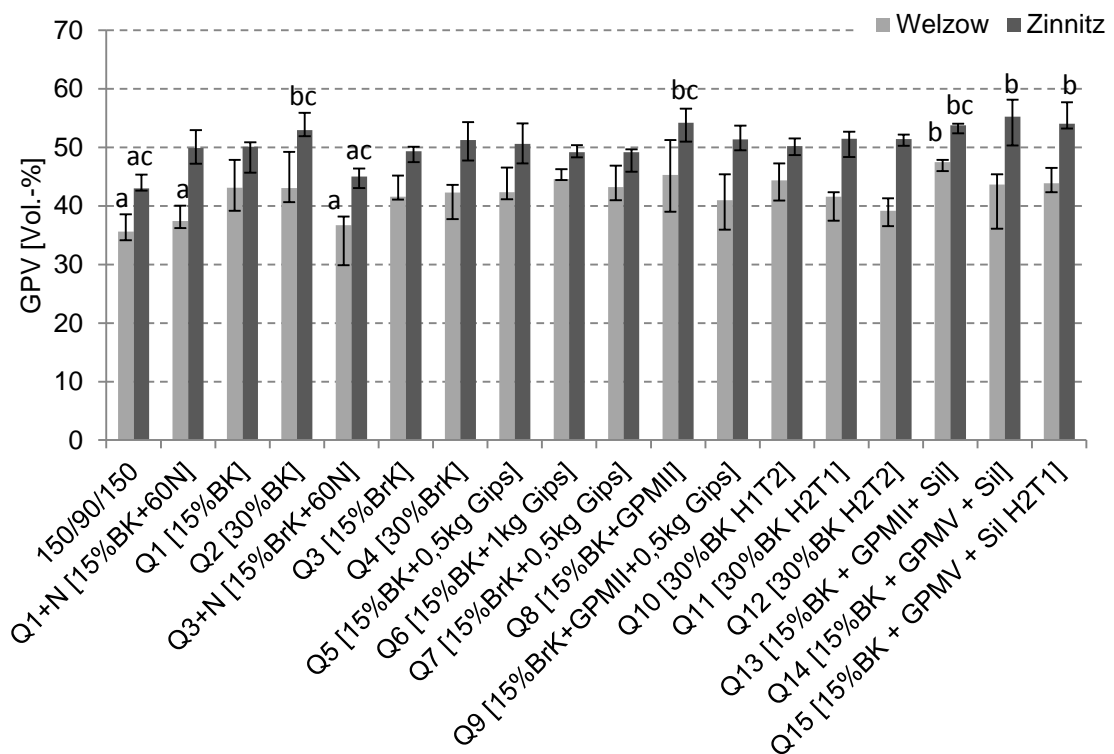


Abbildung 38: Gesamtporenvolumen (GPV) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; NEMENYI-Test p < 0,05)

Die Luftkapazität (LK) des Bodens Welzow (Abbildung 39) ist als hoch bis sehr hoch und die des Bodens Zinnitz als mittel bis sehr hoch einzuordnen (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Im Mittel weist der Boden Welzow eine höhere LK auf der Boden Zinnitz. Die LK wird durch die BKS-Applikation von 90 t/ha stärker erhöht als mit einer Gabenhöhe von 30 t/ha (Ausnahme Q1+N Zinnitz) im Vergleich zu der mineralischen Referenzvariante (150/90/150). Dementsprechend liegt für den Boden Welzow eine signifikant höhere LK in der Variante Q6 gegenüber den Varianten 150/90/150, Q1+N und Q3+N vor. In dem Boden Zinnitz ist die LK der Varianten Q8, Q14 und Q15 signifikant höher als die LK der Variante Q3+N. Zudem ist die LK der Variante Q14 auch signifikant höher als die LK der Variante 150/90/150. Eine eindeutige Aussage zu dem Einfluss der Inputstoffe der BKS auf die LK des Bodens lässt sich anhand der Daten nicht ableiten.

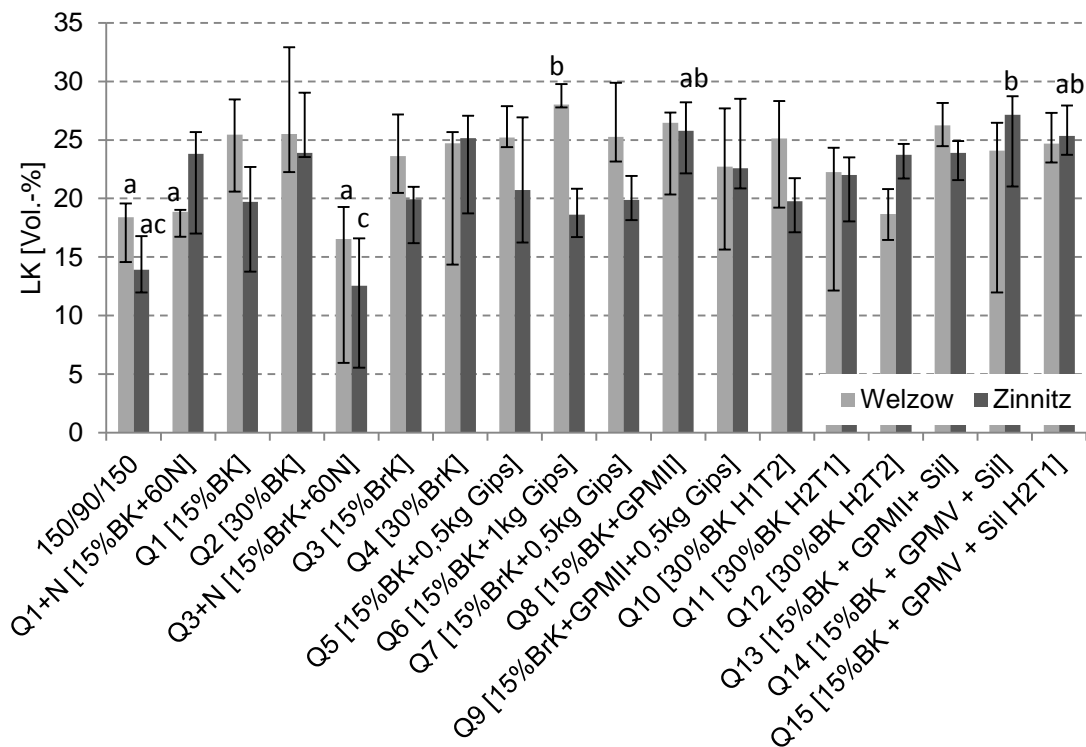


Abbildung 39: Luftkapazität (LK) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; NEMENYI-Test p < 0,05)

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) des Bodens Welzow (Abbildung 40) schwankt auf einem geringen bis mittleren Niveau, während für den Boden Zinnitz ein Niveau der nFK von mittel bis hoch festzustellen ist (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Die BKS-Applikation von 30 t/ha hat einen tendenziell erhöhenden Einfluss (Ausnahme Q1+N Zinnitz) auf die nFK im Vergleich zu der mineralischen Referenzvariante. Eine weitere

Steigerung der Gabenhöhe auf 90 t/ha sowie die Steigerung der Bio- und Braunkohleanteile von 15 auf 30 Vol.-% wirken tendenziell reduzierend auf die nFK (Q1+N, Q1, Q2 bzw. Q3+N, Q3, Q4 vs. 150/90/150). Die Veränderung der Fermentationsparameter (Q10, Q11, Q12 vs. Q2) zeigt tendenziell erhöhende Effekte in beiden Böden. Der Zusatz von Gips zu dem BKS (Q5, Q6 vs. Q1, Q7 vs. Q3) bewirkt eine tendenziell geringere nFK in dem Boden Welzow. Signifikante Unterschiede liegen in dem Boden Zinnitz nur zwischen der Variante Q3+N und Q7 vor.

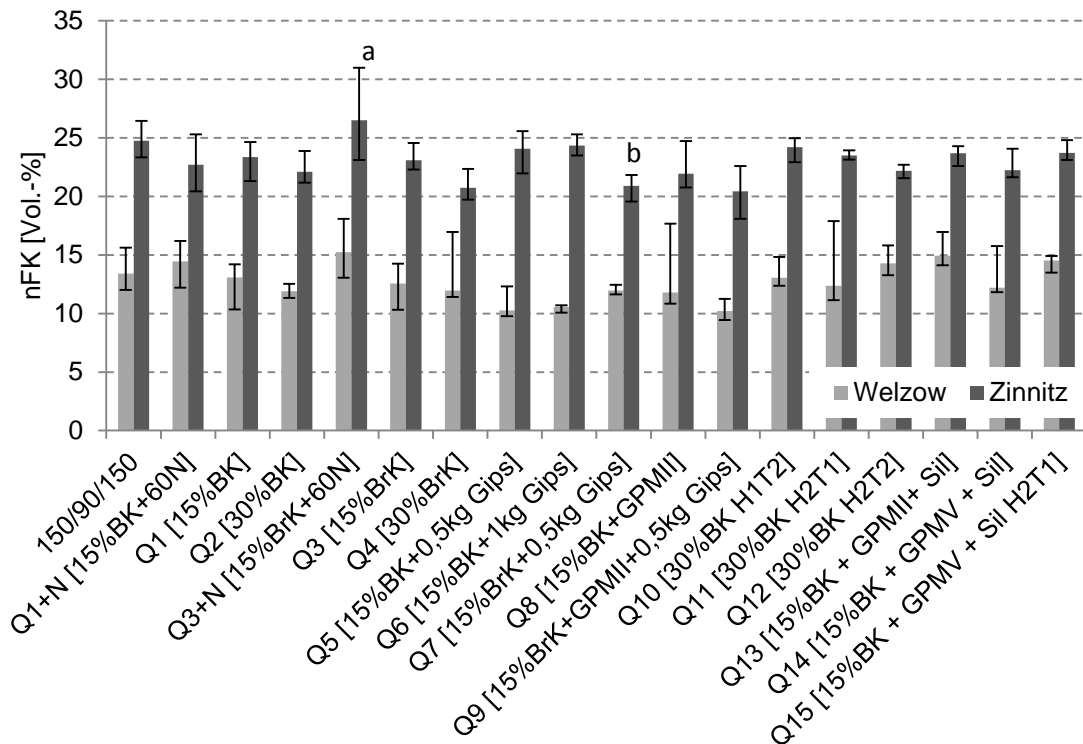


Abbildung 40: Nutzbare Feldkapazität (nFK) der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; NEMENYI-Test p < 0,05)

Der Totwassergehalt (Abbildung 41) beider Böden und aller Varianten ist nach Ad-Hoc-AG Boden (2005) als gering einzuordnen. Die Applikation von BKS bewirkt eine Erhöhung des Totwassergehaltes gegenüber der mineralischen Referenzvariante in beiden Versuchsböden. Die Steigerung der Gabenhöhe von 30 auf 90 t/ha erzeugt eine weitere Erhöhung des Totwassergehaltes. Der Totwassergehalt des Bodens Welzow wird um bis zu 3,6 Vol.-% und der des Bodens Zinnitz um bis zu 3,0 Vol.-% gesteigert. In dem Boden Welzow führen die BKS mit BrK (Q3+N, Q3, Q4) zu höheren Totwassergehalten als die BKS mit BK (Q1+N, Q1, Q2). In dem Boden Zinnitz sind die Totwassergehalte der BKS mit BrK nur in den Varianten Q3+N, Q4 höher als die der vergleichbaren BKS mit BK (Q1+N, Q2). Die Erhöhung des Kohleanteils von 15 auf

30 Vol.-% bewirkt einen tendenziellen Rückgang des Totwassergehaltes (Q1 vs. Q2, Q3 vs. Q4). Der Zusatz von 0,5 kg Gips wirkt in dem Boden Welzow erhöhend auf den Totwassergehalt (Q5 vs. Q1). Allerdings reduziert eine weitere Erhöhung des Gipszusatzes auf 1 kg (Q6 vs. Q5) den Totwassergehalt im Boden Welzow. In dem Boden Zinnitz senkt der Gipszusatz von 0,5 kg (Q5 vs. Q1) den Totwassergehalt. Bei der weiteren Erhöhung des Gipszusatzes auf 1 kg führt dies zu einer Erhöhung des Totwassergehaltes (Q6 vs. Q5). Die Veränderung der Fermentationsparameter (Q10, Q11, Q12 vs. Q2) zeigt in beiden Böden keine eindeutigen Effekte.

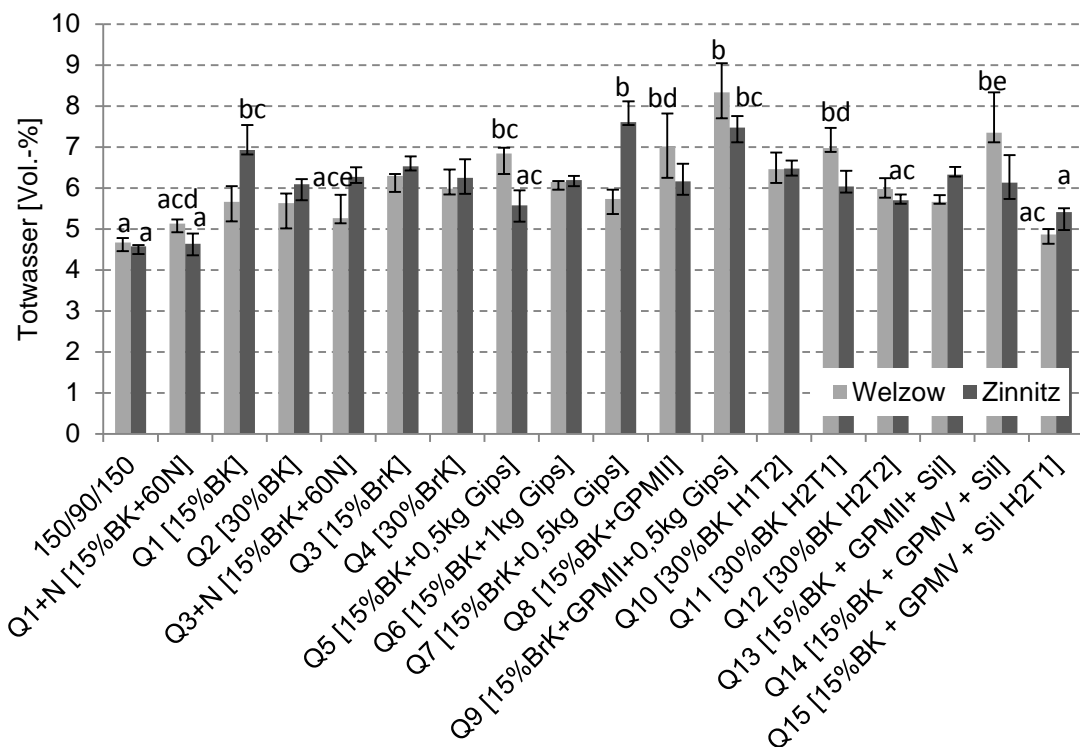


Abbildung 41: Totwasser der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 4, Median, Min., Max., unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Böden; Varianten ohne Kleinbuchstaben sind nicht signifikant; NEMENYI-Test p < 0,05)

Für den Boden Welzow liegt ein signifikant höherer Totwassergehalt in den Varianten Q5, Q8, Q9, Q11 und Q14 gegenüber der mineralischen Referenzvariante 150/90/150 vor (Abbildung 41). Zudem ist der Totwassergehalt der Variante Q15 signifikant geringer als der der Varianten Q8, Q9, Q11 und Q14. Die Variante Q1+N weist einen signifikant geringeren Totwassergehalt auf als die Varianten Q9 und Q14. Der Totwassergehalt der Variante Q3+N ist signifikant geringer als der Variante Q9. Die mineralische Referenzvariante 150/90/150 und die Variante Q1+N des Bodens Zinnitz weisen signifikant geringere Totwassergehalte auf als die Varianten Q1, Q7 und Q9. Ebenso signi-

fikant geringere Totwassergehalte als die der Variante Q7 liegen in den Varianten Q5, Q12 und Q15 vor. Der Totwassergehalt der Variante Q15 ist zudem signifikant geringer als der der Variante Q9.

#### 4.2.2.2 Chemische Bodenkennwerte

Der Boden Welzow weist bereits in der mineralischen Referenzvariante (150/90/150) einen hohen pH-Wert auf (Tabelle 46). Dieser wird durch die Applikation der BKS nicht beeinflusst bzw. tendenziell leicht abgesenkt. Die Basensättigung des Bodens Welzow beträgt in der mineralischen Variante 100 %. In den Varianten (Q1+N, Q1, Q2, Q3 - Q5) ist die Basensättigung reduziert auf ein basenreiches Niveau (Ad-Hoc-AG Boden, 2005).

Tabelle 46: Chemische Kennwerte des Bodens Welzow zum Versuchsende (n = 1)

Variante <sup>1)</sup>	pH	BS <sup>2)</sup> [%]	KAK <sub>pot</sub> [cmol <sub>c</sub> /kg]	elektr. LF [μS/cm]
150/90/150	7,5	100,0	4,1	122
Q1+N [15%BK+60N]	7,4	62,8	4,4	129
Q1 [15%BK]	7,4	80,9	5,4	137
Q2 [30%BK]	7,5	75,4	5,2	116
Q3+N [15%BrK+60N]	7,4	100,0	4,5	104
Q3 [15%BrK]	7,3	75,8	5,4	114
Q4 [30%BrK]	7,1	74,7	5,9	103
Q5 [15%BK+0,5kg Gips]	7,4	81,7	4,9	163
Q6 [15%BK+1kg Gips]	7,5	100,0	5,0	542
Q7 [15%BrK+0,5kg Gips]	7,3	100,0	5,4	154
Q8 [15%BK+GPMII]	7,3	100,0	6,1	146
Q9 [15%BrK+GPMII+0,5kg Gips]	7,2	100,0	6,3	241
Q10 [30%BK H1T2]	7,3	100,0	5,0	133
Q11 [30%BK H2T1]	7,4	100,0	5,6	147
Q12 [30%BK H2T2]	7,4	100,0	4,6	125
Q13 [15%BK+GPMII+Sil]	7,3	100,0	7,1	158
Q14 [15%BK+GPMV+Sil]	7,4	100,0	5,4	132
Q15 [15%BK+GPMV+Sil H2T1]	7,3	100,0	6,4	171

<sup>1)</sup> BKS-Applikationsmenge 90 t/ha, ausgenommen die Varianten mit mineralischer N-Ergänzung 30 t/ha. Es sind nur die Abweichungen von den Standardfermentationsparametern H1T1 angegeben: Fermentationsdauer: H1 = 2 Wochen; H2 = 4 Wochen; Fermentationstemperatur: T1 = 25 - 30 °C; T2 = 35 - 40 °C.

<sup>2)</sup> Formel:  $BS = (T\text{-Wert} - H\text{-Wert}) / T\text{-Wert} * 100$ .

Die weiteren Varianten weisen ebenfalls eine Basensättigung von 100 % auf. Das Niveau der KAK<sub>pot</sub> verbleibt in allen Varianten auf einem geringen Niveau (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Die BKS mit Braunkohle (Q3+N - Q4) erhöhen die KAK<sub>pot</sub> stärker als die BKS mit Biokohle (Q1+N - Q2). Durch die Erhöhung der Fermentationstemperatur (Q10) bzw. Verlängerung der Fermentationsdauer (Q11) wird die KAK<sub>pot</sub> ebenfalls ge-

steigert. Die Veränderung beider Parameter (Q12) ergibt keine Veränderung der  $KAK_{pot}$  im Vergleich zu Variante Q2. Der Zusatz von Gips bewirkt eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit im Boden (Q5 - Q7 vs. Q1 bzw. Q3).

In dem Boden Zinnitz bewirkt die Applikation der BKS eine Erhöhung des pH-Wertes, der  $KAK_{pot}$ , der Basensättigung und der elektrischen Leitfähigkeit (Ausnahme Q3+N) (Tabelle 47). Die Basensättigung aller Varianten bewegt sich im Bereich von mittelbasisch bis basenreich während die  $KAK_{pot}$  aller Varianten als gering bis mittel einzuschätzen ist (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Die Erhöhung der  $KAK_{pot}$  und der Basensättigung sind in den Varianten mit Braunkohle (Q3+N - Q4) stärker als in den Varianten mit Biokohle (Q1+N - Q2). Die Verlängerung der Fermentationsdauer und die Erhöhung der Fermentationstemperatur der BKS ergeben eine Erhöhung der  $KAK_{pot}$  und der elektrischen LF (Q10 - Q12 vs. Q2). Der Zusatz von Gips (Q5 - Q7 vs. Q1 bzw. Q3) bewirkt eine Zunahme der  $KAK_{pot}$  und der elektrischen Leitfähigkeit (Ausnahme Q5) im Boden. Die elektrische LF und die  $KAK_{pot}$  erhöhen sich auch bei dem Austausch des Laubkompostes gegen GPMII (Q9 vs. Q7). Der Zusatz der Silage bewirkt zudem eine Erhöhung der elektrischen LF (Q13 - Q15 vs. Q8).

Tabelle 47: Chemische Kennwerte des Bodens Zinnitz zum Versuchsende (n = 1)

Variante <sup>1)</sup>	pH	BS [%]	$KAK_{pot}$ [cmol/kg]	elektr. LF [ $\mu$ S/cm]
150/90/150	5,5	37,4	5,3	57
Q1+N [15%BK+60N]	6,0	56,8	5,6	68
Q1 [15%BK]	6,4	68,9	6,4	79
Q2 [30%BK]	6,5	71,6	6,7	67
Q3+N [15%BrK+60N]	5,9	45,3	6,6	52
Q3 [15%BrK]	6,1	55,1	7,8	117
Q4 [30%BrK]	5,6	44,3	7,4	82
Q5 [15%BK+0,5kg Gips]	6,4	68,9	7,4	66
Q6 [15%BK+1kg Gips]	6,4	73,4	7,1	340
Q7 [15%BrK+0,5kg Gips]	5,9	58,4	8,4	273
Q8 [15%BK+GPMII]	6,4	51,2	7,0	77
Q9 [15%BrK+GPMII+0,5kg Gips]	5,8	59,7	9,7	88
Q10 [30%BK H1T2]	6,5	68,3	7,6	110
Q11 [30%BK H2T1]	6,7	82,6	7,5	109
Q12 [30%BK H2T2]	6,7	82,4	7,4	135
Q13 [15%BK+GPMII+Sil]	6,4	63,3	8,2	126
Q14 [15%BK+GPMV+Sil]	6,6	66,8	8,7	144
Q15 [15%BK+GPMV+Sil H2T1]	6,5	51,1	7,0	101

<sup>1)</sup> BKS-Applikationsmenge 90 t/ha, ausgenommen die Varianten mit mineralischer N-Ergänzung 30 t/ha. Es sind nur die Abweichungen von den Standardfermentationsparametern H1T1 angegeben: Fermentationsdauer: H1 = 2 Wochen; H2 = 4 Wochen; Fermentationstemperatur: T1 = 25 - 30 °C; T2 = 35 - 40 °C.

Zudem erfolgte zum Versuchsabschluss die Bestimmung der alkalischen Phosphatase und der Netto-N-Mineralisation an ausgewählten Varianten (Tabelle 48). Die BKS-Applikation steigert in beiden Böden deutlich die Aktivität der alkalischen Phosphatase gegenüber der mineralisch gedüngten Referenz. Auch ist das Niveau in dem Boden Welzow deutlich höher als in dem Boden Zinnitz. Die höchsten Werte erreicht in beiden Böden die BKS-Variante Q13 mit 300 (W) bzw. 206 (Z)  $\mu\text{g/p-NP g TS} \times \text{h}$ . Die Netto-N-Mineralisation ist in beiden Böden sehr gering. Teilweise wird N immobilisiert.

Tabelle 48: Alkalische Phosphatase und Netto-N-Mineralisation ausgewählter Varianten der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1)

Variante	alkalische Phosphatase [ $\mu\text{g/p-NP g TS} \times \text{h}$ ]	Netto-N-Mineralisation [ $\mu\text{g /Netto-N g} \times \text{d}$ ]
Welzow		
150/90/150	91	0,02
Q1 [15%BK]	138	0,01
Q3 [15%BrK]	194	0,01
Q6 [15%BK+1kg Gips]	224	0,00
Q13 [15%BK+GPMII+Sil]	300	-0,01
Zinnitz		
150/90/150	12	-0,08
Q1 [15%BK]	118	0,01
Q3 [15%BrK]	123	-0,01
Q6 [15%BK+1kg Gips]	121	-0,03
Q13 [15%BK+GPMII+Sil]	206	0,01

Anhand der Abbildung 42 wird deutlich, dass der  $C_{\text{org}}$ -Gehalt des Bodens Welzow auf einem geringeren Niveau liegt als der des Bodens Zinnitz. Die Applikation von BKS erhöht in allen geprüften Varianten den  $C_{\text{org}}$ -Gehalt über das Niveau der mineralischen Referenzvariante (150/90/150). Der  $C_{\text{org}}$ -Gehalt des Bodens Welzow nimmt mit Erhöhung der BKS-Menge (Q1+N vs. Q1 bzw. Q3+N vs. Q3) und des Kohleanteils (Q2 vs. Q1 bzw. Q4 vs. Q3) zu. Ein Gipszusatz von 0,5 kg (Q5 vs. Q1, Q7 vs. Q3) führt zu einer tendenziellen Erhöhung des  $C_{\text{org}}$ -Gehaltes. Hingegen bewirkt der Gipszusatz von 1 kg (Q6 vs. Q5) eine tendenzielle Abnahme des  $C_{\text{org}}$ -Gehaltes. Die Substitution des Laubkompostes mit GPMII bewirkt eine Zunahme der  $C_{\text{org}}$ -Gehalte (Q8 vs. Q1; Q9 vs. Q7). Der Zusatz von Silage erzielt keinen Effekt (Q13 vs. Q8). Bei dem Austausch des GPMII gegen GPMIV nahm der  $C_{\text{org}}$ -Gehalt (Q14 vs. Q13) im Boden ab. Die Veränderung der Fermentationsparameter bewirkt eine Reduzierung der  $C_{\text{org}}$ -Gehalte (Q10 - Q12 vs. Q2). Die Verlängerung der Fermentationsdauer hat jedoch einen erhöhenden Effekt auf den  $C_{\text{org}}$ -Gehalt im Boden (Q15 vs. Q14).



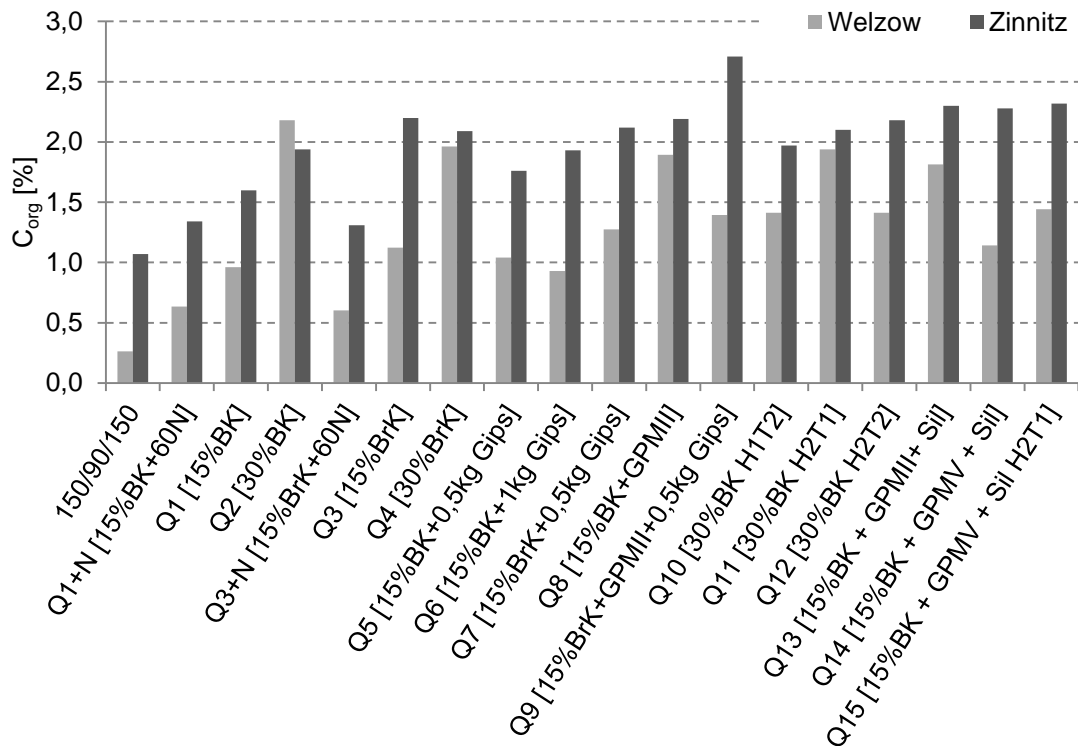


Abbildung 42: C<sub>org</sub>-Gehalt der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1)

Die Steigerung der BKS-Mengen bewirkt auch in dem Boden Zinnitz (Abbildung 42) eine Zunahme der C<sub>org</sub>-Gehalte (Q1+N vs. Q1 bzw. Q3+N vs. Q3). Die Erhöhung des Biokohleanteils von 15 auf 30 Vol.-% führt zu einer weiteren Zunahme der C<sub>org</sub>-Gehalte im Boden (Q2 vs. Q1). In den analogen Braunkohlevarianten nimmt der C<sub>org</sub>-Gehalt tendenziell ab (Q4 vs. Q3). Die Substitution des Laubkompostes mit GPMII bewirkt deutlich höhere C<sub>org</sub>-Gehalte im Boden (Q8 vs. Q1; Q9 vs. Q7). Der Zusatz von Silage (Q13 vs. Q8), die Substitution von GPMII mit GPMIV (Q14 vs. Q13) und die Erhöhung der Fermentationstemperatur (Q10 vs. Q2) erzielt keinen Effekt auf den C<sub>org</sub>-Gehalt im Boden. Die Verlängerung der Fermentationsdauer (Q11 vs. Q2) sowie die Veränderung beider Fermentationsparameter bewirken eine Steigerung der C<sub>org</sub>-Gehalte (Q12 vs. Q2).

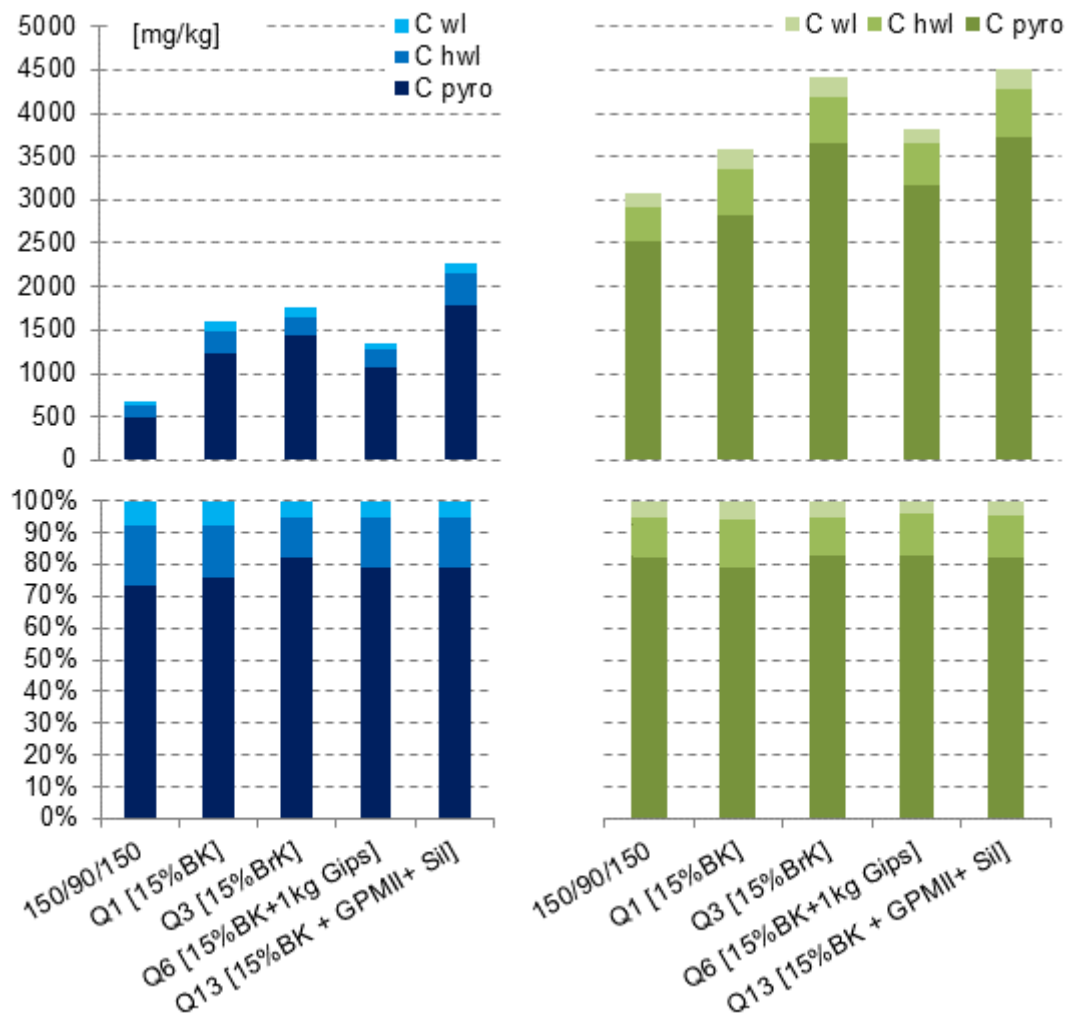


Abbildung 43: Kohlenstofffraktionen der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1; links Welzow, rechts Zinnitz)

Die löslichen ( $C_{wl}$ ,  $C_{hwl}$ ) und festgebundenen ( $C_{pyro}$ ) Kohlenstofffraktionen sind in Abbildung 43 dargestellt. Auffällig ist zunächst das deutlich höhere Niveau des natürlichen Ackerbodens Zinnitz im Vergleich zu dem Kippboden Welzow. Insbesondere der Anteil des heißwasserlöslichen C ( $C_{hwl}$ ) ist für die Einschätzung der Versorgung mit umwandelbarem C relevant. Diese ist in der mineralischen Referenzvariante in dem Boden Welzow nach Schulz (1997) als sehr gering einzustufen. Durch die Applikation der BKS kann der Gehalt an  $C_{hwl}$  auf ein geringes (Q3 und Q6), mittleres (Q1) und ein hohes (Q13) Niveau angehoben werden (Schulz, 1997). Die Versorgung mit umsetzbarem  $C_{hwl}$  in dem Boden Zinnitz ist nach Schulz (1997) generell als hoch bis sehr hoch einzuordnen. Die Substitution der Biokohle mit der Braunkohle (Q1 und Q3) und des Laubkompostes mit GPmII und Silage (Q1 und Q13) führen zu einer quantitativen Erhöhung des pyrophosphatlöslichen C ( $C_{pyro}$ ).

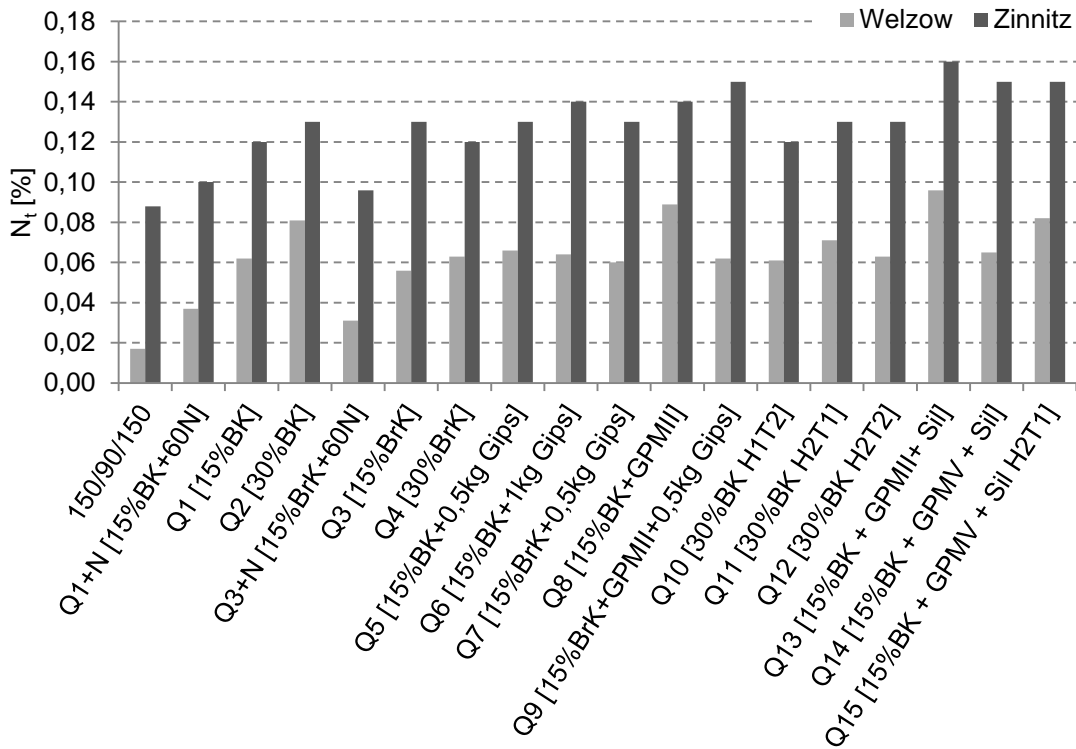


Abbildung 44:  $N_t$ -Gehalt der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1)

Der  $N_t$ -Gehalt des Bodens Welzow liegt auf einem geringeren Niveau als der des Bodens Zinnitz (Abbildung 44). Die Applikation von BKS erhöht in allen geprüften Varianten den  $N_t$ -Gehalt über das Niveau der mineralischen Referenzvariante (150/90/150). In dem Boden Welzow bewirkt die Erhöhung der BKS-Menge sowie des Kohleanteils (Q1+N bis Q2; Q3+N bis Q4) eine Zunahme des  $N_t$ -Gehaltes. Die Varianten Q2, Q8, Q13 und Q15 weisen etwas höhere  $N_t$ -Gehalte (bis 0,09 %) auf. Geringere  $N_t$ -Gehalte treten bei den reduzierten BKS-Gaben von 30 t/ha mit mineralischer N-Ergänzung (Q1+N, Q3+N) und der mineralischen Referenzvariante (150/90/150) auf.

In dem Boden Zinnitz steigt der  $N_t$ -Gehalt mit Erhöhung der BKS-Menge (Q1+N vs. Q1 bzw. Q3+N vs. Q3) und des Biokohleanteils (Q2 vs. Q1). Bei der Erhöhung des Braunkohleanteils ist der  $N_t$ -Gehalt tendenziell rückläufig (Q4 vs. Q3). Der Zusatz von Gips führt in den Varianten von BKS mit BK (Q5, Q6 vs. Q1) zu einer Erhöhung und in der Variante BKS mit BrK (Q7 vs. Q3) zu keinem Effekt auf den  $N_t$ -Gehalt des Bodens. Die Substitution des Laubkompostes mit GPMII bewirkt deutlich höhere  $N_t$ -Gehalte im Boden (Q8 vs. Q1; Q9 vs. Q7). Der Zusatz von Silage führt zu einer Steigerung des  $N_t$ -Gehaltes (Q13 vs. Q8), während die Substitution von GPMII mit GPMIV (Q14 vs. Q13) einen tendenziellen Rückgang des  $N_t$ -Gehaltes erzeugt. Die Variation der Fermentationsparameter erzielt keinen Effekt auf den  $N_t$ -Gehalt im Boden (Q10 - Q12 vs. Q2, Q15 vs. Q14).

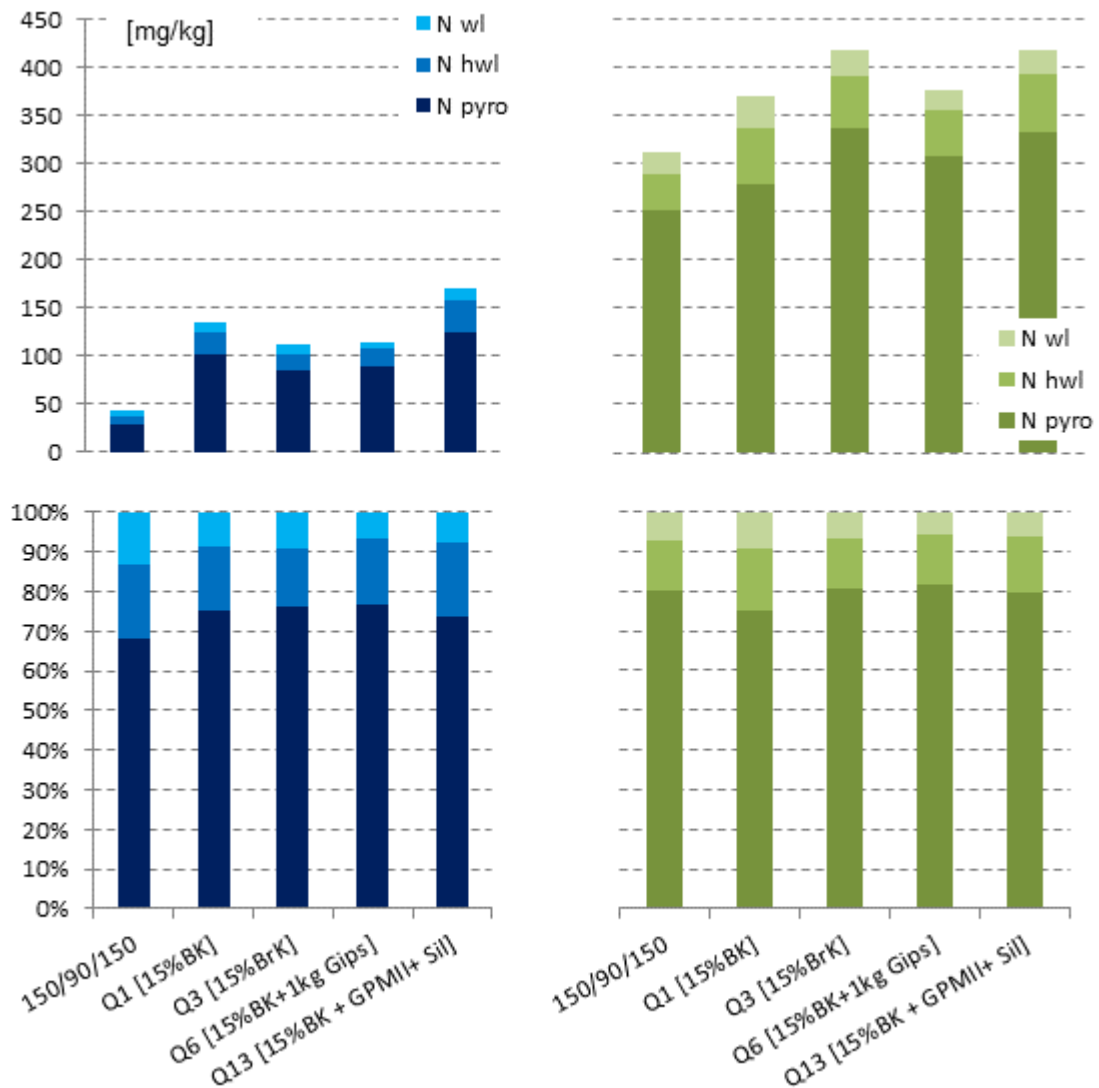


Abbildung 45: Stickstofffraktionen der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1; links Welzow, rechts Zinnitz)

Der Boden Welzow enthält deutlich geringere Gehalte der löslichen ( $N_{wl}$ ,  $N_{hwl}$ ) und festgebundenen ( $N_{pyro}$ ) Stickstofffraktionen als der Boden Zinnitz (Abbildung 45). Die Applikation der BKS bewirkt auf beiden Böden eine Erhöhung aller N-Fractionen (Ausnahme Q6,  $N_{wl}$ , Boden Zinnitz). Insbesondere der Anteil des pyrophosphatlöslichen N ( $N_{pyro}$ ) schwankt in dem Boden Welzow stärker als in dem Boden Zinnitz. Die BKS-Gaben auf dem Boden Welzow führen aufgrund der geringen Ausgangsgehalte mindestens zu einer Verdopplung der gesamten löslichen N-Fractionen. Die höchsten löslichen N-Gehalte werden in dem Boden Welzow in den Varianten Q1 und Q13 vor allem durch eine anteilige Erhöhung des  $N_{pyro}$  erreicht. In dem Boden Zinnitz bewirken die Varianten Q3 und Q13 die höchsten N-Gehalte, ebenfalls bedingt durch eine stärkere Zunahme des  $N_{pyro}$ .

Die C/N-Verhältnisse des Bodens Zinnitz sind generell enger als die des Bodens Welzow (Tabelle 49). Dies ist auf die Pedogenese des Bodens Zinnitz einhergehend mit höheren N-Gehalten (vgl. Abbildung 44) zurückzuführen. Die BKS-Applikation erweitert die C/N-Verhältnisse und erhöht den Gehalt an organischer Substanz (OBS) in beiden Böden zum Versuchsende (Tabelle 49). Sowohl in dem Boden Welzow als auch in dem Boden Zinnitz führt die Erhöhung des Kohleanteils in dem BKS von 15 auf 30 Vol.-% zu weiteren C/N-Verhältnissen und einer erhöhten organischen Substanz im Boden. Dieser Effekt ist bei den BKS, in denen die Biokohle durch Braunkohle (Q3 und Q4) substituiert wird, bedingt durch die höhere Schüttdichte bzw. Masse der Braunkohle, stärker ausgeprägt als bei den BKS mit Biokohle (Q1 und Q2).

Tabelle 49: C/N-Verhältnisse und Gehalte an organischer Bodensubstanz (OBS) in den Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (n = 1)

Variante <sup>1)</sup>	Welzow		Zinnitz	
	C/N	OBS [%]	C/N	OBS [%]
150/90/150	15,5	0,9	12,2	2,2
Q1+N [15%BK+60N]	17,1	1,5	13,4	2,6
Q1 [15%BK]	15,5	2,1	13,3	3,2
Q2 [30%BK]	26,9	2,4	14,9	3,5
Q3+N [15%BrK+60N]	19,4	1,6	13,6	2,8
Q3 [15%BrK]	20,1	2,5	16,9	3,8
Q4 [30%BrK]	31,2	4,0	17,4	3,4
Q5 [15%BK+0,5kg Gips]	15,8	2,5	13,5	3,1
Q6 [15%BK+1kg Gips]	14,5	2,1	13,8	3,3
Q7 [15%BrK+0,5kg Gips]	21,2	2,8	16,3	4,4
Q8 [15%BK+GPMII]	21,3	3,0	15,6	3,6
Q9 [15%BrK+GPMII+0,5kg Gips]	22,5	3,3	18,1	4,7
Q10 [30%BK H1T2]	23,1	2,7	16,4	3,3
Q11 [30%BK H2T1]	27,3	2,8	16,2	3,6
Q12 [30%BK H2T2]	22,4	2,3	16,8	3,5
Q13 [15%BK+GPMII+Sil]	18,9	3,2	14,4	4,2
Q14 [15%BK+GPMV+Sil]	17,6	2,2	15,2	4,7
Q15 [15%BK+GPMV+Sil H2T1]	17,6	2,9	15,5	3,6

<sup>1)</sup> BKS-Applikationsmenge 90 t/ha, ausgenommen die Varianten mit mineralischer N-Ergänzung 30 t/ha. Es sind nur die Abweichungen von den Standardfermentationsparametern H1T1 angegeben: Fermentationsdauer: H1 = 2 Wochen; H2 = 4 Wochen; Fermentationstemperatur: T1 = 25 - 30 °C; T2 = 35 - 40 °C.

In beiden Böden bewirkt die Substitution des Laubkompostes durch Gewässerpflegematerial mit dem Rottegrad II (GPMII) in den BKS Q8, Q13 und Q9 eine Erweiterung des C/N-Verhältnisses im Vergleich zu der Variante Q1 bzw. Q7 (Tabelle 49). Der Zu-

satz von Silage verengt das C/N-Verhältnis weiter (Q13 vs. Q8). Eine längere Vorrotte des GPM in Kombination mit Silage in dem BKS bewirkt ebenfalls eine Verengung des C/N-Verhältnisses (Q14 vs. Q13). Eine Verlängerung der Fermentationsdauer bringt diesbezüglich keinen Effekt (Q15 vs. Q14). Die Verlängerung der Fermentationsdauer und die Erhöhung der Fermentationstemperatur der BKS bewirken in beiden Böden weitere C/N-Verhältnisse (Q10 - Q12 vs. Q2). In dem Boden Welzow führt die Verlängerung der Fermentationsdauer (Q11) zu stärker erweiterten C/N-Verhältnissen als durch die Erhöhung der Fermentationstemperatur (Q10) bzw. bei der gleichzeitigen Variation beider Parameter (Q12).

Tabelle 50: Gesamtgehalte an Nährstoffen der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (KW-Auszug; n = 1)

Parameter	Ca	Mg	K	Na	P	Mn
	[mg/kg]					
Welzow (W)						
150/90/150	1912	832	928	41	124	109
Q1 [15%BK]	2448	938	971	52	170	120
Q3 [15%BrK]	2861	789	830	49	179	114
Q6 [15%BK+1kg Gips]	2529	836	931	57	188	116
Q13 [15%BK+GPMII+Sil]	3193	954	1007	66	286	167
Zinnitz (Z)						
150/90/150	728	513	374	52	303	188
Q1 [15%BK]	1229	568	542	48	360	200
Q3 [15%BrK]	1323	610	528	65	360	185
Q6 [15%BK+1kg Gips]	1660	537	512	47	379	200
Q13 [15%BK+GPMII+Sil]	1502	556	517	63	461	227

Der Kippboden Welzow weist ein deutlich höheres Niveau für die Gesamtgehalte von Ca, Mg und K auf als der Ackerboden Zinnitz (Tabelle 50). Die Gesamtgehalte von P und Mn sind in dem Boden Zinnitz höher als in dem Boden Welzow. Die BKS-Düngung führt in beiden Böden zu einer Erhöhung der Nährstoffgesamtgehalte im Vergleich zu den Mineraldüngervarianten. Die Substitution der Biokohle mit der Braunkohle (Q3) führt nur in dem Boden Welzow zu verringerten Mg- und K-Gehalten im Vergleich zu der mineralischen Referenzvariante. Die Substitution des Laubkompostes mit dem GPM und dem Zusatz der Silage (Q13) führen in beiden Böden zu erhöhten P- und Mn-Gehalten, sowie zu einer deutlichen Steigerung des Ca-Gehaltes in dem Boden Welzow.

Tabelle 51 gibt die verfügbaren Nährstoffgehalte ( $N_{\min}$ ,  $P_{DL}$ ,  $K_{DL}$  und  $Mg_{PV}$ ) des Bodens Welzow an. Der mittlere  $N_{\min}$ -Wert des Bodens über alle Varianten beträgt 2,5 kg/ha und ist damit sehr gering. Die BKS-Düngung von 90 t/ha verbessert die unzureichende Nährstoffversorgung mit P, K und Mg im Vergleich zur mineralisch gedüngten Referenzvariante deutlich (Von Wulffen et al., 2008). Die Erhöhung des Braunkohlenanteils von 15 auf 30 Vol.-% sowie der Zusatz von Gips reduzieren die K-Verfügbarkeit. Der Zusatz von Gips verringert zudem das verfügbare Mg. Die Substitution der Biokohle durch Braunkohle reduziert die P- und die K-Verfügbarkeit und erhöht die Mg-Verfügbarkeit.

Tabelle 51: Verfügbare Nährstoffgehalte ( $N_{\min}$ ,  $P_{DL}$ ,  $K_{DL}$  und  $Mg_{PV}$ ) des Bodens Welzow zum Versuchsende (n = 1)

Variante <sup>1)</sup>	$N_{\min}$ [kg/ha]	$P_{DL}$ <sup>2)</sup>	$K_{DL}$ <sup>2)</sup> [mg/kg]	$Mg_{PV}$ <sup>2)</sup>
150/90/150	1,2	17 A	23 A	16 A
Q1+N [15%BK+60N]	1,3	23 B	29 A	20 A
Q1 [15%BK]	2,3	55 C	124 D	44 B
Q2 [30%BK]	3,7	47 C	96 C	37 B
Q3+N [15%BrK+60N]	1,1	19 A	33 A	20 A
Q3 [15%BrK]	3,9	39 B	87 C	47 C
Q4 [30%BrK]	3,1	39 B	74 B	62 C
Q5 [15%BK+0,5kg Gips]	1,6	56 D	102 C	34 B
Q6 [15%BK+1kg Gips]	2,8	48 C	60 B	22 A
Q7 [15%BrK+0,5kg Gips]	1,3	42 C	71 B	42 B
Q8 [15%BK+GPMII]	2,9	61 D	118 D	46 C
Q9 [15%BrK+GPMII+0,5kg Gips]	1,4	37 B	38 B	32 B
Q10 [30%BK H1T2]	2,2	54 C	149 D	43 B
Q11 [30%BK H2T1]	3,5	63 D	177 D	43 B
Q12 [30%BK H2T2]	4,1	57 D	145 D	39 B
Q13 [15%BK+GPMII+Sil]	2,2	88 E	117 D	49 C
Q14 [15%BK+GPMV+Sil]	3,0	51 C	68 B	39 B
Q15 [15%BK+GPMV+Sil H2T1]	3,2	82 E	138 D	46 C

<sup>1)</sup> BKS-Applikationsmenge 90 t/ha, ausgenommen die Varianten mit mineralischer N-Ergänzung 30 t/ha BKS. Es sind nur die Abweichungen von den Standardfermentationsparametern H1T1 angegeben: Fermentationsdauer: H1 = 2 Wochen; H2 = 4 Wochen; Fermentationstemperatur: T1 = 25 - 30 °C; T2 = 35 - 40 °C. <sup>2)</sup> Großbuchstaben geben die Versorgungsstufen nach Von Wulffen et al. (2008) an.

Der Boden Zinnitz verfügt mit durchschnittlich 4,8 kg/ha über geringe  $N_{\min}$ -Werte, die allerdings etwas höher sind als die des Bodens Welzow (Tabelle 52). Die Versorgung mit P und K ist nur unzureichend und kann durch die BKS-Düngung in Höhe von 90 t/ha deutlich verbessert werden (Von Wulffen et al., 2008). Der Boden Zinnitz ver-

fügt bereits in der mineralischen Referenzvariante einen Überschuss an verfügbarem Mg. Die BKS-Düngung führt dem Boden weiteres Mg zu, so dass eine deutliche Überversorgung entsteht (Von Wulffen et al., 2008). Wie in dem Boden Welzow reduzieren die Erhöhung des Braunkohlenanteils von 15 auf 30 Vol.-% sowie der Zusatz von Gips die K-Verfügbarkeit. Auch wird durch den Zusatz von Gips das verfügbare Mg verringert. Die Substitution der Biokohle durch Braunkohle reduziert die P- und die K-Verfügbarkeit und erhöht die Mg-Verfügbarkeit. Die Substitution des Laubkompostes durch GPMII (Q9 vs. Q7) wirkt reduzierend auf die Mg-Verfügbarkeit.

Tabelle 52: Verfügbare Nährstoffgehalte ( $N_{\min}$ ,  $P_{DL}$ ,  $K_{DL}$  und  $Mg_{PV}$ ) des Bodens Zinnitz zum Versuchsende (n = 1)

Variante <sup>1)</sup>	$N_{\min}$ [kg/ha]	$P_{DL}$ <sup>2)</sup>	$K_{DL}$ <sup>2)</sup> [mg/kg]	$Mg_{PV}$ <sup>2)</sup>
150/90/150	5,0	32 B	14 A	76 D
Q1+N [15%BK+60N]	6,5	31 B	27 A	89 E
Q1 [15%BK]	5,8	61 C	160 D	104 E
Q2 [30%BK]	4,4	64 C	125 D	97 E
Q3+N [15%BrK+60N]	4,6	30 A	23 A	90 E
Q3 [15%BrK]	6,9	50 B	168 D	126 E
Q4 [30%BrK]	5,5	39 B	84 C	121 E
Q5 [15%BK+0,5kg Gips]	4,3	54 B	115 C	71 D
Q6 [15%BK+1kg Gips]	5,5	60 C	106 C	77 D
Q7 [15%BrK+0,5kg Gips]	5,3	50 B	108 C	105 E
Q8 [15%BK+GPMII]	2,6	58 C	84 C	87 E
Q9 [15%BrK+GPMII+0,5kg Gips]	2,2	39 B	60 B	70 D
Q10 [30%BK H1T2]	4,3	69 C	143 D	97 E
Q11 [30%BK H2T1]	5,6	70 C	175 D	97 E
Q12 [30%BK H2T2]	7,0	75 C	190 D	110 E
Q13 [15%BK+GPMII+Sil]	6,2	64 C	117 D	95 E
Q14 [15%BK+GPMV+Sil]	5,1	72 C	106 C	106 E
Q15 [15%BK+GPMV+Sil H2T1]	2,4	52 B	126 D	84 D

Der Boden Welzow und der Boden Zinnitz weisen vergleichbare Schwermetallgehalte auf (Tabelle 35). Der Boden Zinnitz zeigt in allen geprüften Varianten geringere Ni-Gehalte und höhere Pb-Gehalte als der Boden Welzow. Durch die BKS-Düngung steigt in beiden Böden der Zn-Gehalt im Vergleich zu den mineralisch gedüngten Varianten an. Die Ni-Gehalte des Bodens Welzow sind in den geprüften Varianten erhöht. Der Hintergrundwert des 90. Perzentils (LABO, 2017) für Ni wird in der mineralischen Referenzvariante, in der Variante mit 15 Vol.-% Biokohle (Q1) und bei der Verwendung von GPM und Silage (Q13) überschritten. Die Vorsorgewerte für Ni der BBodSchV (1999) werden eingehalten. Die Werte für Cadmium (Cd) liegen in allen Varianten unterhalb



der Nachweisgrenze von 0,1 mg/kg und sind daher nicht dargestellt. Die ermittelten Schwermetallgehalte halten die Vorsorgewerte der BBodSchV (1999) und die Hintergrundwerte der LABO (2017) ein.

Tabelle 53: Gesamtgehalte an Schwermetallen der Böden Welzow und Zinnitz zum Versuchsende (KW-Auszug; n = 1)

Parameter <sup>1)</sup>	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb
	[mg/kg]				
Welzow (W)					
150/90/150	4,3	13,9	5,5	7,7	4,4
Q1 [15%BK]	4,8	18,3	5,7	7,7	6,1
Q3 [15%BrK]	4,3	19,6	5,1	7,5	5,4
Q6 [15%BK+1kg Gips]	5,3	19,7	5,2	7,7	5,4
Q13 [15%BK+GPMII+Sil]	5,4	18,2	6,2	8,6	5,1
Zinnitz (Z)					
150/90/150	6,1	17,4	3,2	7,6	15,7
Q1 [15%BK]	7,4	23,3	3,1	7,4	16,1
Q3 [15%BrK]	7,0	21,3	3,0	7,2	14,7
Q6 [15%BK+1kg Gips]	6,8	24,2	3,1	7,7	15,9
Q13 [15%BK+GPMII+Sil]	6,0	19,3	2,9	7,1	14,1
Hintergrundwerte <sup>2)</sup>	4 (8)	19 (32)	2,7 (5,2)	5 (10)	14 (33)
Vorsorgewerte <sup>3)</sup>	20 (14)	60 (42)	15 (10,5)	30 (21)	40 (28)
Grenzwerte <sup>4)</sup>	100 (70)	400 (300)	50 (35)	100 (70)	150 (100)

<sup>1)</sup> Cd unterhalb der Nachweisgrenze von 0,1 mg/kg in allen geprüften Varianten.

<sup>2)</sup> Hintergrundwerte für das Land Brandenburg, Angabe des 50. Perzentils (90. Perzentils), Ausgangssubstrat: Sand, Oberboden Acker (LABO, 2017).

<sup>3)</sup> Vorsorgewerte zum Schutz der Bodenfunktionen, Bodenart Sand, (bei landwirtschaftlicher Nutzung: 70% der Vorsorgewerte, § 12 Abs. 4 BBodSchV (1999))

<sup>4)</sup> Aufbringungsgrenzwerte gemäß § 4 Abs. 3 (gemäß § 6 Abs. 1 Satz 2) BioAbfV (2012)

## 4.2.3 Pflanzenaufwuchs

### 4.2.3.1 Entwicklung des Pflanzenaufwuchses

Der Pflanzenaufwuchs wurde viermal in dem Versuchszeitraum Mai 2012 bis Oktober 2013 geerntet. Tabelle 54 und Tabelle 55 zeigen, dass der Bestand zu den beiden Ernteterminen im Jahr 2012 am 19.07.2012 und 01.10.2012 auf beiden Böden gleichmäßig entwickelt (BBCH 45 bzw. 45/47) ist. Allerdings zeichnet sich zum zweiten Schnitt 2012 bereits eine beginnende Verunkrautung mit Quecken (*Elymus L.*) in den Varianten 150/90/150 und Q10 (Welzow, Tabelle 54) bzw. Q8 (Zinnitz, Tabelle 55) ab.

Tabelle 54: Pflanzenentwicklung (BBCH-Stadium) zu den Ernteterminen auf dem Boden Welzow

Variante	2012		2013	
	1. Schnitt	2. Schnitt <sup>1)</sup>	1. Schnitt <sup>1)</sup>	2. Schnitt <sup>1)</sup>
150/90/150	45	45/47 (V.)	45/59 (V.)	47/51 (V.)
Q1+N [15%BK+60N]	45	45/47	45/59	47/59
Q1 [15%BK]	45	45/47	45/59 (V.)	47/51 (V.)
Q2 [30%BK]	45	45/47	45/59 (V.)	47/51 (V.)
Q3+N [15%BrK+60N]	45	45/47	45/59 (V.)	47/51 (V.)
Q3 [15%BrK]	45	45/47	45/59 (V.)	47/59
Q4 [30%BrK]	45	45/47	45/59 (V.)	47/51 (V.)
Q5 [15%BK+0,5kg Gips]	45	45/47	45/59	47/59
Q6 [15%BK+1kg Gips]	45	45/47	45/59 (V.)	47/51
Q7 [15%BrK+0,5kg Gips]	45	45/47	45/59	47/51
Q8 [15%BK+GPMII]	45	45/47	45/59	47/51
Q9 [15%BrK+GPMII+0,5kg Gips]	45	45/47	45/59	47/51
Q10 [30%BK H1T2]	45	45/47 (V.)	45/51 (V.)	47/59 (V.)
Q11 [30%BK H2T1]	45	45/47	45/59 (V.)	47/51 (V.)
Q12 [30%BK H2T2]	45	45/47	45/59	47/51
Q13 [15%BK + GPMII+ Sil]	45	45/47	45/59 (V.)	47/51
Q14 [15%BK + GPMV + Sil]	45	45/47	45/59 (V.)	47/59 (V.)
Q15 [15%BK + GPMV + Sil H2T1]	45	45/47	45/59	47/51 (V.)

<sup>1)</sup> BBCH-Stadium in Min./Max., V. = Verunkrautung in der Regel mit Quecken (*Elymus L.*)

In der zweiten Vegetationsperiode, insbesondere zum ersten Erntetermin, liegt eine deutliche Verunkrautung mit vornehmlich Quecken (*Elymus L.*) auf dem Boden Welzow vor. Der Bestand der Böden Welzow und Zinnitz ist zu beiden Ernteterminen im Jahr 2013 am 29.05.2013 und 15.10.2013 größtenteils in die BBCH-Stadien 45 - 59 bzw. 47 - 51 einzuordnen (Tabelle 54 und Tabelle 55). Eine Verunkrautung mit Quecken (*Elymus L.*) ist auf dem Boden Zinnitz nur in den Varianten Q8 und Q15 zu beobachten.

Tabelle 55: Pflanzenentwicklung (BBCH-Stadium) zu den Ernteterminen auf dem Boden Zinnitz

Variante	2012		2013	
	1. Schnitt	2. Schnitt <sup>1)</sup>	1. Schnitt <sup>1)</sup>	2. Schnitt <sup>1)</sup>
150/90/150	45	45/47	45/51	47/51
Q1+N [15%BK+60N]	45	45/47	45/59	47/59
Q1 [15%BK]	45	45/47	45/51	47/51
Q2 [30%BK]	45	45/47	45/59	47/59
Q3+N [15%BrK+60N]	45	45/47	45/59	47/59
Q3 [15%BrK]	45	45/47	45/51	47/51
Q4 [30%BrK]	45	45/47	45/59	47/59
Q5 [15%BK+0,5kg Gips]	45	45/47	45/51	47/51
Q6 [15%BK+1kg Gips]	45	45/47	45/59	47/59
Q7 [15%BrK+0,5kg Gips]	45	45/47	45/59	47/59
Q8 [15%BK+GPMII]	45	45/47 (V.)	45/59 (V.)	47/59 (V.)
Q9 [15%BrK+GPMII+0,5kg Gips]	45	45/47	45/59	47/59
Q10 [30%BK H1T2]	45	45/47	45/59	47/59
Q11 [30%BK H2T1]	45	45/47	45/59	47/59
Q12 [30%BK H2T2]	45	45/47	45/59	47/59
Q13 [15%BK + GPMII+ Sil]	45	45/47	45/59	47/59
Q14 [15%BK + GPMV + Sil]	45	45/47	45/59	47/59
Q15 [15%BK + GPMV + Sil H2T1]	45	45/47	45/59 (V.)	47/59

<sup>1)</sup> BBCH-Stadium in Min./Max., V. = Verunkrautung in der Regel mit Quecken (Elymus L.)

#### 4.2.3.2 Erträge

Die Entwicklung des Knaulgrasertrages über den Versuchszeitraum ist in Abbildung 46 für den Boden Welzow und in Abbildung 47 für den Boden Zinnitz dargestellt. Auf dem Boden Welzow nehmen die Erträge in allen Varianten vom ersten Schnitt 2012 über den zweiten Schnitt 2012 (Ausnahme Q1) zum ersten Schnitt 2013 zu (Abbildung 46). Zum zweiten Erntetermin 2013 liegt das Ertragsniveau aller Varianten unterhalb des vorherigen Schnittes. Allerdings sinkt das Ertragsniveau nur in den Varianten Q4 und Q5 unter das Niveau des ersten Schnittes 2012. Insbesondere zum ersten Schnitt 2012 zeigt sich eine deutliche Ertragssteigerung der BKS-Varianten gegenüber der mineralischen Referenzvariante (150/90/150). Auch nimmt der Ertrag mit der Erhöhung der BKS-Gabe von 30 t/ha und mineralischer N-Ergänzung (Q1+N bzw. Q3+N) auf 90 t/ha (Q1 bzw. Q3) zu. In Tabelle 56 ist zudem der summierte Ertrag über den Versuchszeitraum sowie die Relation zu der mineralischen Referenzvariante angegeben. Hier wird deutlich, dass die BKS mit Braunkohle (Q3, Q4) einen geringeren Ertragseffekt aufweisen als die BKS mit Biokohle (Q1, Q2). Der Gesamtertrag (Q1 - Q4) übertrifft das Niveau der mineralischen Referenzvariante (150/90/150). Die Steigerung des Biokohleanteils wird ertragswirksam (Q2 vs. Q1). Ein solcher Ertragseffekt bleibt für die Erhöhung des Braunkohleanteils aus (Q4 vs. Q3). Der Zusatz von Gips hat bei den BKS mit Biokohle (Q5, Q6 vs. Q1) einen positiven, bei dem BKS mit Braunkohle (Q7 vs. Q3) einen negativen Ertragseffekt. Die Substitution des Laubkompostes mit GPM im BKS (Q8, Q13 - 15 vs. Q1) erzeugt positive Ertragseffekte. Das GPMII führt im BKS in Kombination mit Braunkohle und 0,5 kg Gips zu dem höchsten Ertrag auf dem Boden Welzow mit einem Plus von 37 % im Vergleich zu der mineralischen Referenzvariante. Die Variation der Fermentationsparameter (Q10 - Q12) ergibt gegenüber der mineralischen Referenzvariante (150/90/150) teilweise positive Ertragseffekte. Im Vergleich zu dem BKS mit Standardfermentationsparametern (Q2) ist allerdings ein Ertragsrückgang um bis zu 21,6 % zu verzeichnen. Den geringsten Ertrag weist die Variante Q3+N auf.

Es zeichnet sich ein tendenziell höheres Ertragsniveau auf dem Boden Zinnitz gegenüber dem Boden Welzow ab. Die Erträge auf dem Boden Zinnitz verzeichnen einen Zuwachs vom ersten Schnitt 2012 zum ersten Schnitt 2013 (Abbildung 47). Zum zweiten Erntetermin 2013 liegt das Ertragsniveau aller Varianten unterhalb des vorherigen Schnittes (Ausnahme Q9). Nur der Ertrag der mineralischen Referenzvariante (150/90/150) sinkt unter das Ertragsniveau des zweiten Schnittes 2012. Insbesondere zu den Ernteterminen im Jahr 2013 zeigt sich eine deutliche Ertragssteigerung der

BKS-Varianten gegenüber der mineralischen Referenzvariante (150/90/150). Die Erhöhung des Biokohleanteils in dem BKS von 15 auf 30 Vol.-% zeigt einen positiven Ertragseffekt (Q2 vs. Q1): Für die analogen BKS-Varianten mit Braunkohle ist ein negativer Ertragseffekt ablesbar (Q4 vs. Q3). Anhand der Tabelle 56 wird zudem die Ertragserhöhung mit der Steigerung der BKS-Gabe von 30 t/ha und mineralischer N-Ergänzung (Q1+N bzw. Q3+N) auf 90 t/ha (Q1 bzw. Q3) deutlich. Der Zusatz von Gips bewirkt eine Erhöhung des Ertrages in den BKS-Varianten mit Biokohle (Q5, Q6 vs. Q1) gegenüber der BKS-Variante ohne Gips. Der Gipszusatz in dem BKS mit Braunkohle (Q7) wirkt ertragsreduzierend im Vergleich zu dem BKS ohne Gips (Q3). Hingegen kann auch auf dem Boden Zinnitz mit dem BKS in der Kombination aus Braunkohle, GPMII und 0,5 kg Gips der Höchstertrag mit einem Plus von 31,6 % gegenüber der mineralischen Referenzvariante (150/90/150) erzielt werden. Ebenfalls ein Ertragsplus von 31,6 % (Q14) bzw. 31,3 % (Q13) erreicht die Kombination aus Biokohle, GPM IV bzw. II und Silage im Vergleich zu der mineralischen Referenzvariante (150/90/150). Das GPM erhöhte sowohl im RG II als auch im RG IV die Erträge in den jeweiligen BKS-Varianten mit Biokohle (Q8, Q13 - Q15 vs. Q1 bzw. 150/90/150). Die Variation der Fermentationsparameter (Q10 - Q12) ergibt gegenüber der mineralischen Referenzvariante (150/90/150) positive Ertragseffekte. Allerdings ist im Vergleich zu dem BKS mit Standardfermentationsparametern (Q2) ein Ertragsrückgang um bis zu 10,3 % zu verzeichnen. Der geringste Gesamtertrag liegt in der Variante Q3+N vor. Die ertragschwächste bzw. ertragsstärkste Variante Q3+N und Q9 sind auf beiden Versuchsböden identisch.

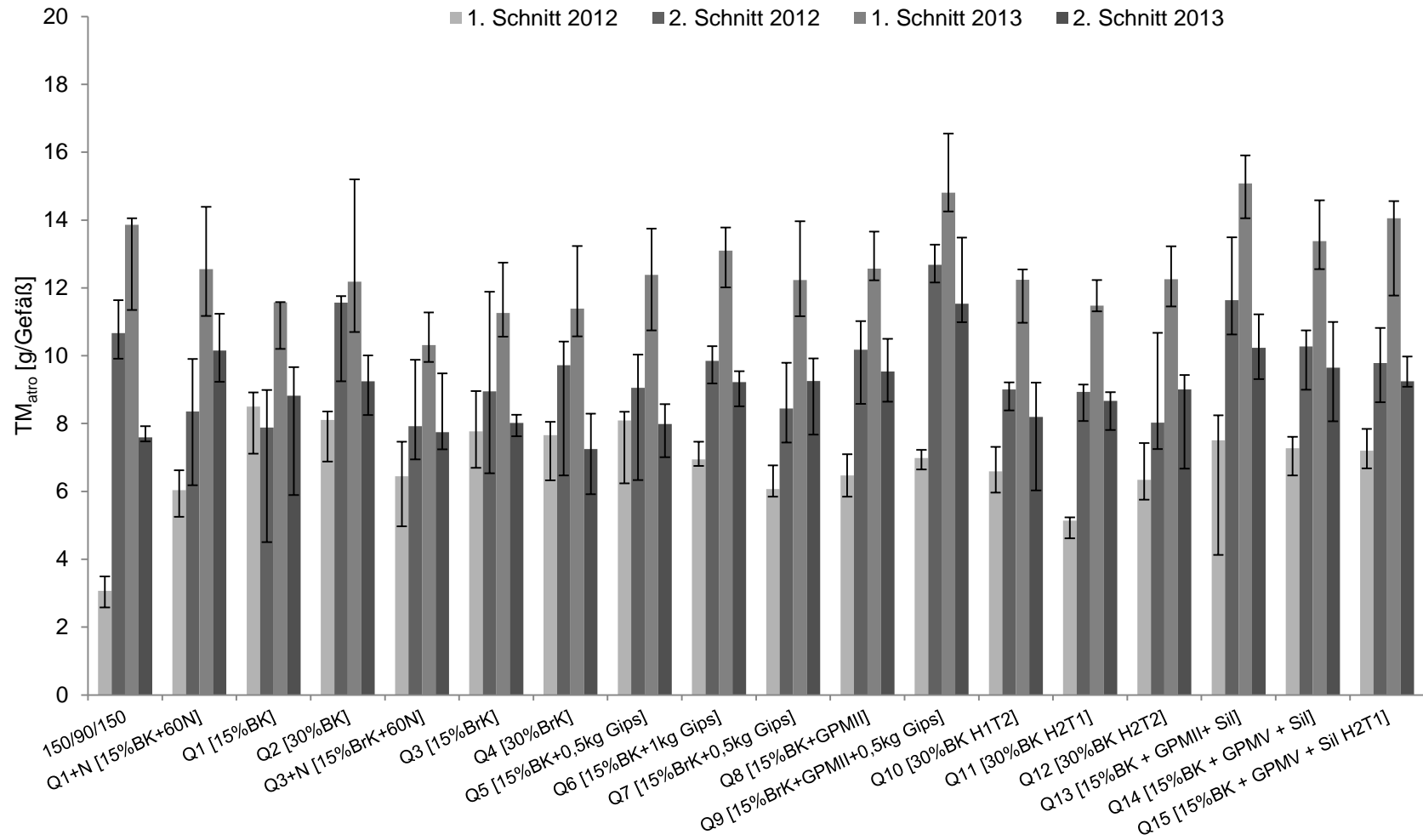


Abbildung 46: Knautgraserträge ( $TM_{astro}$ ) der vier Schnitte auf dem Boden Welzow (Mineraldünger N/P/K [kg/ha], Q+N = 30 t/ha BKS + 60 kg N/ha, Q = 90 t/ha BKS; Median, Min., Max., n = 4)

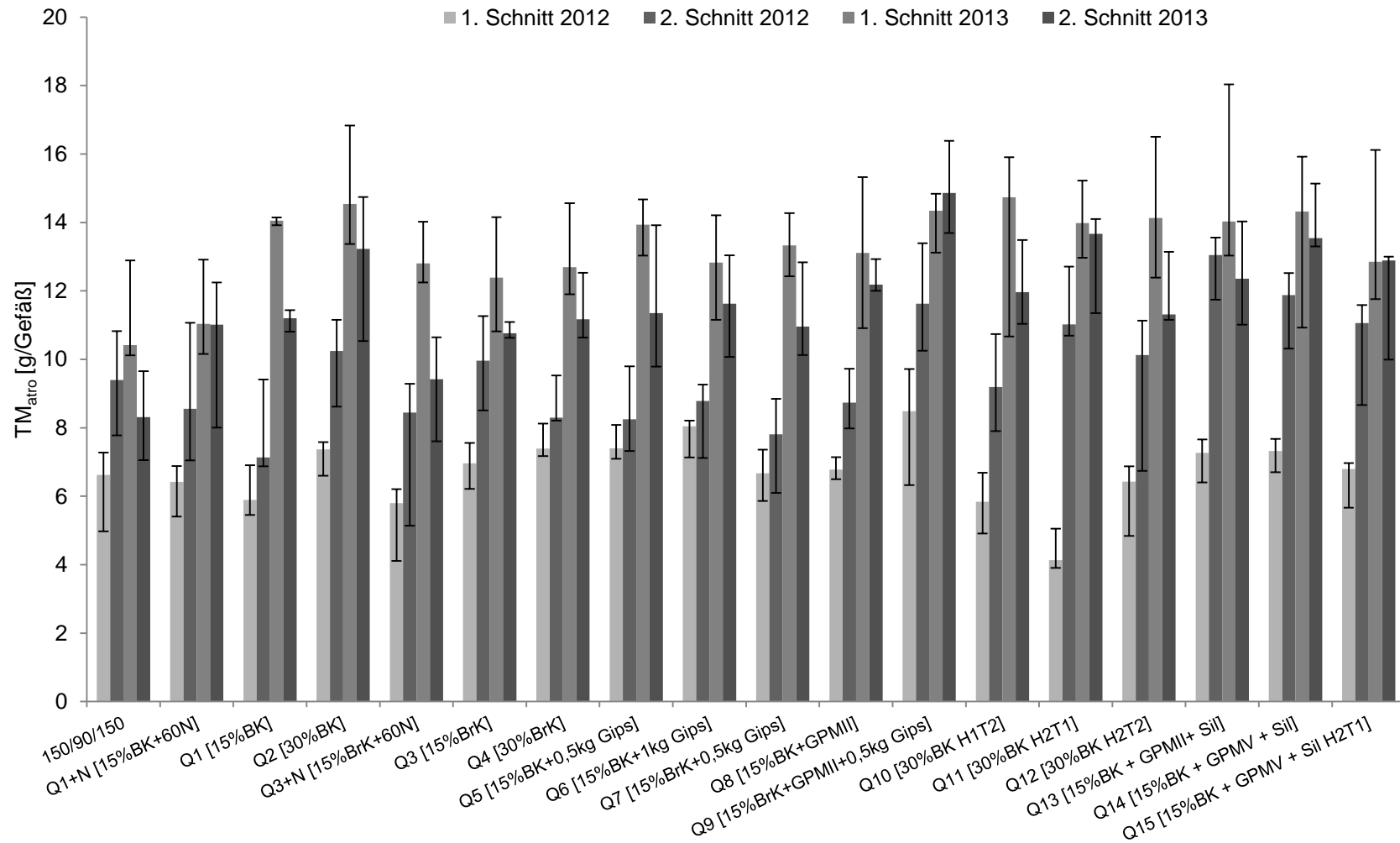


Abbildung 47: Knautgraserträge ( $TM_{astro}$ ) der vier Schnitte auf dem Boden Zinnitz (Mineraldünger N/P/K [kg/ha], Q+N = 30 t/ha BKS + 60 kg N/ha, Q = 90 t/ha BKS; Median, Min., Max., n = 4)

Tabelle 56: Gesamtertrag des Pflanzenaufwuchses der 4 Schnitte in 2012 und 2013 der Böden Welzow und Zinnitz (Median, Min., Max., Relativ zur 150/90/150)

Variante	Welzow				Zinnitz			
	Min	Med.	Max	Relativ zu 150/90/150	Min	Med.	Max	Relativ zu 150/90/150
	[kg/ha]			[%]	[kg/ha]			[%]
150/90/150	33,9	34,1	36,6	100,0	29,9	36,3	37,5	100,0
Q1+N [15%BK + 60N]	33,5	37,3	40,1	109,3	34,9	36,3	40,2	100,0
Q1 [15%BK]	27,7	37,3	38,1	109,4	37,5	38,2	41,6	105,1
Q2 [30%BK]	36,1	41,0	44,5	120,1	42,6	45,0	47,7	123,7
Q3+N [15%BrK + 60N]	30,0	32,4	37,2	94,9	31,5	35,3	40,2	97,0
Q3 [15%BrK]	31,6	35,9	41,8	105,1	37,2	40,6	42,0	111,7
Q4 [30%BrK]	29,3	36,1	39,9	105,7	39,0	39,8	43,2	109,6
Q5 [15%BK + 0,5 kg Gips]	30,3	38,1	39,4	111,8	39,0	41,2	44,1	113,4
Q6 [15%BK + 1 kg Gips]	37,5	39,1	40,2	114,4	37,2	41,0	43,5	112,8
Q7 [15%BrK + 0,5 kg Gips]	33,9	35,4	39,9	103,7	35,9	38,9	41,7	107,0
Q8 [15%BK+GPMII]	38,4	38,7	39,3	113,3	39,4	41,0	42,7	112,7
Q9 [15%BrK+GPMII + 0,5 kg Gips]	44,8	46,8	48,2	137,0	46,3	47,8	54,3	131,6
Q10 [30%BK H1T2]	33,3	35,6	37,2	104,3	34,5	42,7	44,9	117,5
Q11 [30%BK H2T1]	33,2	33,6	35,3	98,5	41,7	42,6	44,8	117,1
Q12 [30%BK H2T2]	31,6	35,5	40,6	104,0	37,5	41,2	46,8	113,4
Q13 [15%BK + GPMII + Sil]	41,3	44,0	46,6	128,9	43,4	47,7	50,1	131,3
Q14 [15%BK + GPMV + Sil]	38,6	40,2	42,1	117,8	41,2	47,8	49,7	131,6
Q15 [15%BK + GPMV + Sil H2T1]	38,8	39,5	42,1	115,7	40,0	42,3	46,4	116,3



#### 4.2.3.3 Nährstoffgehalte und Entzüge mit dem Pflanzenaufwuchs

Nach Bergmann (1983) ist die Versorgung mit **N** des Knautgrasaufwuchses auf dem Boden **Welzow** anhand der empfohlenen Gehalte von 2,8 - 4,0 % in der TS zum Blühbeginn (BBCH 61) im Mittel als unterversorgt einzuordnen (Tabelle 57). Nach Von Wulffen et al. (2008) ist die mittlere N-Versorgung des Knautgrasaufwuchses auf dem Boden Welzow gerade noch im Bereich der optimalen Versorgung (2,0 - 3,5 % TS) für Wiesengräser zum Rispschieben (BBCH 51). Die N-Versorgung ist bei Betrachtung der N-Gehalte zu den einzelnen Schnittterminen deutlich diffiziler. So liegen N-Gehalte zum ersten Schnitt 2012 deutlich über dem Mittelwert des gesamten Versuchszeitraumes. Alle Varianten liegen im Bereich der optimalen Versorgung nach Bergmann (1983) bzw. sind als überversorgt einzustufen (150/90/150, Q1+N, Q2, Q3+N, Q5 - Q7, Q9, Q13). Nach Von Wulffen et al. (2008) gelten alle Varianten als überversorgt. Zu den weiteren drei Ernteterminen sind nach Bergmann (1983) alle Varianten mit N unterversorgt. Die Einordnung nach Von Wulffen et al. (2008) ist von Erntetermin zu Erntetermin unterschiedlich. So liegt zum zweiten Schnitt 2012 eine N-Unterversorgung in allen Varianten (ausgenommen 150/90/150, Q9 und Q13) vor. Der erste Schnitt 2013 bestätigt allen Varianten eine optimale N-Versorgung. Der Aufwuchs des zweiten Schnittes 2013 ist auch nach Von Wulffen et al. (2008) deutlich unterversorgt mit N. Der Aufwuchs der mineralischen Referenzvariante weist im Mittel und zu beiden Schnittterminen 2012 die höchsten N-Gehalte auf.

Die Empfehlungen zur **P-Versorgung** von 0,3 - 0,5 % P TS nach Bergmann (1983) und 0,28 - 0,35 % TS nach Von Wulffen et al. (2008) erreicht nur die Variante Q7 zum ersten Schnitt 2012 (Tabelle 57). Im ersten Versuchsjahr 2012 und zum ersten Schnitt 2013 liegt eine generelle P-Unterversorgung des Aufwuchses vor. Die P-Gehalte des Aufwuchses zum zweiten Schnitt 2013 sind in den Varianten Q5, Q8 und Q13 nach Bergmann (1983) optimal versorgt. Bei der Einordnung nach Von Wulffen et al. (2008) sind zu diesen auch die Varianten Q1 - Q3, Q5 - Q8, Q10 sowie Q13 - Q15 optimal mit P versorgt. Die mineralische Referenzvariante weist zu allen Ernteterminen die geringsten P-Gehalte im Aufwuchs auf. Die Varianten mit 30 t/ha BKS und mineralischer Ergänzungsdüngung (Q1+N, Q3+N) weisen ebenfalls zu allen Ernteterminen geringere P-Gehalte auf als die voll mit BKS-gedüngten (90 t/ha) Varianten (Q1, Q3) sowie höhere P-Gehalte als die mineralische Referenzvariante (150/90/150). Im Versuchsverlauf ist eine tendenzielle Erhöhung der P-Gehalte im Aufwuchs der BKS-Varianten mit einer Gabenhöhe von 90 t/ha zu beobachten.

Die **K-Versorgung** gilt nach Bergmann (1983) mit Gehalten von 2,5 bis 3,5 % K TS bzw. nach Von Wulffen et al. (2008) von 2,2 bis 3,2 % TS im Pflanzenaufwuchs als

optimal. Die mittleren K-Gehalte des Aufwuchses aller Varianten über den gesamten Versuchszeitraum sind nach Bergmann (1983) als optimal versorgt einzuordnen (Tabelle 57). Nach Von Wulffen et al. (2008) lag in den Varianten Q1 - Q6, Q8, Q12, Q13 und Q15 eine Überversorgung mit K vor. Diese Einschätzung variiert bei der Betrachtung der einzelnen Erntetermine. So sind zum ersten Schnitt 2012 alle Varianten mit K nach Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008) überversorgt.

Tabelle 57: N-, P- und K-Gehalte des Pflanzenaufwuchses über den Versuchszeitraum auf dem Boden Welzow (n = 1)

Variante	1. Schnitt 2012 <sup>1)</sup>			2. Schnitt 2012 <sup>1)</sup>			1. Schnitt 2013 <sup>1)</sup>			2. Schnitt 2013 <sup>1)</sup>			Mittelwerte 2012 - 2013 <sup>1)</sup>		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
	[g/kg TS]														
150/90/150	50,9	1,9	47,4	25,2	1,2	22,3	24,0	1,0	18,4	8,1	1,1	10,4	27,1	1,3	24,6
Q1+N [15%BK+60N]	44,2	2,0	51,6	19,7	1,6	26,4	25,0	1,9	29,3	8,2	1,8	12,2	24,3	1,8	29,8
Q1 [15%BK]	38,3	2,5	55,7	15,1	2,2	25,9	20,9	2,5	39,4	10,5	2,8	15,8	21,2	2,5	34,2
Q2 [30%BK]	43,9	2,4	58,6	19,4	2,2	30,8	22,9	2,4	39,4	9,3	2,9	16,0	23,9	2,5	36,2
Q3+N [15%BrK+60N]	42,3	2,0	49,0	17,0	1,8	22,8	23,9	1,9	29,6	9,0	2,0	11,1	23,0	1,9	28,1
Q3 [15%BrK]	40,2	2,4	55,5	17,1	2,0	27,3	22,7	2,5	42,3	9,1	2,9	14,7	22,3	2,5	35,0
Q4 [30%BrK]	38,9	2,2	53,0	14,4	2,1	25,1	22,9	2,6	41,4	8,7	2,7	14,1	21,2	2,4	33,4
Q5 [15%BK+0,5kg Gips]	42,9	2,5	56,0	15,6	2,2	25,8	23,6	2,7	40,3	8,7	3,2	16,0	22,7	2,6	34,5
Q6 [15%BK+1kg Gips]	43,7	2,3	55,2	18,4	2,1	30,1	24,6	2,6	39,7	8,9	3,1	15,8	23,9	2,5	35,2
Q7 [15%BrK+0,5kg Gips]	46,1	3,0	57,7	13,5	2,0	24,0	22,9	2,6	41,4	7,9	3,0	16,4	22,6	2,6	34,9
Q8 [15%BK+GPMII]	37,5	2,3	50,4	15,9	2,1	26,5	23,2	2,5	38,5	7,8	3,2	16,1	21,1	2,5	32,9
Q9 [15%BrK+GPMII+0,5kg Gips]	43,4	1,9	51,5	24,6	1,7	31,8	23,6	2,0	30,5	7,7	2,3	14,2	24,8	2,0	32,0
Q10 [30%BK H1T2]	39,4	2,6	51,1	13,3	2,1	23,5	20,1	2,3	37,2	9,5	2,9	14,2	20,6	2,5	31,5
Q11 [30%BK H2T1]	38,3	2,4	49,8	13,3	2,0	23,7	20,5	2,4	38,4	10,5	2,5	14,7	20,7	2,3	31,6
Q12 [30%BK H2T2]	39,8	2,3	53,6	14,7	1,9	25,4	21,2	2,4	40,3	9,2	2,6	14,4	21,2	2,3	33,4
Q13 [15%BK + GPMII+ Sil]	42,4	2,2	55,3	20,0	1,8	32,8	21,0	2,2	35,5	8,8	3,2	17,9	23,0	2,4	35,4
Q14 [15%BK + GPMV + Sil]	38,6	2,0	50,7	16,1	2,0	26,4	22,9	2,4	38,6	9,1	2,8	14,2	21,7	2,3	32,5
Q15 [15%BK + GPMV + Sil H2T1]	37,6	2,0	53,3	15,5	1,8	28,2	22,6	2,3	40,1	8,8	3,1	16,2	21,1	2,3	34,4

<sup>1)</sup> Optimale Gehalte nach Bergmann (1983) zum Blühbeginn (BBCH 61) für N 2,8 - 4,0 % TS, P 0,3 - 0,5 % TS und K 2,5 - 3,5 % TS sowie nach Von Wulfen et al. (2008) zum Rispenstadien (BBCH 51) für N 2,0 - 3,5 % TS, P 0,28 - 0,35 % TS und K 2,2 - 3,2 % TS.

Zum zweiten Schnitt 2012 sind nach Bergmann (1983) die Varianten 150/90/150, Q3+N, Q7, Q10 und Q11 unterversorgt und alle weiteren Varianten lagen im Bereich der optimalen Versorgung. Nach Von Wulffen et al. (2008) sind alle Varianten zum zweiten Erntetermin 2012 als optimal mit K versorgt einzustufen. Der K-Gehalt des Aufwuchses der mineralischen Referenzvariante (150/90/150) ist zum ersten Schnitt 2013 nach Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008) unterversorgt. Für die K-Gehalte der Varianten Q1+N, Q3+N, Q9 und Q13 lag eine optimale Versorgung vor (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Die weiteren Varianten galten als überversorgt (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Die K-Gehalte des Aufwuchses aller Varianten zum zweiten Erntetermin sind sehr gering und nach Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008) als deutlich unterversorgt einzuordnen. Die K-Gehalte nehmen im Vegetations- bzw. Versuchsverlauf ab. Dies wird in der mineralisch gedüngten Referenzvariante (150/90/150) am stärksten deutlich. Die BKS-Varianten mit mineralischer Ergänzungsdüngung (Q1+N, Q3+N) weisen höhere K-Gehalte auf als die mineralische Referenzvariante, aber insgesamt geringere K-Gehalte als die ausschließlich mit BKS gedüngten Varianten (Q1, Q3).

Die Gesamtgehalte der **Nährstoffe Mg, Mn, Cu und Zn** in dem Knautgrasaufwuchs (n = 1) zu den vier Schnittterminen für die mineralische Referenzvariante sowie ausgewählte BKS-Varianten auf dem Boden Welzow sind in Tabelle 58 dargestellt. Die Einordnung der Nährstoffgehalte erfolgt nach den Angaben von Bergmann (1983) zum Blühbeginn (BBCH 61) für Mg 0,15 - 0,3 % TS, Mn 40 - 150 ppm TS, Cu 6 - 15 ppm TS und Zn 20 - 50 ppm TS und nach Von Wulffen et al. (2008) zum Rispschieben (BBCH 51) des ersten Aufwuchses für Mg 0,1 - 0,3 % TS, Mn 28 - 140 mg/kg TS und Cu 5,0 - 15,0 mg/kg TS. Im ersten Versuchsjahr (2012) sind die Mg-Gehalte im Knautgrasaufwuchs der mineralischen Referenzvariante stets erhöht. Dies ändert sich im zweiten Versuchsjahr (2013). Hier liegen vergleichbare bis höhere Mg-Gehalte in dem Aufwuchs der BKS-Varianten vor. Über den gesamten Zeitraum sind die Mg-Gehalte aller Varianten nach Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008) als optimal versorgt einzuschätzen. Der Mn-Gehalt des Aufwuchses der mineralischen Referenzvariante ist zum Teil deutlich höher als in allen BKS-Varianten. Die Mn-Gehalte der Ernten des Jahres 2012 und des ersten Schnittes 2013 zeigen eine optimale Versorgung mit Mn in allen Varianten an (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Zum zweiten Schnitt 2013 fallen Mn-Gehalte aller Varianten sehr hoch aus und liegen über den empfohlenen optimalen Gehalten nach Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008). Die Cu-Gehalte im Aufwuchs sind zum ersten Schnitt 2012 etwas erhöht und pegeln sich im Versuchsverlauf auf etwa 5 mg/kg TS über alle Varianten ein. Sie liegen

damit knapp unter den empfohlenen Gehalten von Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008). Die mineralische Referenzvariante weist über den gesamten Versuchszeitraum die geringsten bzw. geringe (2. Schnitt 2013) Zn-Gehalte im Aufwuchs auf. Die BKS-Varianten liegen deutlich innerhalb der empfohlenen Zn-Gehalte von Bergmann (1983).

Tabelle 58: Gesamtgehalte der Nährstoffe Mg, Mn, Cu und Zn in dem Knaulgras-aufwuchs des Bodens Welzow zu den vier Ernteterminen (KW-Auszug; n = 1)

Variante	Mg <sup>1)</sup>	Mn <sup>1)</sup>	Cu <sup>1)</sup>	Zn <sup>1)</sup>
	[mg/kg TS]			
1. Schnitt 2012				
150/90/150	2639	95,1	8,0	21,6
Q1 [15%BK]	2202	45,0	7,7	30,8
Q3 [15%BrK]	2415	48,3	6,5	26,8
Q6 [15%BK+1kg Gips]	2381	57,4	8,0	36,9
Q13 [15%BK + GPmII+ Sil]	2284	58,4	5,5	23,7
2. Schnitt 2012				
150/90/150	3460	76,4	5,2	15,2
Q1 [15%BK]	2719	61,0	4,1	20,2
Q3 [15%BrK]	2529	62,9	3,9	22,0
Q6 [15%BK+1kg Gips]	2670	64,6	4,2	22,9
Q13 [15%BK + GPmII+ Sil]	2631	75,8	3,5	18,5
1. Schnitt 2013				
150/90/150	2414	96,7	4,4	15,8
Q1 [15%BK]	2307	46,0	5,2	27,6
Q3 [15%BrK]	2375	55,7	4,7	29,4
Q6 [15%BK+1kg Gips]	2551	61,7	4,9	34,0
Q13 [15%BK + GPmII+ Sil]	2260	59,7	3,6	20,7
2. Schnitt 2013				
150/90/150	2395	256,6	4,3	23,9
Q1 [15%BK]	3008	159,2	5,6	34,3
Q3 [15%BrK]	2745	182,3	5,0	28,9
Q6 [15%BK+1kg Gips]	2915	225,3	4,8	29,1
Q13 [15%BK + GPmII+ Sil]	3113	299,7	4,9	20,5

<sup>1)</sup> Optimale Gehalte nach Bergmann (1983) zum Blühbeginn (BBCH 61) für Mg 0,15 - 0,3 % TS, Mn 40 - 150 ppm TS, Cu 6 - 15 ppm TS und Zn 20 - 50 ppm TS sowie nach Von Wulffen et al. (2008) zum Rispschieben (BBCH 51) des ersten Aufwuchses für Mg 0,1 - 0,3 % TS, Mn 28 - 140 mg/kg TS und Cu 5,0 - 15,0 mg/kg TS.

In Tabelle 59 sind die N-, P- und K-Gehalte im Aufwuchs für den Boden **Zinnitz** über den Versuchszeitraum angegeben. Hier gelten dieselben optimalen Versorgungsbereiche nach Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008) wie für den Boden Welzow (siehe oben). Im Mittel über den Versuchszeitraum lag für die **N-Versorgung** nach Bergmann (1983) eine Unterversorgung und nach Von Wulffen et al. (2008) eine

Tabelle 59: N-, P- und K-Gehalte des Pflanzenaufwuchses über den Versuchszeitraum auf dem Boden Zinnitz (n = 1)

Variante	1. Schnitt 2012 <sup>1)</sup>			2. Schnitt 2012 <sup>1)</sup>			1. Schnitt 2013 <sup>1)</sup>			2. Schnitt 2013 <sup>1)</sup>			Mittelwerte 2012 - 2013 <sup>1)</sup>		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
	[g/kg TS]														
150/90/150	47,5	2,0	41,7	17,6	1,8	13,8	26,0	2,0	15,7	9,6	2,8	7,9	25,2	2,1	19,8
Q1+N [15%BK+60N]	38,1	2,3	46,3	12,8	2,4	19,5	25,2	2,7	29,8	9,6	2,9	12,8	21,4	2,6	27,1
Q1 [15%BK]	36,5	2,7	51,1	13,9	2,7	26,2	22,5	3,0	38,8	8,3	2,9	13,5	20,3	2,8	32,4
Q2 [30%BK]	37,4	2,3	55,3	18,1	2,6	30,9	20,7	2,9	34,1	8,9	2,9	12,9	21,3	2,7	33,3
Q3+N [15%BrK+60N]	39,8	2,6	46,7	16,7	2,6	20,4	24,2	2,5	26,8	8,6	2,8	12,2	22,3	2,6	26,5
Q3 [15%BrK]	37,9	2,8	54,0	19,4	2,7	28,9	24,7	3,2	37,5	8,8	3,4	14,5	22,7	3,0	33,7
Q4 [30%BrK]	37,3	2,7	53,4	15,3	2,7	24,3	23,4	3,2	35,7	8,4	3,3	14,7	21,1	3,0	32,0
Q5 [15%BK+0,5kg Gips]	38,6	3,0	54,5	14,9	3,1	26,1	23,8	3,2	41,4	8,5	3,7	15,7	21,4	3,2	34,4
Q6 [15%BK+1kg Gips]	40,2	2,9	53,4	14,2	2,7	24,6	25,3	3,2	38,1	8,6	3,8	16,3	22,1	3,2	33,1
Q7 [15%BrK+0,5kg Gips]	40,1	2,6	48,5	12,2	3,2	23,5	26,4	3,3	41,7	8,8	3,8	18,2	21,8	3,2	33,0
Q8 [15%BK+GPMII]	40,2	2,8	54,9	14,2	2,7	25,4	22,9	3,2	37,0	8,7	3,9	17,1	21,5	3,1	33,6
Q9 [15%BrK+GPMII+0,5kg Gips]	44,0	2,1	52,7	19,7	2,4	28,4	24,3	2,6	32,5	8,7	3,4	14,0	24,2	2,6	31,9
Q10 [30%BK H1T2]	40,1	2,4	50,5	14,0	2,8	26,8	21,1	3,1	38,6	8,4	3,6	15,9	20,9	3,0	32,9
Q11 [30%BK H2T1]	37,5	2,3	48,9	15,4	2,6	28,8	23,5	3,1	42,7	9,1	3,3	16,6	21,3	2,8	34,3
Q12 [30%BK H2T2]	34,9	2,4	49,1	15,3	2,6	26,8	22,7	3,0	39,1	8,8	3,3	15,7	20,4	2,8	32,7
Q13 [15%BK + GPMII+ Sil]	41,3	2,3	55,2	21,6	2,1	33,2	23,4	2,9	34,3	8,6	3,7	16,9	23,7	2,7	34,9
Q14 [15%BK + GPMV + Sil]	38,5	2,3	51,0	17,5	2,3	28,5	22,8	2,9	36,8	8,9	3,8	18,0	21,9	2,8	33,6
Q15 [15%BK + GPMV + Sil H2T1]	36,7	2,0	49,7	16,5	2,5	29,1	23,9	2,8	37,3	8,8	4,0	18,3	21,5	2,8	33,6

<sup>1)</sup> Optimale Gehalte nach Bergmann (1983) zum Blühbeginn (BBCH 61) für N 2,8 - 4,0 % TS, P 0,3 - 0,5 % TS und K 2,5 - 3,5 % TS sowie nach Von Wulfen et al. (2008) zum Rispenstadien (BBCH 51) für N 2,0 - 3,5 % TS, P 0,28 - 0,35 % TS und K 2,2 - 3,2 % TS.

optimale Versorgung vor. Die N-Versorgung zum ersten Schnitt 2012 ist nach Bergmann (1983) als optimal einzustufen. Die Varianten 150/90/150, Q9 und Q13 weisen eine Überversorgung aus. Nach Von Wulffen et al. (2008) sind alle Varianten überversorgt, bis auf die Variante Q12 die noch im optimalen Bereich liegt. In den weiteren Schnitten bis zum Versuchsende erreicht kein N-Gehalt mehr den optimalen Bereich nach Bergmann (1983), so dass eine zum Teil sehr deutliche Unterversorgung insbesondere zum zweiten Schnitt 2013 vorliegt. Da der optimale Versorgungsbereich nach Von Wulffen et al. (2008) geringere Werte als optimal annimmt, ist die Variante Q13 zum zweiten Schnitt 2012 noch optimal mit N versorgt. Insgesamt nehmen die N-Gehalte in allen Varianten zum zweiten Schnitt 2012 ab, so dass in den anderen Varianten auch nach Von Wulffen et al. (2008) eine Unterversorgung vorliegt. Der erste Schnitt 2013 weist in allen Varianten N-Gehalte im optimalen Bereich auf. Die N-Gehalte mit durchschnittlich 8,8 g/kg TS sind nach Von Wulffen et al. (2008) deutlich als unterversorgt einzuordnen. Insgesamt liegen keine eindeutigen Unterschiede zwischen den verschiedenen BKS vor, die für einen einheitlichen Trend sprechen.

Die mittlere **P-Versorgung** über den Versuchszeitraum liegt in allen Varianten unter den optimalen Bereichen nach Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008). Wie auch schon für den Boden Welzow ist im Versuchsverlauf eine tendenzielle Erhöhung der P-Gehalte im Aufwuchs der BKS-Varianten mit einer Gabenhöhe von 90 t/ha zu beobachten. So sind zum ersten Schnitt 2012 nur die Varianten Q5 (Bergmann, 1983) und zudem nach Von Wulffen et al. (2008) die Varianten Q3, Q6 und Q8 optimal mit P versorgt. Eine optimale P-Versorgung des Aufwuchses zum zweiten Schnitt 2012 ist nur in den Varianten Q5 und Q7 nach Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008) sowie in der Variante Q10 nur nach Von Wulffen et al. (2008) gegeben. Für die weiteren Varianten liegt zu beiden Schnitten lediglich eine Unterversorgung mit P vor. Der erste Schnitt 2013 ergibt nach Von Wulffen et al. (2008) eine ausreichende P-Versorgung in allen Varianten, ausgenommen der Varianten 150/90/150, Q1+N, Q3+N und Q9, bei denen eine Unterversorgung vorliegt. Nach Bergmann (1983) sind zudem die Varianten Q2 und Q13 - Q15 leicht unterversorgt. Zum zweiten Schnitt 2013 sind nach Bergmann (1983) nur die Varianten 150/90/150, Q1+N - Q3+N leicht unterversorgt. Die weiteren Varianten sind optimal mit P versorgt. Nach Von Wulffen et al. (2008) hingegen liegt keine Unterversorgung mehr vor, sondern lediglich eine Überversorgung folgender Varianten Q5 - Q8, Q10 und Q13 - Q15.

Die mittleren **K-Gehalte** über den Versuchszeitraum zeigen nach Bergmann (1983) eine ausreichende K-Versorgung an. Lediglich die mineralische Referenzvariante ist nach Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008) als unterversorgt einzuordnen. Nach Von Wulffen et al. (2008) neigen alle Varianten zu einer leichten Überversorgung

bis auf die Varianten mit reduzierter BKS-Gabe (Q1+N und Q3+N). Die K-Gehalte des Aufwuchses aller Varianten sind zum ersten Schnitt 2012 nach Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008) deutlich überversorgt, wobei die mineralische Referenzvariante (150/90/150) den mit Abstand geringsten K-Gehalt aufweist. Zum zweiten Schnitt 2012 liegt nach Bergmann (1983) keine und nach Von Wulffen et al. (2008) lediglich in der Variante Q13 eine K-Überversorgung vor. Eine K-Unterversorgung ist nach Von Wulffen et al. (2008) in den Varianten 150/90/150, Q1+N und Q3+N sowie zudem nach Bergmann (1983) in den Varianten Q4, Q6 und Q7 vorhanden. Zum ersten Schnitt 2013 liegt eine eindeutige K-Unterversorgung in der mineralischen Referenzvariante (150/90/150) vor (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Nach Von Wulffen et al. (2008) sind lediglich die Varianten Q1+N und Q3+N optimal versorgt, zusätzlich nach Bergmann (1983) auch die Varianten Q2, Q9 und Q13. Die weiteren BKS-Varianten weisen eine K-Überversorgung auf, die sich allerdings zum zweiten Schnitt 2013 in eine K-Unterversorgung in allen Varianten umkehrt.

Die Gesamtgehalte der **Nährstoffe Mg, Mn, Cu und Zn** in dem Knautgrasaufwuchs (n = 1) zu den vier Schnittterminen für die mineralische Referenzvariante sowie ausgewählte BKS-Varianten auf dem Boden Zinnitz sind in Tabelle 60 dargestellt. Die Einordnung der Nährstoffgehalte erfolgt nach den Angaben von Bergmann (1983) zum Blühbeginn (BBCH 61) für Mg 0,15 - 0,3 % TS, Mn 40 - 150 ppm TS, Cu 6 - 15 ppm TS und Zn 20 - 50 ppm TS und nach Von Wulffen et al. (2008) zum Rispschieben (BBCH 51) des ersten Aufwuchses für Mg 0,1 - 0,3 % TS, Mn 28 - 140 mg/kg TS und Cu 5,0 - 15,0 mg/kg TS. Die Mg-, Mn-, Cu- und Zn-Gehalte im Knautgrasaufwuchs des gewachsenen Ackerboden Zinnitz liegen auf einem tendenziell höheren Niveau als die entsprechenden Gehalte im Aufwuchs auf dem Kippboden Welzow. Die mineralische Referenzvariante weist im gesamten Versuchszeitraum stark erhöhte Mg-Gehalte im Aufwuchs auf, die die Empfehlungen von Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008) deutlich überschreiten. Die BKS-Varianten weisen optimale Mg-Gehalte auf, die zu dem jeweils zweiten Erntetermin die Empfehlungen leicht überschreiten. Der geringere Mn-Gehalt im Aufwuchs der BKS-Variante mit 15 Vol.-% Bio- und Braunkohle (Q1 und Q3) lässt auf eine unzureichende Mn-Versorgung schließen. Zu dem zweiten Schnitt 2012 und dem ersten Schnitt 2013 liegen auch in diesen beiden Varianten, wie auch in allen anderen geprüften BKS-Varianten, optimale Mn-Gehalte vor (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Die mineralische Referenzvariante weist im gesamten Versuchszeitraum, insbesondere zu den zweiten Schnitten der Versuchsjahre, deutlich erhöhte Mn-Gehalte im Aufwuchs auf. Auch die Mn-Gehalte im Aufwuchs der BKS-Varianten sind zum zweiten Schnitt 2013 erhöht und liegen über den empfohlenen Gehalten von Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008). Die Cu-Gehalte im Auf-



wuchs der mineralischen Referenzvariante sind die tendenziell höher als die Cu-Gehalte der mit BKS gedüngten Varianten. Allerdings liegen die Cu-Gehalte aller Varianten in dem gesamten Zeitraum innerhalb der Empfehlungen von Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008). Die Zn-Gehalte im Aufwuchs aller Varianten weisen über den Versuchszeitraum ein vergleichbares Niveau im Optimalbereich nach Bergmann (1983) auf.

Tabelle 60: Gesamtgehalte der Nährstoffe Mg, Mn, Cu und Zn in dem Knaulgrasaufwuchs des Bodens Zinnitz zu den vier Ernteterminen (KW-Auszug; n = 1)

Variante	Mg <sup>1)</sup>	Mn <sup>1)</sup>	Cu <sup>1)</sup>	Zn <sup>1)</sup>
	[mg/kg TS]			
1. Schnitt 2012				
150/90/150	4158	94,9	12,1	40,2
Q1 [15%BK]	2147	26,2	9,4	27,5
Q3 [15%BrK]	2346	27,2	9,7	30,1
Q6 [15%BK+1kg Gips]	2615	53,6	13,5	37,5
Q13 [15%BK + GPmII+ Sil]	2793	51,7	11,1	39,4
2. Schnitt 2012				
150/90/150	5082	323,2	8,2	38,5
Q1 [15%BK]	3134	69,2	5,9	25,4
Q3 [15%BrK]	3232	107,7	6,9	31,6
Q6 [15%BK+1kg Gips]	3226	96,7	6,0	27,9
Q13 [15%BK + GPmII+ Sil]	3111	117,0	7,9	29,6
1. Schnitt 2013				
150/90/150	4424	142,0	8,4	38,2
Q1 [15%BK]	2685	43,6	7,5	35,4
Q3 [15%BrK]	2790	86,0	6,8	38,7
Q6 [15%BK+1kg Gips]	2854	58,8	7,9	43,3
Q13 [15%BK + GPmII+ Sil]	2493	83,3	6,0	30,1
2. Schnitt 2013				
150/90/150	3826	536,3	6,5	32,3
Q1 [15%BK]	3594	167,6	6,6	29,4
Q3 [15%BrK]	3602	245,4	6,7	37,1
Q6 [15%BK+1kg Gips]	3268	303,7	6,0	39,4
Q13 [15%BK + GPmII+ Sil]	3249	214,1	5,2	27,3

<sup>1)</sup> Optimale Gehalte nach Bergmann (1983) zum Blühbeginn (BBCH 61) für Mg 0,15 - 0,3 % TS, Mn 40 - 150 ppm TS, Cu 6 - 15 ppm TS und Zn 20 - 50 ppm TS sowie nach Von Wulffen et al. (2008) zum Rispschieben (BBCH 51) des ersten Aufwuchses für Mg 0,1 - 0,3 % TS, Mn 28 - 140 mg/kg TS und Cu 5,0 - 15,0 mg/kg TS.

Der N-, P- und K-Gesamtentzug über den Versuchszeitraum ist in Tabelle 61 dargestellt. Die höchsten **N-Entzüge** liegen auf beiden Böden in den Varianten Q9 und Q13 vor. Dies deckt sich auch mit den Ertragsbeobachtungen in Tabelle 56. Auf beiden Böden ist eine Zunahme des N-Entzuges nach der Erhöhung des Biokohleanteils von 15 auf 30 Vol.-% in dem BKS (Q1 vs. Q2) über das Niveau der mineralischen Referenzva-

riante (150/90/150) zu verzeichnen. Auch nimmt der N-Entzug auf beiden Böden nach der Variation der Fermentationsparameter (Verlängerung und/oder Temperaturerhöhung während der Fermentation) gegenüber der Standardparameter ab (Q10 - Q12 vs. Q2). Das BKS mit GPMII, als Substitut für den Laubkompost, und einem Silagezusatz (Q13) erhöht die N-Entzüge auf beiden Böden deutlich über das Niveau der reinen Mineraldüngung (150/90/150) und auch über das Niveau der BKS-Variante ohne Silage (Q8) und den BKS-Varianten mit GPMIV mit Silage (Q14 und Q15). Für den Boden Welzow sind tendenziell geringere N-Entzüge in den BKS-Varianten mit Braunkohle (Q3+N - Q4, Q7) zu beobachten. Eine Ausnahme bildet die Variante Q9, ebenfalls ein BKS mit Braunkohle, das den höchsten N-Entzug aufweist. Die Braunkohle-BKS (Q3+N - Q4, Q7, Q9) weisen auf dem Boden Zinnitz vergleichbare N-Entzüge zu den BKS mit Biokohle (Q1+N - Q2, Q5) auf.

Die **P-Entzüge** der mit BKS gedüngten Varianten sind auf dem Boden Welzow doppelt so hoch wie in der mineralisch gedüngten Variante (Tabelle 61). Auf den Böden Welzow und Zinnitz ist eine Zunahme des P-Entzuges mit der Steigerung der Gabenhöhe von 30t/ha auf 90t/ha BKS (Q1+N vs. Q1 bzw. Q3+N vs. Q3) erkennbar. Auch wird eine Zunahme des P-Entzuges durch die Erhöhung des Biokohleanteils von 15 auf 30 Vol.-% in dem BKS (Q1 vs. Q2) deutlich. Dieser Effekt ist für die Braunkohle-BKS nicht zu beobachten (Q3 vs. Q4). Der Zusatz von Gips (Q5 und Q6 vs. Q1 bzw. Q7 und Q9 vs. Q3) sowie das Substitut GPMII (Q8 vs. Q1) in Kombination mit Biokohle haben ebenfalls einen erhöhenden Einfluss auf den P-Entzug. Das GPMII zum Braunkohle-BKS bewirkt hingegen nur auf dem Boden Welzow eine Erhöhung des P-Entzuges. Der Zusatz von Silage (Q13 vs. Q8) erzielt auf dem Boden Welzow einen positiven und auf dem Boden Zinnitz einen negativen Effekt auf den P-Entzug. Das Substitut GPMIV in Kombination mit Silage (Q14 vs. Q13) zieht auf dem Boden Welzow einen Rückgang des P-Entzuges nach sich, der durch die Verlängerung der Fermentationsdauer (Q15 vs. Q14) verstärkt wird. Auf dem Boden Zinnitz kommt es zunächst zu einer Erhöhung des P-Entzuges bei Verwendung des GPMIV mit Silage (Q14 vs. Q13), jedoch nach Verlängerung der Fermentationsdauer (Q15 vs. Q14) ebenfalls zu einem Rückgang des P-Entzuges. Die Variation der Fermentationsparameter hat auf dem Boden Welzow einen negativen und auf dem Boden Zinnitz einen positiven Effekt auf den P-Entzug (Q13 - Q15 vs. Q2).

Die BKS-Düngung verdoppelt auf beiden Böden den **K-Entzug** mit dem Aufwuchs im Vergleich zu der mineralischen Düngung. Der K-Entzug steigt mit Erhöhung der BKS-Gabe von 30t/ha auf 90t/ha BKS (Q1+N vs. Q1 bzw. Q3+N vs. Q3) an. Auch wird eine Zunahme des K-Entzuges durch die Erhöhung des Biokohleanteils von 15 auf 30 Vol.-% in dem BKS (Q1 vs. Q2) deutlich. Dieser Effekt ist für die Braunkohle-BKS nicht

zu beobachten (Q3 vs. Q4). Allerdings erhöht die Substitution von 15 Vol.-% Biokohle mit Braunkohle den K-Entzug im Pflanzenaufwuchs (Q1 vs. Q3). Der Zusatz von Gips bewirkt in den BKS mit Biokohle eine weitere Steigerung des K-Entzuges (Q5, Q6 vs. Q1). Für die BKS mit Braunkohle sind rückläufige K-Entzüge durch den Gipszusatz zu verzeichnen (Q7 vs. Q3). Das Substitut GPMII sowie der Zusatz von Silage (Q8, Q9, Q13 vs. Q1 bzw. Q7/Q3) bewirken eine Steigerung des K-Entzuges auf beiden Böden und in Kombination mit beiden Kohlearten gegenüber den jeweiligen Vergleichspartnern. Das BKS mit dem Substitut GPMIV (Q14) weist gegenüber dem BKS mit dem Substitut GPMII (Q13) geringere K-Entzüge auf, die durch die Verlängerung der Fermentationsdauer (Q15) weiter verringert werden. Die Variation der Fermentationsparameter (Q10 - Q12) reduziert die K-Entzüge mit dem Pflanzenaufwuchs gegenüber den Standardfermentationsparametern (Q2). Insgesamt ist festzuhalten, dass die BKS einen positiven Effekt auf die P- und K-Versorgung der Pflanzen haben.

Tabelle 61: Gesamtentzug mit dem Pflanzenaufwuchs der 4 Schnitte in 2012 und 2013 der Böden Welzow und Zinnitz

Variante	Welzow						Zinnitz					
	N		P		K		N		P		K	
	[kg/ha]	[%] <sup>1)</sup>	[kg/ha]	[%] <sup>1)</sup>	[kg/ha]	[%] <sup>1)</sup>	[kg/ha]	[%] <sup>1)</sup>	[kg/ha]	[%] <sup>1)</sup>	[kg/ha]	[%] <sup>1)</sup>
150/90/150	257,2	100,0	13,0	100,0	225,9	100,0	259,7	100,0	23,1	100,0	197,6	100,0
Q1+N [15%BK+60N]	262,6	102,1	21,5	165,3	323,7	143,3	229,5	88,4	29,7	128,6	289,1	146,3
Q1 [15%BK]	237,1	92,2	27,8	213,0	387,4	171,5	234,2	90,2	35,6	153,8	383,7	194,2
Q2 [30%BK]	297,6	115,7	31,7	243,2	460,1	203,6	276,8	106,6	38,9	168,2	437,8	221,5
Q3+N [15%BrK+60N]	226,9	88,2	19,5	150,0	278,5	123,3	236,6	91,1	29,6	128,1	279,6	141,5
Q3 [15%BrK]	251,9	97,9	27,8	213,7	402,8	178,3	271,6	104,6	38,8	167,9	406,2	205,6
Q4 [30%BrK]	236,6	92,0	26,9	206,2	380,9	168,6	257,8	99,3	39,0	168,4	394,2	199,5
Q5 [15%BK+0,5kg Gips]	262,0	101,9	30,6	234,6	405,9	179,7	265,1	102,1	42,6	184,1	434,6	219,9
Q6 [15%BK+1kg Gips]	281,5	109,5	31,4	240,8	425,5	188,3	270,4	104,1	41,0	177,1	409,6	207,3
Q7 [15%BrK+0,5kg Gips]	240,7	93,6	30,1	230,9	389,9	172,6	257,0	99,0	40,9	176,7	400,7	202,8
Q8 [15%BK+GPMII]	245,7	95,6	31,1	238,9	392,8	173,9	255,9	98,5	41,8	180,8	410,3	207,6
Q9 [15%BrK+GPMII+0,5kg Gips]	334,5	130,1	29,0	222,4	438,6	194,2	333,3	128,4	41,1	177,7	447,8	226,6
Q10 [30%BK H1T2]	219,8	85,5	27,3	209,3	350,5	155,1	241,3	92,9	39,8	172,2	403,9	204,4
Q11 [30%BK H2T1]	202,1	78,6	25,2	193,4	326,7	144,6	247,0	95,1	39,9	172,3	426,7	215,9
Q12 [30%BK H2T2]	228,7	88,9	26,3	201,4	374,2	165,6	249,5	96,1	38,0	164,3	411,4	208,2
Q13 [15%BK + GPMII+ Sil]	303,2	117,9	33,3	255,2	482,8	213,7	321,2	123,7	41,2	177,9	482,1	243,9
Q14 [15%BK + GPMV + Sil]	265,2	103,1	29,7	228,1	408,8	181,0	292,6	112,7	43,5	188,0	462,8	234,2
Q15 [15%BK + GPMV + Sil H2T1]	257,5	100,1	28,8	221,3	430,0	190,3	264,9	102,0	39,7	171,5	426,3	215,7

<sup>1)</sup> Entzug in Relation zu der Referenzvariante 150/90/150

#### 4.2.3.4 Schwermetallgehalte in dem Pflanzenaufwuchs

Die Gesamtgehalte der Schwermetalle Pb, Cd, Cr und Ni in dem Knaulgrasaufwuchs (n = 1) zu den vier Schnittterminen für die mineralische Referenzvariante sowie ausgewählte BKS-Varianten auf dem Boden Welzow sind in Tabelle 62 und auf dem Boden Zinnitz in Tabelle 63 dargestellt. Die Schwermetallgehalte im Aufwuchs aller Varianten auf beiden Böden sind im gesamten Versuchszeitraum sehr gering. Die Grenzwerte der FuttmV (1981) für Pb (45 mg/kg TS) und Cd (1,1 mg/kg TS) werden deutlich unterschritten. In dem Aufwuchs des zweiten Schnittes der Jahre 2012 und 2103 sind tendenziell höhere Ni- und Cr-Gehalte im Vergleich zu dem jeweils ersten Schnitt festzustellen. Der Aufwuchs der mineralischen Referenzvariante weist auf dem Boden Welzow durchgängig höhere Ni-Gehalte in dem Aufwuchs auf als die BKS-Varianten. Für die Elemente Ni und Cr gibt es aktuell keine Grenzwerte in Grünfütter.

Tabelle 62: Gesamtgehalte der Schwermetalle Pb, Cd, Cr und Ni in dem Knaulgrasaufwuchs auf dem Boden Welzow zu den vier Ernteterminen (KW-Auszug; n = 1)

Variante	Pb	Cd	Cr	Ni
	[mg/kg TS]			
1. Schnitt 2012				
150/90/150	0,1	< 0,5	1,0	1,5
Q1 [15%BK]	0,1	< 0,5	0,7	< 1
Q3 [15%BrK]	0,2	< 0,5	0,8	< 1
Q6 [15%BK+1kg Gips]	0,1	< 0,5	0,3	1,1
Q13 [15%BK + GPmII+ Sil]	0,1	< 0,5	0,8	< 1
2. Schnitt 2012				
150/90/150	0,5	< 0,5	1,2	1,4
Q1 [15%BK]	0,4	< 0,5	1,4	1,1
Q3 [15%BrK]	0,4	< 0,5	1,1	< 1
Q6 [15%BK+1kg Gips]	0,4	< 0,5	1,1	< 1
Q13 [15%BK + GPmII+ Sil]	0,3	< 0,5	1,9	1,4
1. Schnitt 2013				
150/90/150	0,3	0,1	0,9	1,7
Q1 [15%BK]	0,2	0,0	1,1	0,9
Q3 [15%BrK]	0,2	0,1	1,0	0,9
Q6 [15%BK+1kg Gips]	0,3	0,1	0,9	1,0
Q13 [15%BK + GPmII+ Sil]	0,4	0,1	0,7	0,9
2. Schnitt 2013				
150/90/150	0,8	0,1	2,2	2,5
Q1 [15%BK]	1,1	0,1	3,2	2,3
Q3 [15%BrK]	0,9	0,1	2,4	1,8
Q6 [15%BK+1kg Gips]	0,8	0,1	2,3	1,8
Q13 [15%BK + GPmII+ Sil]	1,2	0,1	2,0	1,9

Für eine ungefähre Einordnung kann die BioAbfV (2012) § 4 Abs. 3 hinzugezogen werden. Diese Grenzwerte gelten allerdings in Bezug auf die Ausbringung von pflanzlichen Reststoffen. Demnach sind bei der Ausbringung von < 20 t TM/ha × 3a sind folgende Schwermetallgrenzwerte zulässig: Pb 150 mg/kg TS, Cd 1,5 mg/kg TS, Cr 100 mg/kg TS, Ni 50 mg/kg TS, Cu 100 mg/kg TS und Zn 400 mg/kg TS (BioAbfV (2012), §4 Abs. 3 gemäß § 6 Abs. 1 Satz 1). Erfolgt die Ausbringung von < 30 t TM/ha × 3a gelten reduzierte Schwermetallgrenzwerte: Pb 100 mg/kg TS, Cd 1,0 mg/kg TS, Cr 70 mg/kg TS, Ni 35 mg/kg TS, Cu 70 mg/kg TS und Zn 300 mg/kg TS (BioAbfV (2012), §4 Abs. 3 gemäß § 6 Abs. 1 Satz 2). Die festgestellten Cr- und Ni-Gehalte sind bei einer Einordnung nach der BioAbfV (2012) als gering einzuschätzen. Die Schwermetalle Cu und Zn sind als Spurennährstoffe im Kapitel 4.2.3.3 aufgeführt. Der Einordnung entsprechend der BioAbfV (2012) sind die Cu- und Ni-Gehalte in dem Knaulgrasaufwuchs als gering einzuordnen.

Tabelle 63: Gesamtgehalte der Schwermetalle Pb, Cd, Cr und Ni in dem Knaulgrasaufwuchs auf dem Boden Zinnitz zu den vier Ernteterminen (KW-Auszug; n = 1)

Variante	Pb	Cd	Cr	Ni
		[mg/kg TS]		
1. Schnitt 2012				
150/90/150	0,4	< 0,5	1,4	< 1
Q1 [15%BK]	0,3	< 0,5	1,0	< 1
Q3 [15%BrK]	0,2	< 0,5	0,9	< 1
Q6 [15%BK+1kg Gips]	0,2	< 0,5	0,7	< 1
Q13 [15%BK + GPmII+ Sil]	0,2	< 0,5	0,9	< 1
2. Schnitt 2012				
150/90/150	0,4	< 0,5	1,6	< 1
Q1 [15%BK]	0,5	< 0,5	2,8	1,2
Q3 [15%BrK]	0,5	< 0,5	1,9	1,2
Q6 [15%BK+1kg Gips]	0,4	< 0,5	1,5	< 1
Q13 [15%BK + GPmII+ Sil]	0,6	< 0,5	1,2	< 1
1. Schnitt 2013				
150/90/150	0,3	0,2	0,6	1,0
Q1 [15%BK]	0,3	0,1	0,9	2,0
Q3 [15%BrK]	0,4	0,1	1,1	0,6
Q6 [15%BK+1kg Gips]	0,4	0,1	1,3	0,8
Q13 [15%BK + GPmII+ Sil]	0,3	0,1	0,6	0,5
2. Schnitt 2013				
150/90/150	1,0	0,3	1,9	1,3
Q1 [15%BK]	0,8	0,2	3,1	1,7
Q3 [15%BrK]	1,1	0,2	2,5	1,4
Q6 [15%BK+1kg Gips]	1,1	0,2	2,6	1,4
Q13 [15%BK + GPmII+ Sil]	0,8	0,2	2,1	1,4

## 4.3 Bodensäulen

### 4.3.1 Bodenparameter

#### 4.3.1.1 Physikalische Bodenkennwerte

Der Boden Welzow weist, insbesondere im Oberboden (0 - 25 cm), höhere Trockenrohdichten (Rt) auf als der Boden Zinnitz (Abbildung 48). In den tieferen Schichten nimmt die Trockenrohdichte zu. Die Applikation des BKS15 verringert die Trockenrohdichte im Oberboden im Vergleich zur Variante MIN tendenziell. Eine Erhöhung der BKS-Gabe von 30 auf 90 t/ha verstärkt diesen Effekt leicht. Für den Boden Welzow liegen keine signifikanten Unterschiede vor. Lediglich die BKS-Gabe von 90 t/ha bewirkt tendenziell geringere Trockenrohdichten. Die Variante MIN des Bodens Welzow weist in der Tiefenstufe 25 - 40 cm eine signifikant höhere Trockenrohdichte auf als die Variante 30 BKS15. In der Tiefenstufe 60 - 100 cm ist die Trockenrohdichte der Variante 90 BKS15 signifikant höher als die Trockenrohdichte der Variante MIN.

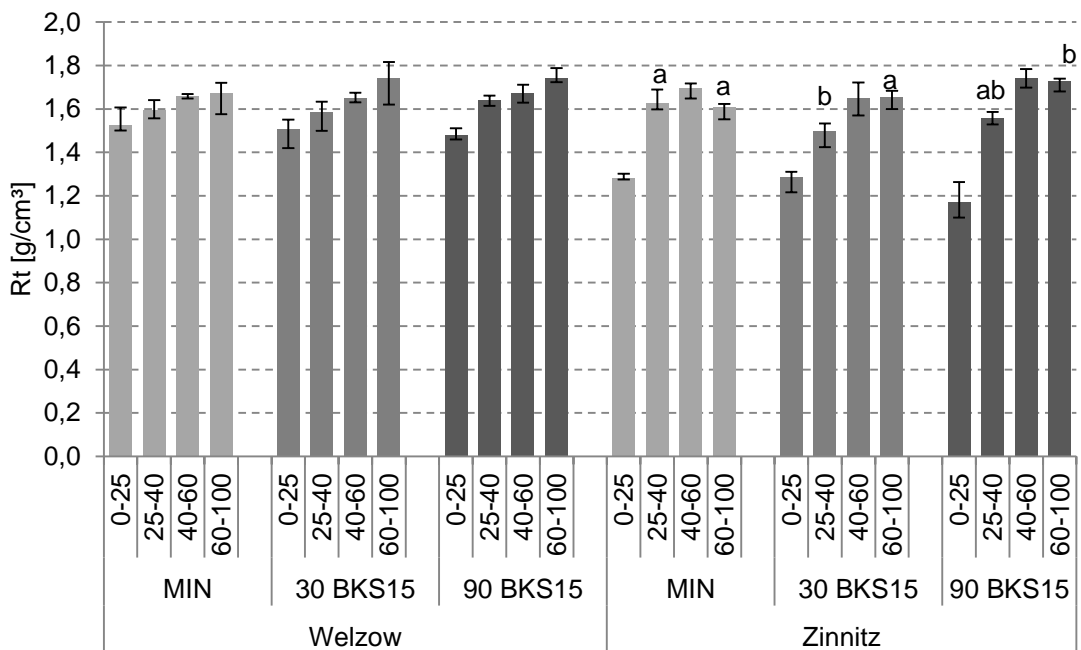


Abbildung 48: Trockenrohdichten (Rt) der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (Median, Min., Max., n = 4, unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Standorte und Tiefenstufen; NEMENYI-Test  $p < 0,05$ )

Das Gesamtporenvolumen nimmt in dem Oberboden Welzow mit den BKS-Gaben im Vergleich zur Mineraldüngervariante ab (Tabelle 64). Allerdings bewirkt die Steigerung der BKS-Gabe von 30 auf 90 t/ha keine weitere Zunahme des Gesamtporenvolumens

sondern einen tendenziellen Rückgang im Vergleich zu der Variante 30 BKS15. Das Gesamtporenvolumen aller Varianten des Bodens Welzow ist als mittel einzustufen (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). In dem Boden Zinnitz liegt ein hohes Gesamtporenvolumen vor (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Die Gabenhöhe 30 t BKS15/ha zeigt keinen Effekt auf das Gesamtporenvolumen. Die Gabe von 90 t/ha BKS15 führt zu einem Anstieg des GPV um 3,7 Vol.-%.

Der Unterboden wurde durch die BKS nicht beeinträchtigt. In beiden Böden sind abnehmende Gesamtporenvolumina mit absteigender Tiefe zu verzeichnen.

Tabelle 64: Gesamtporenvolumen (GPV) der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (n = 1)

Tiefe [cm]	Welzow			Zinnitz		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
	[Vol.-%]					
0 - 25	40,7	43,4	42,2	50,3	50,4	54,0
25 - 40	39,0	39,6	37,0	37,4	42,5	40,7
40 - 60	36,2	36,6	35,4	34,6	37,3	34,0
60 - 100	36,0	34,2	32,5	39,3	36,8	34,8

Abbildung 49 zeigt die Luftkapazitäten zum Versuchsende in den vier Schichten der Bodensäulen Welzow und Zinnitz. Die Luftkapazität des Oberbodens Welzow ist in allen drei Düngungsstufen als sehr hoch einzustufen (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Mit zunehmender Tiefe nimmt die Luftkapazität des Bodens Welzow ab. In den oberen drei Tiefenstufen weist die Variante 30 BKS15 signifikant höhere Luftkapazitäten auf als die Variante 90 BKS15. In der Tiefenstufe 60 - 100 cm ist die Luftkapazität der Variante MIN signifikant höher als die der Variante 90 BKS15. Dies ist wahrscheinlich auf eine nachträgliche Sackung bedingt durch die Überstauung der Bodensäule mit der Variante 90 BKS15 durch die Fehlfunktion der automatischen Bewässerung zurückzuführen.



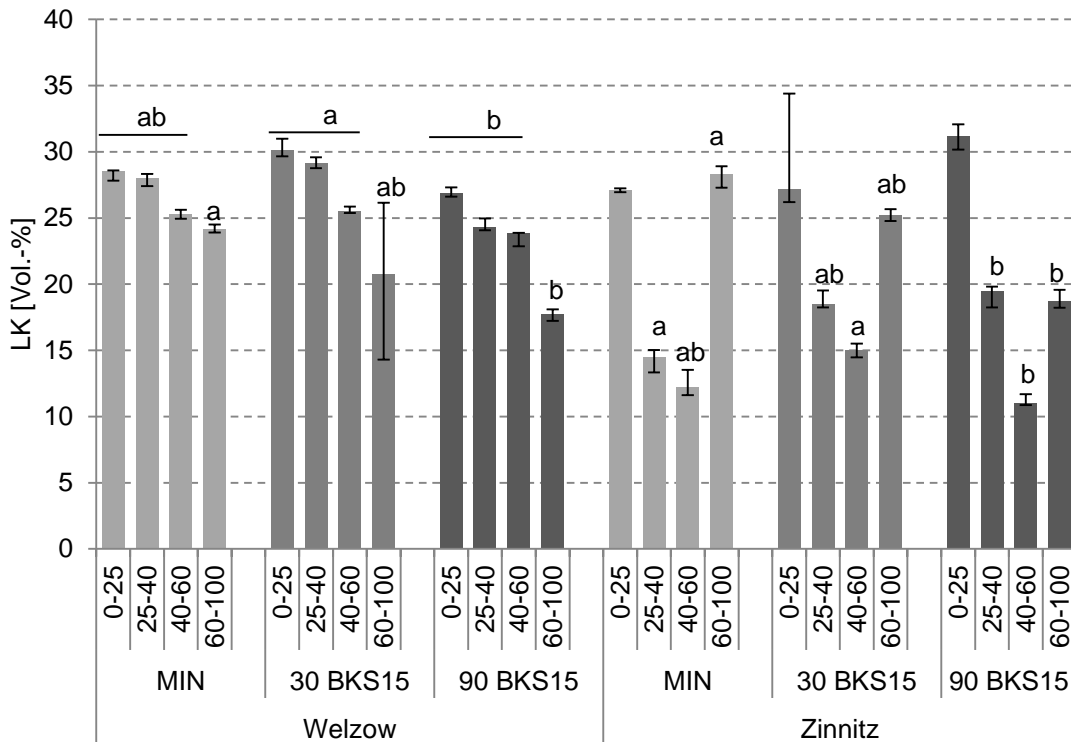


Abbildung 49: Luftkapazität (LK) der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (Median, Min., Max., n = 4, unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Standorte und Tiefenstufen; NEMENYI-Test  $p < 0,05$ )

Der Boden Zinnitz zeigt sehr hohe Luftkapazitäten im Oberboden, die durch die BKS-Gabe ansteigen (Abbildung 49). Im Unterboden (Tiefenstufe 60 - 100 cm) der Varianten MIN und 30 BKS15 fallen ebenfalls relativ hohe Luftkapazitäten auf, die auf den Bodenartwechsel von Su3 zu mSgs zurückzuführen sind (vgl. Tabelle 18). Für den Oberboden sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten nachweisbar. Allerdings weist die Variante 90 BKS15 eine tendenziell höhere Luftkapazität auf als die Variante MIN. In der Tiefenstufe 25 - 40 cm ist die Luftkapazität der Variante 90 BKS15 signifikant höher als die der Variante MIN. In der Tiefenstufe 40 - 60 cm weist die Variante 30 BKS15 eine signifikant höhere Luftkapazität auf als die Variante 90 BKS15. In der Tiefenstufe 60 - 100 cm weist die Variante MIN eine signifikant höhere Luftkapazität auf als die Variante 90 BKS15. Die Luftkapazität, insbesondere der Tiefenstufen 25 - 40 cm und 40 - 60 cm, ist in dem Boden Welzow tendenziell höher als in dem Boden Zinnitz.

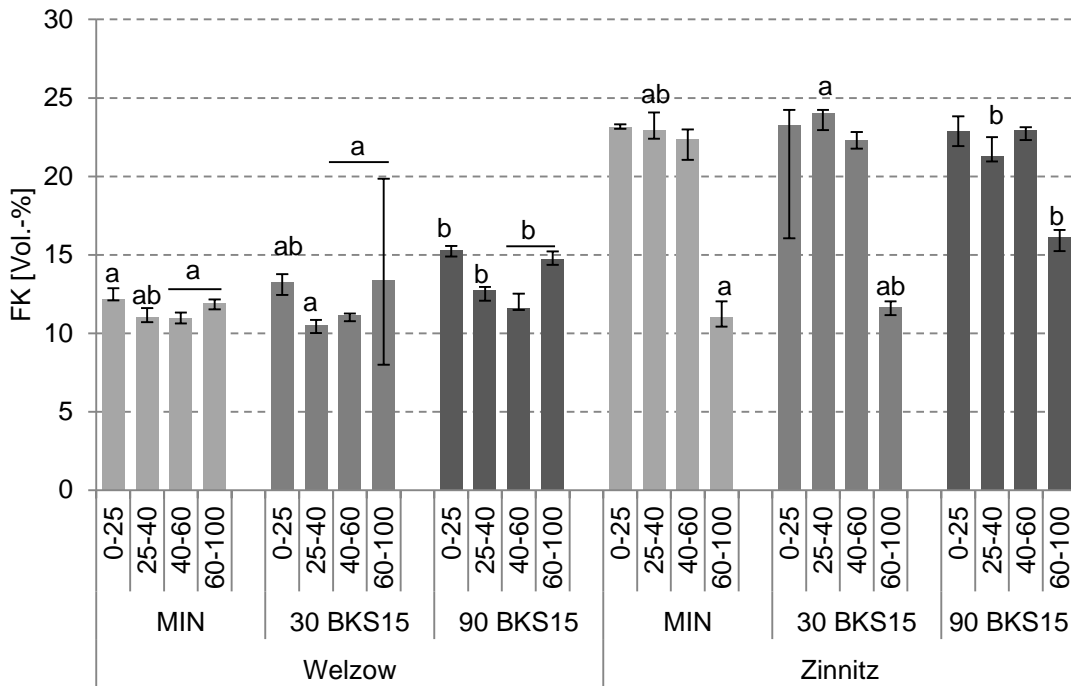


Abbildung 50: Feldkapazität (FK) der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (Median, Min., Max., n = 4, unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Standorte und Tiefenstufen; NEMENYI-Test  $p < 0,05$ )

Die sehr geringe Feldkapazität (Ad-Hoc-AG Boden, 2005) des Bodens Welzow liegt auf einem deutlich niedrigeren Niveau als die des Bodens Zinnitz (Abbildung 50). Der Oberboden (0 - 25 cm) weist etwas höhere Feldkapazitäten auf als die darunterliegenden Schichten. Die Feldkapazität der Variante 90 BKS15 ist im Oberboden sowie in den Tiefenstufen 40 - 60 cm und 60 - 100 cm signifikant höher als die Feldkapazität der Variante MIN. In der Tiefenstufe 25 - 40 cm ist die Feldkapazität der Variante 90 BKS15 signifikant höher als die der Variante 30 BKS15. Die geringen Feldkapazitäten (Ad-Hoc-AG Boden, 2005) des Bodens Zinnitz weisen innerhalb ihrer Schichten vergleichbare Werte auf. Auffällig ist ein deutlicher Abfall der Feldkapazität von der Tiefenstufe 40 - 60 cm zu der Tiefenstufe 60 - 100 cm. Dies ist auf den bereits beschriebenen Bodenartwechsel zurückzuführen. Signifikante Unterschiede treten nur in zwei Tiefenstufen auf. Die Variante 30 BKS15 weist in der Tiefenstufe 25 - 40 cm eine signifikant höhere Feldkapazität auf als die Variante 90 BKS15. In der Tiefenstufe 60 - 100 cm liegt eine signifikant höhere Feldkapazität in der Variante 90 BKS15 gegenüber der Variante MIN vor.

Die nutzbare Feldkapazität des Bodens Welzow (Abbildung 51) weist ein geringes Niveau auf (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Die Variante 90 BKS15 weist signifikant höhere nutzbare Feldkapazitäten auf als die Variante MIN (Tiefenstufen 0 - 25 cm und 60 -

100 cm) und 30 BKS15 (Tiefenstufen 25 - 40 cm und 40 - 60 cm). Die nutzbare Feldkapazität des Bodens Zinnitz ist als mittel einzustufen (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Im Oberboden liegen keine signifikanten Unterschiede vor. In der Tiefenstufe 25 - 40 cm weist die Variante 30 BKS15 eine signifikant höhere nutzbare Feldkapazität auf als die Variante 90 BKS15. Die Variante 90 BKS15 weist in den Tiefenstufen 40 - 60 cm und 60 - 100 cm signifikant höhere nutzbare Feldkapazitäten auf als die Variante MIN.

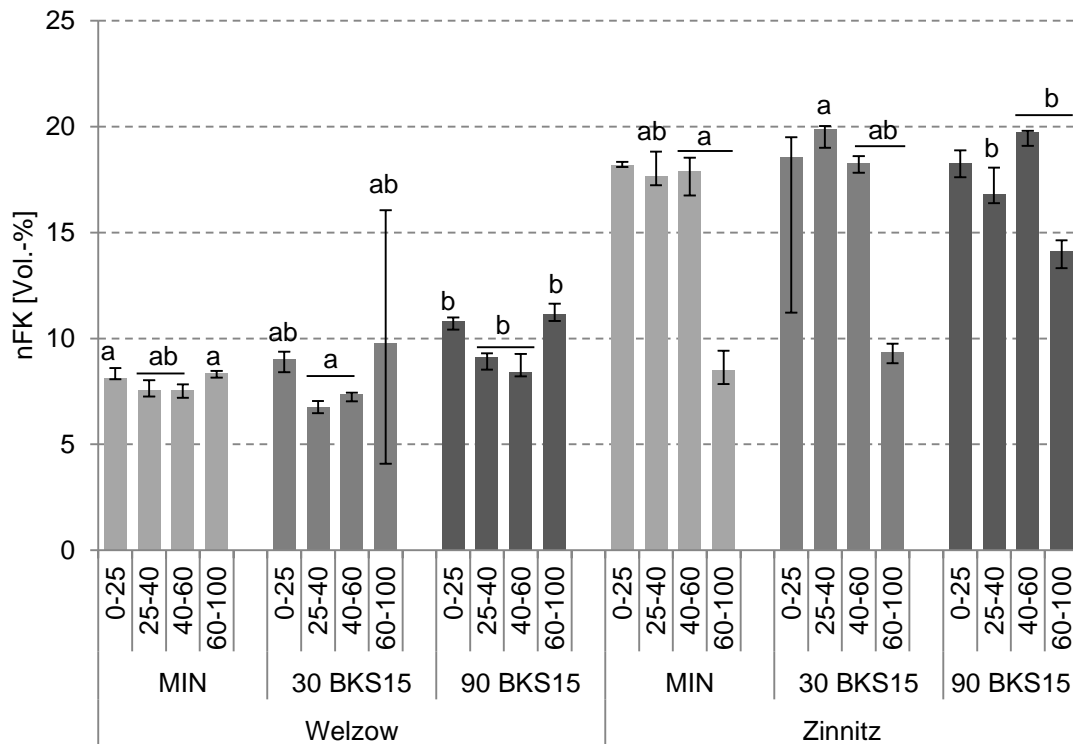


Abbildung 51: Nutzbare Feldkapazität (nFK) der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (Median, Min., Max.,  $n = 4$ , unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Standorte und Tiefenstufen; NEMENYI-Test  $p < 0,05$ )

Das geringe Totwasser (TW) des Oberbodens Welzow (Abbildung 52) ist in allen Varianten tendenziell höher als in den darunterliegenden Tiefenstufen, die als sehr gering einzuordnen sind (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Der Totwassergehalt des Oberbodens Welzow in der Variante 90 BKS15 ist signifikant höher als in der Variante MIN. Die Variante 30 BKS15 weist in der Tiefenstufe 25 - 40 cm einen signifikant höheren Totwassergehalt auf als die Variante MIN und in der Tiefenstufe 40 - 60 cm einen signifikant höheren Totwassergehalt als die Variante 90 BKS15. In der Tiefenstufe 60 - 100 cm liegen keine signifikanten Unterschiede vor. Der Totwassergehalt des Bodens Welzow in den Tiefenstufen 0 - 25 cm, 25 - 40 cm und 40 - 60 cm ist tendenziell geringer als in

dem Boden Zinnitz. Auch in dem Boden Zinnitz ist das Totwasser als gering bis sehr gering einzuschätzen (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Die Oberböden des Bodens Zinnitz weisen in den BKS-Varianten tendenziell höhere Totwassergehalte auf als die darunterliegende Schicht. Im Gegensatz zu der Variante MIN, in der der Oberboden einen tendenziell geringeren Totwassergehalt aufweist als die darunterliegende Schicht. Die Oberböden Zinnitz zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten. In der Variante MIN (Tiefenstufe 25 - 40 cm) liegt ein signifikant höherer Totwassergehalt als in der Variante 30 BKS15 vor. In den Tiefenstufen 40 - 60 cm und 60 - 100 cm ist der Totwassergehalt der Variante MIN signifikant höher als der der Variante 90 BKS15.

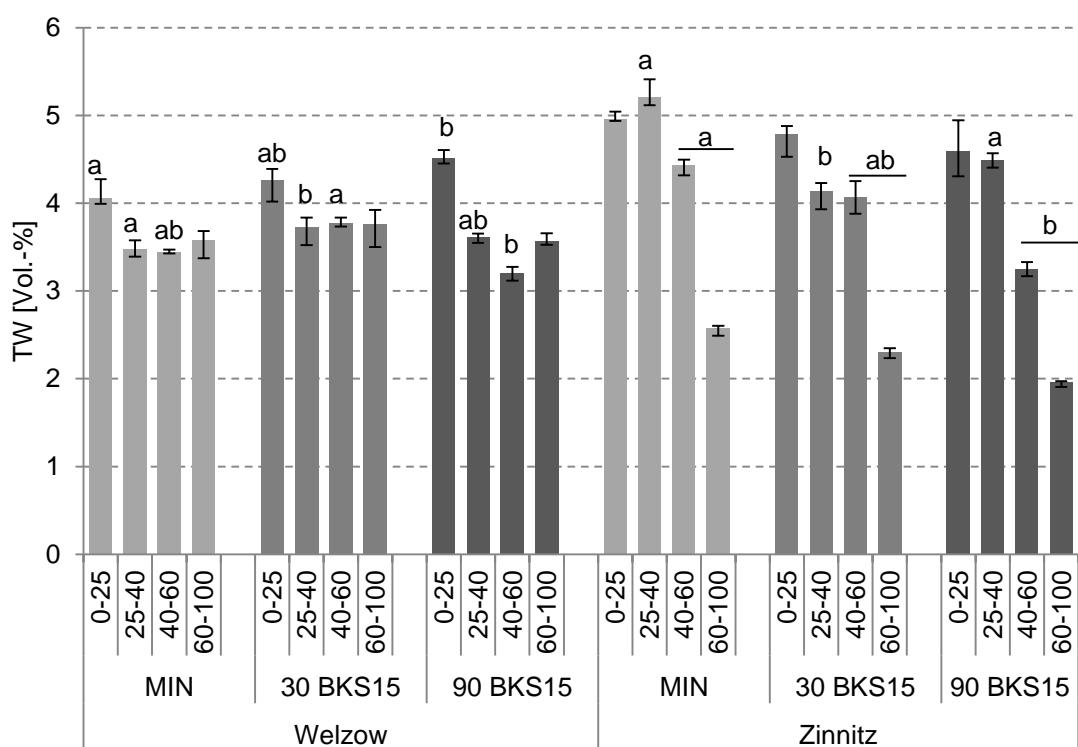


Abbildung 52: Totwasser der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (Median, Min., Max., n = 4, unterschiedliche Kleinbuchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede innerhalb der Standorte und Tiefenstufen; NEMENYI-Test  $p < 0,05$ )

Die signifikante Steigerung der Feldkapazität, nutzbaren Feldkapazität und des Totwassergehaltes im Oberboden Welzow in der Variante 90 BKS15 gegenüber der Variante MIN kann auf die Anwendung der 90 t/ha BKS15 zurückgeführt werden, da die Einmischung des BKS15 lediglich im Oberboden erfolgt ist. Der Boden Zinnitz zeigt im Oberboden keine signifikanten Effekte der BKS-Gabe.

### 4.3.1.2 Chemische Bodenkennwerte

Der pH-Wert des Bodens Welzow liegt in allen Tiefenstufen und Varianten auf einem hohen Niveau (gemittelt bei 7,5) und wird durch die BKS-Gabe nicht beeinträchtigt (Tabelle 65). Der leicht saure pH-Wert des Oberbodens Zinnitz wird hingegen durch die BKS-Gabe leicht um 0,2 (30 BKS15) bzw. 0,5 (90 BKS15) im Vergleich zu der Variante MIN angehoben (Tabelle 65).

Tabelle 65: pH-Werte der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (n = 1)

Tiefe [cm]	Welzow			Zinnitz		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
0 - 25	7,4	7,5	7,3	5,8	6,0	6,3
25 - 40	7,5	7,6	7,5	5,7	5,6	5,8
40 - 60	7,6	7,6	7,6	5,6	5,4	5,6
60 - 100	7,6	7,6	7,6	5,5	5,5	5,6

Abbildung 53 zeigt die  $C_{org}$ -Gehalte und Abbildung 54 die  $N_t$ -Gehalte der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende. Die ausschließlich mineralisch gedüngte Variante (MIN) des Bodens Welzow weist in allen Tiefenstufen vergleichbare  $C_{org}$ -Gehalte auf. Dies ist auf ihren technologischen Ursprung zurückzuführen. Die  $N_t$ -Gehalte des Oberbodens sind lediglich tendenziell höher als die  $N_t$ -Gehalte der darunterliegenden Tiefenstufen. Die Applikation von 30 t/ha BKS15 erhöht den  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalt des Oberbodens leicht. Die Gabenhöhe 90 t/ha BKS15 steigert den  $C_{org}$ -Gehalt des Oberbodens um 0,4 % und den  $N_t$ -Gehalt um 0,02 % im Vergleich zu der Variante MIN. Die  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalte des Bodens Zinnitz liegen mit Ausnahme der Tiefenstufe 60 - 100 cm auf einem deutlich höheren Niveau als die  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalte des Bodens Welzow. Es ist ein schrittweiser Rückgang der  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalte vom Oberboden zu den tieferliegenden Schichten zu erkennen. Dies ist auf die natürliche Pedogenese des Bodens und eine schrittweise Anreicherung von  $C_{org}$  und  $N_t$  im Rahmen der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung zurückzuführen. Die BKS-Gabe von 30 t/ha BKS15 zeigt keinen Effekt auf den  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalt des Oberbodens. Jedoch kann mit einer Gabenhöhe von 90 t/ha BKS15 der  $C_{org}$ -Gehalt des Oberbodens um 0,2 % im Vergleich zu der Variante MIN gesteigert werden. Der  $N_t$ -Gehalt wird nur tendenziell um 0,004 % gesteigert.

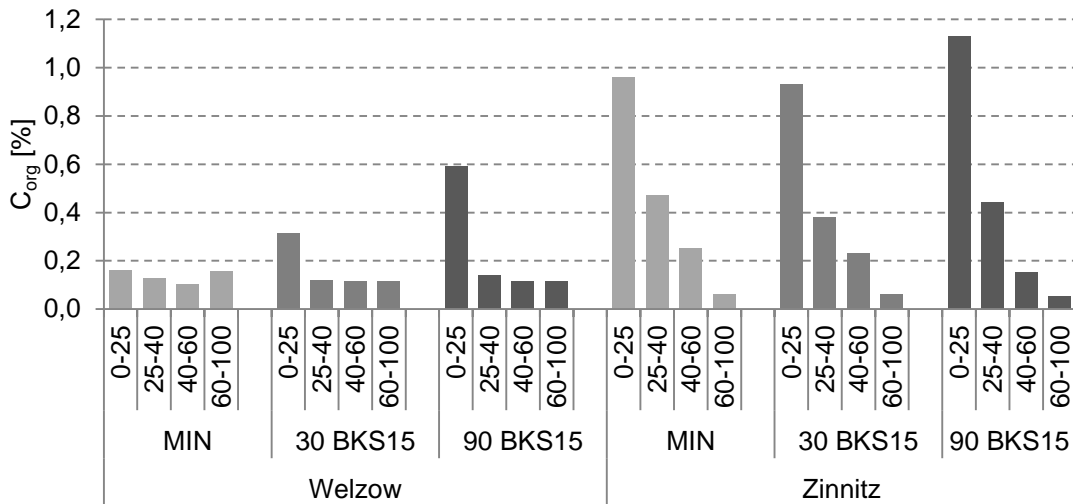


Abbildung 53: C<sub>org</sub>-Gehalte der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (n = 1)

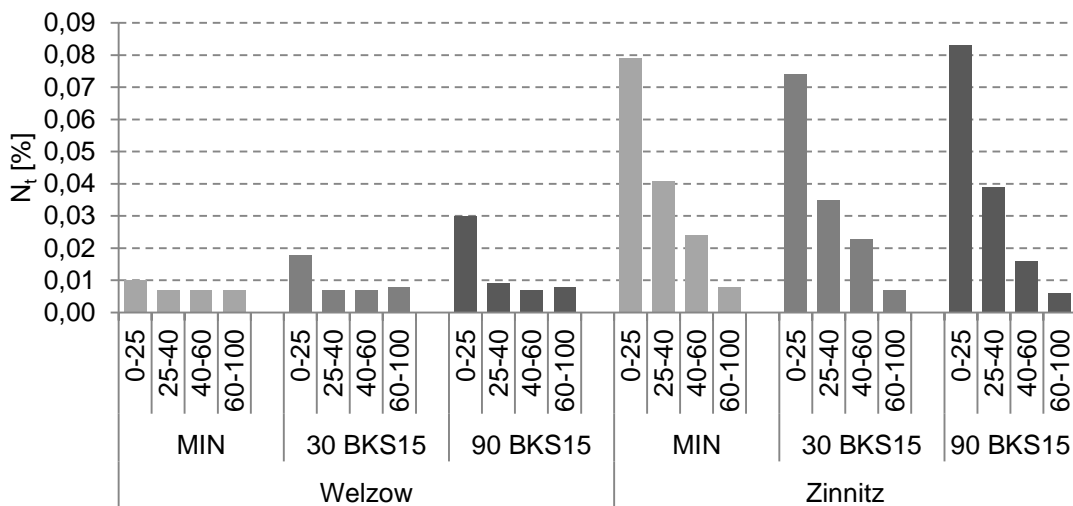


Abbildung 54: N<sub>t</sub>-Gehalte der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (n = 1)

Tabelle 66 zeigt die chemischen Kennwerte in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen Welzow zum Versuchsende. Mit der Applikation der BKS sowie deren Steigerung von 30 auf 90 t/ha erhöht sich das C/N-Verhältnis im Oberboden (0 - 25 cm). Die Bestimmung der C<sub>hwi</sub>- und N<sub>hwi</sub>-Gehalte erfolgte nur für die oberen beiden Tiefenstufen. Insbesondere für den Oberboden (0 - 25 cm) ist eine deutliche Zunahme der C<sub>hwi</sub>- und N<sub>hwi</sub>-Gehalte mit der Applikation des BKS und dessen Mengenerhöhung zu verzeichnen. In der zweiten Tiefenstufe ist nur eine tendenzielle Steigerung der C<sub>hwi</sub>- und N<sub>hwi</sub>-Gehalte zu erkennen. Allerdings sind die festgestellten C<sub>hwi</sub>-Gehalte in allen Varianten und Tiefenstufen nach Schulz (1997) in den Bereich V (sehr gering versorgt) einzuordnen.

Die  $P_{DL}$ -Gehalte der Oberböden der Varianten MIN, 30 BKS15 und 90 BKS15 sind in die Gehaltsklassen D, B und D nach Von Wulffen et al. (2008) einzuordnen. Der Gehaltsklasse A entsprechen die  $P_{DL}$ -Gehalte der Unterböden aller Varianten (Von Wulffen et al., 2008). Die  $K_{DL}$ -Gehalte liegen auf einem sehr geringen Niveau und sind in allen Varianten und Tiefenstufen der Gehaltsklasse A nach Von Wulffen et al. (2008) zuzuordnen. Die Tiefenstufe 25 - 40 cm der BKS-Varianten weist tendenziell geringere  $K_{DL}$ -Gehalte auf als der jeweilige Oberboden und die darunter liegenden Schichten.

Tabelle 67 zeigt die chemischen Kennwerte in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen Zinnitz zum Versuchsende. Die C/N-Verhältnisse werden durch die BKS-Gabe nicht bzw. nur marginal beeinflusst. Die Bestimmung der  $C_{hwl}$ - und  $N_{hwl}$ -Gehalte erfolgte nur für die oberen beiden Tiefenstufen. Die BKS-Gabe bewirkt einen tendenziellen Rückgang der  $C_{hwl}$ -Gehalte im Vergleich zur Variante MIN. Eine Steigerung der BKS-Gabe von 30 auf 90 t/ha zeigt eine tendenzielle Erhöhung der  $C_{hwl}$ -Gehalte. Dieser Effekt spiegelt sich in dem Oberboden, der nach Schulz (1997) mit  $C_{hwl}$  in dem Bereich II (hoch, Variante MIN) und dem anzustrebenden Bereich III (mittel, Variante 30 BKS15 und 90 BKS15) versorgt ist. Auf einem geringeren Niveau ist die  $C_{hwl}$ -Versorgung der zweiten Tiefenstufe nach Schulz (1997) in den Bereich V (sehr gering) einzuordnen. Die Wirkung des BKS auf die  $N_{hwl}$ -Gehalte ist in diesem Versuch diffus. Die BKS-Gabe von 30 t/ha reduziert die  $N_{hwl}$ -Gehalte im Oberboden und erhöht sie in der zweiten Tiefenstufe im Vergleich zur Variante MIN. Die BKS-Gabe von 90 t/ha erhöht die  $N_{hwl}$ -Gehalte im Oberboden und zeigt in der zweiten Tiefenstufe keinen Effekt im Vergleich zu der Variante MIN. Die Mengenerhöhung des BKS bewirkt im Oberboden eine Steigerung der  $N_{hwl}$ -Gehalte, in der zweiten Tiefenstufe jedoch eine Reduzierung der  $N_{hwl}$ -Gehalte (Vergleich Variante 30 BKS15 und 90 BKS15).

Die  $P_{DL}$ -Gehalte der Oberböden der Varianten MIN, 30 BKS15 und 90 BKS15 sind in die Gehaltsklassen C, B/C und C nach Von Wulffen et al. (2008) einzuordnen. Der Gehaltsklasse A entsprechen die  $P_{DL}$ -Gehalte der Unterböden aller Varianten (Von Wulffen et al., 2008). Die  $K_{DL}$ -Gehalte liegen auf einem sehr geringen Niveau und sind in den Varianten MIN und 30 BKS15 in allen Tiefenstufen (Ausnahme Oberboden Variante MIN) der Gehaltsklasse A nach Von Wulffen et al. (2008) zuzuordnen. Auffällig ist, dass der Boden der Variante 90 BKS15 bis in eine Tiefe von 60 cm  $K_{DL}$ -Gehalte von rund 50 mg/kg aufweist und damit in die Gehaltsklasse B nach Von Wulffen et al. (2008) einzugliedern ist. Die Schicht von 60 - 100 cm weist normale  $K_{DL}$ -Gehalte von 16,5 mg/kg auf, die der Gehaltsklasse A entsprechen.

Tabelle 66: Chemische Kennwerte des Bodens Welzow in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (n = 1)

Parameter	Variante Tiefe [cm]	MIN				30 BKS15				90 BKS15			
		0 - 25	25 - 40	40 - 60	60 - 100	0 - 25	25 - 40	40 - 60	60 - 100	0 - 25	25 - 40	40 - 60	60 - 100
C/N		16,2	18,3	14,9	22,3	17,4	16,9	16,3	14,5	19,7	15,3	16,3	14,5
C <sub>hwl</sub> <sup>1)</sup>	[mg/kg]	43,5 V	33,9 V	n. b.	n. b.	69,5 V	40,3 V	n. b.	n. b.	106,6 V	45,8 V	n. b.	n. b.
N <sub>hwl</sub>	[mg/kg]	4,8	4,0	n. b.	n. b.	7,4	4,7	n. b.	n. b.	10,7	5,5	n. b.	n. b.
P <sub>DL</sub> <sup>2)</sup>	[mg/kg]	59,0 D	14,1 A	13,2 A	15,5 A	38,5 B	14,7 A	14,2 A	15,3 A	57,2 D	14,2 A	14,2 A	13,2 A
K <sub>DL</sub> <sup>2)</sup>	[mg/kg]	13,0 A	19,0 A	17,1 A	14,7 A	14,6 A	9,6 A	13,3 A	13,5 A	25,7 A	10,3 A	24,0 A	23,2 A

<sup>1)</sup> römische Zahlen kennzeichnen die Gehaltsklassen nach Schulz (1997); <sup>2)</sup> Großbuchstaben kennzeichnen die Versorgungsstufen nach Von Wulffen et al. (2008)

Tabelle 67: Chemische Kennwerte des Bodens Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende (n = 1)

Parameter	Variante Tiefe [cm]	MIN				30 BKS15				90 BKS15			
		0 - 25	25 - 40	40 - 60	60 - 100	0 - 25	25 - 40	40 - 60	60 - 100	0 - 25	25 - 40	40 - 60	60 - 100
C/N		12,2	11,5	10,4	7,5	12,6	10,9	10,0	8,6	13,6	11,3	9,4	8,3
C <sub>hwl</sub> <sup>1)</sup>	[mg/kg]	306,9 II	165,9 V	n. b.	n. b.	287,0 III	125,6 V	n. b.	n. b.	292,9 III	148,6 V	n. b.	n. b.
N <sub>hwl</sub>	[mg/kg]	39,3	22,5	n. b.	n. b.	37,2	25,4	n. b.	n. b.	41,3	22,6	n. b.	n. b.
P <sub>DL</sub> <sup>2)</sup>	[mg/kg]	75,8 C	24,3 A	8,9 A	3,8 A	55,6 B/C	18,3 A	7,1 A	3,1 A	76,7 C	23,3 A	4,6 A	2,9 A
K <sub>DL</sub> <sup>2)</sup>	[mg/kg]	30,8 A/B	27,7 A	24,7 A	14,9 A	15,0 A	19,5 A	13,6 A	12,0 A	43,0 B	53,8 B	47,4 B	16,5 A

<sup>1)</sup> römische Zahlen kennzeichnen die Gehaltsklassen nach Schulz (1997); <sup>2)</sup> Großbuchstaben kennzeichnen die Versorgungsstufen nach Von Wulffen et al. (2008)



Der Oberboden Welzow sowie die darunterliegenden Schichten bis zur Tiefenstufe 40 - 60 cm weisen keine nennenswerten Mengen an  $N_{\min}$  auf (Abbildung 55), da ein Großteil des  $N_{\min}$  mit dem Pflanzenaufwuchs entzogen wurde. Allerdings sind die  $N_{\min}$ -Gehalte in der Tiefenstufe 60 - 100 cm erhöht, da der Sickerwasserstrom in dieser Tiefenstufe aufgrund der höheren Dichte (vgl. Abbildung 48) gestaut und damit die Verlagerung des  $NO_3$ -N abgeschwächt wurde. Die in dem Bereich 60 - 100 cm Tiefe gemessenen  $N_{\min}$ -Gehalte betragen 21,3 kg/ha (MIN), 49,0 kg/ha (30 BKS15) und 56,9 kg/ha (90 BKS15). Die Summe der verfügbaren  $N_{\min}$ -Gehalte aller Tiefenstufen je Variante beträgt 28,8 kg/ha (MIN), 63,7 kg/ha (30 BKS15) und 83,9 kg/ha (90 BKS15). Der Boden Zinnitz verfügt im Mittel über höhere  $N_{\min}$ -Gehalte als der Boden Welzow. Die Varianten MIN und 30 BKS15 des Bodens Zinnitz weisen ebenfalls Tendenzen zur Verlagerung des  $N_{\min}$  auf. Bei der Variante MIN ist dies nur tendenziell erkennbar. Die Variante 30 BKS15 zeigt einen deutlichen Peak mit 173,9 kg/ha  $N_{\min}$  in der Tiefenstufe 40 - 60 cm. Dies ist ebenfalls auf eine erhöhte Dichte in dieser Tiefenstufe (vgl. Abbildung 48) und die damit zusammenhängende Stauung des Sickerwasserstromes zu erklären. Der Oberboden und die Tiefenstufe 40 - 60 cm der Variante 90 BKS15 weisen ebenfalls erhöhte  $N_{\min}$ -Gehalte (101,9 bzw. 115,8 kg/ha) auf. Die Summe der verfügbaren  $N_{\min}$ -Gehalte aller Tiefenstufen je Variante beträgt 244,3 kg/ha (MIN), 402,5 kg/ha (30 BKS15) und 363,9 kg/ha (90 BKS15) kg/ha.

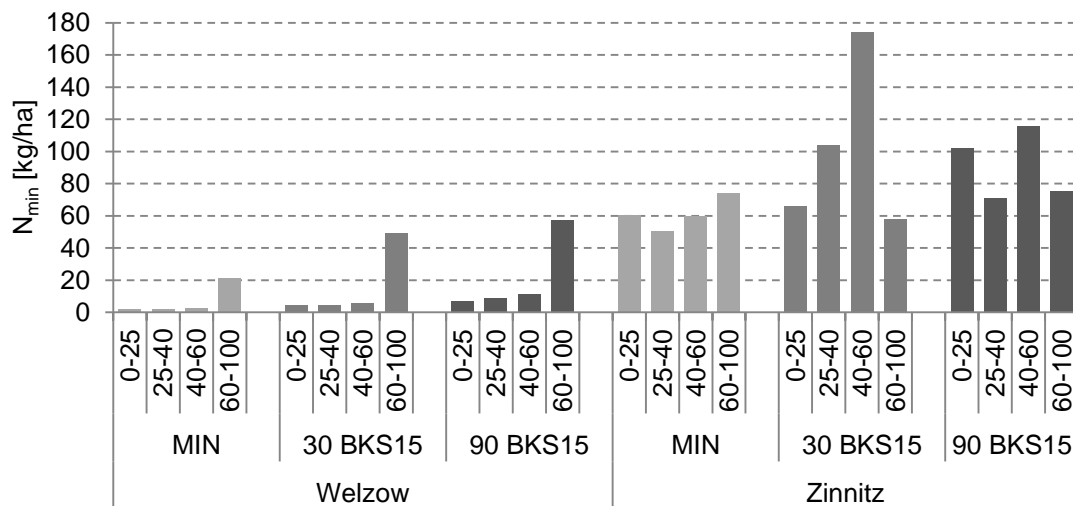


Abbildung 55:  $N_{\min}$ -Gehalte der Böden Welzow und Zinnitz in den vier Tiefenstufen der Bodensäulen zum Versuchsende ( $n = 1$ )

## 4.3.2 Pflanzenaufwuchs

### 4.3.2.1 Entwicklung des Pflanzenaufwuchses

Auf den Bodensäulen erfolgte der Anbau von Knautgras (*Dactylis glomerata* L.), Senf (*Sinapsis alba* L.), Sommergerste (*Hordeum vulgare* L.) und erneut Knautgras. Zwischen der Ernte des Knautgrases und der Aussaat der Sommergerste waren die Bodensäulen drei Monate nicht begrünt. Die Entwicklung der Pflanzenbestände ist in Tabelle 68 für den Boden Welzow und in Tabelle 69 für den Boden Zinnitz dargestellt. Nach der Aussaat des Knautgrases entwickelte sich der Bestand auf beiden Böden verhalten. Die Pflanzen neigen zu einem etiolierten Wuchs. Dem wurde mit einer Anpassung der Lichtverhältnisse sowie zwei Schröpfungsschnitten begegnet. Der Ertrag der Schröpfungsschnitte wurde nicht erfasst. Allerdings blieb trotz dieser Maßnahmen der Bestand sehr empfindlich. Die Internodien des Knautgrases waren deutlich länger als bei dem zeitgleich im Freien durchgeführten Gefäßversuch I. Auch knickten die Pflanzen ab einer Höhe von etwa 20 cm leicht ab, z.B. durch einen Luftzug durch Öffnen des Fensters. Die Bonituren erfolgten daher nur zu den Ernteterminen. Entscheidend für die Erfassung der entwickelten Biomasse ist die Ertragsbestimmung über die Masse (siehe Abbildung 56).

Der Senf lief auf dem Boden Welzow (Tabelle 68) zur ersten Aussaat besser auf als auf dem Boden Zinnitz (Tabelle 69). Allerdings reduzierte sich der Bestand innerhalb einer Woche auf beiden Böden dramatisch, aufgrund leicht etiolierten Wuchses in Kombination mit Schimmelinfectionen an der Triebbasis. Am 12.09.2012 erfolgte eine Neuaussaat des Senfes. Nach einer Woche war auf dem Boden Welzow ein üppiger Bestand mit 38 (MIN), 30 (90 BKS15) und 24 (30 BKS15) Pflanzen zu verzeichnen (Tabelle 68). Auf dem Boden Zinnitz liefen 39 (90 BKS15), 38 (MIN) und 29 (30 BKS15) Pflanzen auf (Tabelle 69). Im Vegetationsverlauf reduzierte sich der Bestand etwas, es kam aber nicht zu einem Totalausfall. Die Pflanzen waren ebenfalls empfindlich und neigen sich zur Seite. Zur Ernte als Ganzpflanze im Dezember 2012 lag eine durchschnittliche Bestandshöhe von 35 (30 BKS15), 30 (MIN) und 25 cm (90 BKS15) auf dem Boden Welzow (Tabelle 68) und 57 (30 BKS15), 50 (MIN) und 35 cm (90 BKS15) auf dem Boden Zinnitz (Tabelle 69) vor.

Ab dem März 2013 waren die Bodensäulen mit Sommergerste bewachsen. Der Bestand entwickelte sich bis etwa Mitte April optimal. Ab dem 15.04.2013 gingen in allen Varianten die jeweils höchsten Pflanzen zuerst ins Lager. Mit dem weiteren etiolierten Wachstum folgten auch die übrigen Pflanzen in die Lagerbildung. Es war keine Bestockung erkennbar. Die Triebbasis einzelner Pflanzen verjüngte sich, so dass am 10.06.2013 die Sommergerste als Ganzpflanze geerntet wurde. Die augenscheinlich

gesündesten und stabilsten Pflanzenbestände waren auf beiden Böden die Pflanzen der Variante 30 BKS15. Die Bestandshöhe konnte aufgrund der Lagerbildung nur als Abschätzung erfasst werden. Auf beiden Böden zeigte die Variante 30 BKS15 die höchsten Wuchseleistungen. Die Pflanzen der Variante 90 BKS15 waren auf dem Boden Welzow etwa 5 cm größer als die der Variante MIN. Auf dem Boden Zinnitz waren die Wuchseleistungen beider Varianten vergleichbar.

Im Anschluss an die Sommergerste erfolgte der erneute Anbau von Knautgras. Auf dem Boden Welzow entwickelt sich der Bestand in den Varianten MIN und 30 BKS15 mit einer Pflanzenanzahl von 44 bzw. 39 optimal. Die Variante 90 BKS15 wies hingegen nur 16 Pflanzen auf. Auch eine Nachsaat am 03.07.2013 konnte keine Abhilfe schaffen. Der Bestand der Variante 90 BKS15 entwickelte sich im weiteren Verlauf schlechter als die anderen Varianten. Zur Ernte im Oktober 2013 wiesen die Varianten 30 BKS15 und MIN vergleichbare Bestandshöhen (27 bzw. 24 cm) auf. Die Bestandshöhe der Variante 90 BKS15 war mit 17 cm deutlich geringer (Tabelle 68). Nach dieser Ernte bildete sich in allen Varianten des Bodens Welzow zunehmend Moos. Die Bestandshöhen zur Ernte im Januar 2014 waren mit 13 cm (MIN), 9 cm (30 BKS15) und 7 cm (90 BKS15) äußerst gering. Auf dem Boden Zinnitz wies die Variante 30 BKS15 mit 50 Pflanzen den stärksten Pflanzenbestand auf. Die Varianten MIN und 90 BKS15 waren mit 39 und 36 Pflanzen auf einem vergleichbaren Niveau. Dies spiegelte sich auch in der Bestandshöhenmessung zur Ernte im Oktober 2013 und Januar 2014 wieder (Tabelle 69).

Tabelle 68: Bestandsentwicklung der Kulturpflanzen im Versuchszeitraum auf den Bodensäulen des Bodens Welzow

Datum <sup>1)</sup>	MIN			30 BKS15			90 BKS15		
	Anzahl <sup>2)</sup>	Höhe [cm]	BBCH	Anzahl <sup>2)</sup>	Höhe [cm]	BBCH	Anzahl <sup>2)</sup>	Höhe [cm]	BBCH
Knautgras									
01.06.2011		2	10		2	10		2	10
04.07.2011			Schröpfungsschnitt (Wuchshöhe etwa 8 - 9 cm)						
02.08.2011			Schröpfungsschnitt (Wuchshöhe etwa 8 - 9 cm)						
<b>10.11.2011</b>			<b>19/33</b>			<b>19/33</b>			<b>19/33</b>
<b>08.02.2012</b>		<b>15</b>	<b>19/33</b>		<b>28</b>	<b>19/33</b>		<b>40</b>	<b>19/33</b>
<b>18.04.2012</b>			<b>19/33</b>			<b>19/33</b>			<b>19/33</b>
<b>09.08.2012</b>			<b>19/33</b>			<b>19/33</b>			<b>19/33</b>
Senf									
20.08.2012	23	1,5	10	13	1,5	10	16	2,5	10
27.08.2012	1	7	11	1	3,5	10	3	5	10
03.09.2012	1	7	11	0			2	7	11
20.09.2012	38	6,5	13	24	5	10	30	5,5	12
27.09.2012	36	7	14	24	6,5	11	32	7	13
11.10.2012	31	14	15	23	12	14	31	15	16
<b>10.12.2012</b>	<b>28</b>	<b>30</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>35</b>	<b>19</b>	<b>27</b>	<b>25</b>	<b>18</b>
Sommergerste									
19.03.2013	6	2	10	13	2	10	7	2	10
20.03.2013	18			21			21		
03.04.2013	26	30	12/13	24	28	12/13	24	27	12/13
15.04.2013		Bestand geht in allen Varianten ins Lager							
30.04.2013		27			28			28	
		keine Bestockung erkennbar, Verjüngung der Triebbasis							
<b>10.06.2013</b>		<b>~45</b>	<b>18/19</b>		<b>~60</b>	<b>19/21</b>		<b>~50</b>	<b>18/19</b>
Knautgras									
18.06.2013			10			10	0		*
16.07.2013	44	6	11/13	39	6	11/13	16	4	10/11
16.09.2013		15	11/19		13	11/19		10	11/15
<b>17.10.2013</b>		<b>24</b>	<b>15/21</b>		<b>27</b>	<b>15/21</b>		<b>17</b>	<b>15/19</b>
<b>06.01.2014</b>		<b>13</b>	<b>11/15</b>		<b>9</b>	<b>11/15</b>		<b>7</b>	<b>11/15</b>
Moosbildung									

<sup>1)</sup> Bonituren zur Ernte fett gedruckt, <sup>2)</sup> Anzahl der Pflanzen je Bodensäule

Tabelle 69: Bestandsentwicklung der Kulturpflanzen im Versuchszeitraum auf den Bodensäulen des Bodens Zinnitz

Datum <sup>1)</sup>	MIN			30 BKS15			90 BKS15			
	Anzahl <sup>2)</sup>	Höhe [cm]	BBCH	Anzahl <sup>2)</sup>	Höhe [cm]	BBCH	Anzahl <sup>2)</sup>	Höhe [cm]	BBCH	
Knaulgras										
26.05.2011		3	10		3	10		3	10	
04.07.2011			Schröpfschnitt (Wuchshöhe etwa 8 - 9 cm)							
02.08.2011			Schröpfschnitt (Wuchshöhe etwa 8 - 9 cm)							
<b>10.11.2011</b>			<b>19/33</b>			<b>19/33</b>			<b>19/33</b>	
<b>08.02.2012</b>		<b>50</b>	<b>19/33</b>		<b>48</b>	<b>19/33</b>		<b>48</b>	<b>19/33</b>	
<b>18.04.2012</b>			<b>19/33</b>			<b>19/33</b>			<b>19/33</b>	
<b>09.08.2012</b>			<b>19/33</b>			<b>19/33</b>			<b>19/33</b>	
Senf										
20.08.2012	9	2,5	10	3	1,5	10	13	2,5	10	
27.08.2012	2	6	10	0			4	5	10	
03.09.2012	2	6	11	0			2	6	11	
20.09.2012	38	6	12	29	6	10	39	7	13	
27.09.2012	32	7	13	33	7	11	35	8,5	14	
11.10.2012	26	16	15	27	12	15	36	14 <sup>3)</sup>	18	
<b>10.12.2012</b>	<b>21</b>	<b>50</b>	<b>19</b>	<b>25</b>	<b>57</b>	<b>19</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>18</b>	
Sommergerste										
19.03.2013	14	2	10	15	2	10	5	2	10	
20.03.2013	24			24			18			
03.04.2013	25	26	12/13	25	24	12/13	24	21	12/13	
15.04.2013		Bestand geht in allen Varianten ins Lager								
30.04.2013		28			28			30		
		keine Bestockung erkennbar, stattdessen Verjüngung der Basis								
<b>10.06.2013</b>		<b>~40</b>	<b>18/19</b>		<b>~55</b>	<b>19/21</b>		<b>~40</b>	<b>18/19</b>	
Knaulgras										
18.06.2013			10			10			10	
16.07.2013	39	7	11/13	50	7,5	11/13	36	8	11/13	
16.09.2013		30	11/19		36	11/19		30	11/19	
<b>17.10.2013</b>		<b>34</b>	<b>15/21</b>		<b>40</b>	<b>15/21</b>		<b>36</b>	<b>15/21</b>	
<b>06.01.2014</b>		<b>29</b>	<b>11/21</b>		<b>32</b>	<b>11/21</b>		<b>28</b>	<b>11/21</b>	

<sup>1)</sup> Bonituren zur Ernte fett gedruckt, <sup>2)</sup> Anzahl der Pflanzen je Bodensäule, <sup>3)</sup> davon zwei Pflanzen 27 cm hoch

### 4.3.2.2 Erträge

In dem Zeitraum 07/2011 - 07/2012 wurde als erste Kultur Knaulgras auf den Bodensäulen angebaut. Das Knaulgras wird in diesem Zeitraum viermal geerntet. Die Einzelerträge sind im Anhang 2.1 aufgeführt. Abbildung 56 zeigt den summierten Ertrag des Knaulgrases über alle Ernten. Die Ertragssummen staffeln sich mit zunehmender Höhe auf dem Boden Welzow (W) wie folgt: MIN < 30 BKS15 < 90 BKS15. Die Ertragssumme verdoppelt sich mit der einmaligen Gabe von 30 t/ha BKS15 gegenüber der Variante MIN. Die einmalige Gabe von 90 t/ha BKS15 bewirkt eine Erhöhung der Ertragssumme um 37,2 dt/ha gegenüber der Variante MIN. Auf dem Boden Zinnitz (Z) ergibt sich die höchste Ertragssumme in der Variante 30 BKS15. Hier liegt eine annähernde Verdoppelung der Ertragssumme mit einem Plus von 46,9 dt/ha gegenüber der Variante MIN vor, die eine Ertragssumme von 48,4 dt/ha erzielt. Die Ertragssumme der höchsten BKS-Gabe (Variante 90 BKS15) beträgt nur 42,5 dt/ha. Diese Variante ist damit die ertragsschwächste Variante auf dem Boden Zinnitz.

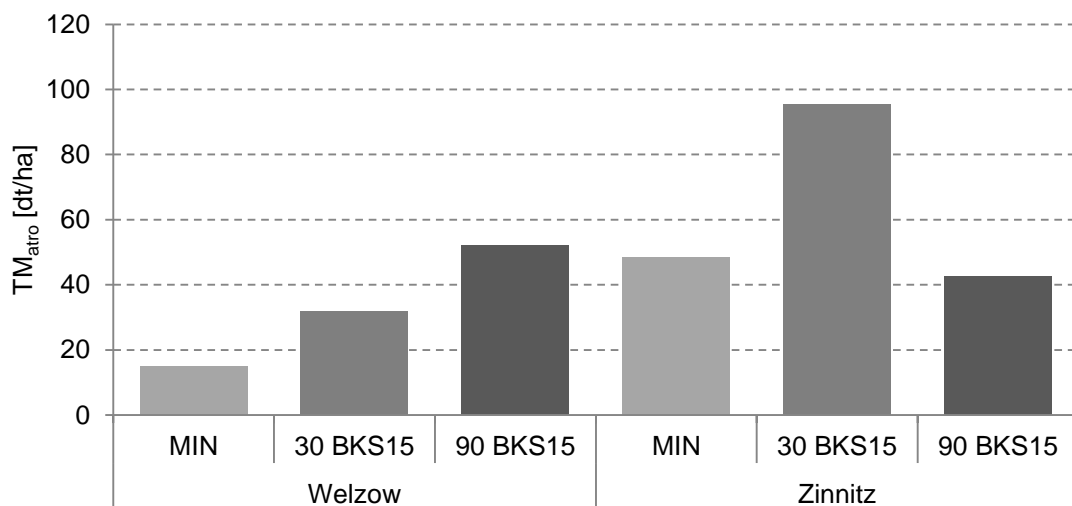


Abbildung 56: Ertragssumme der vier Knaulgrasernten in dem Zeitraum 07/2011 - 07/2012 auf den Böden Welzow und Zinnitz (n = 1)

Anschließend erfolgte in dem Zeitraum von 08/2012 - 12/2012 der Anbau von Senf. Der Ertrag der Ganzpflanze ist in Abbildung 57 dargestellt. Die höchsten Erträge sind auf beiden Böden in der Variante 30 BKS15 mit 17,6 dt/ha (W) und 27,4 dt/ha (Z) festzustellen. Insgesamt ergibt sich auf beiden Böden ein zunehmender Ertrag in der Reihenfolge der Varianten MIN < 90 BKS15 < 30 BKS15, wobei der Ertragsunterschied zwischen den Varianten MIN und 90 BKS15 auf dem Boden Welzow mit 1,2 dt/ha marginal ist. Die BKS-Gabe bewirkt auf dem Boden Zinnitz ein deutliches Ertragsplus von 18,7 dt/ha (30 BKS15) und 13,1 dt/ha (90 BKS15) gegenüber der Variante MIN.

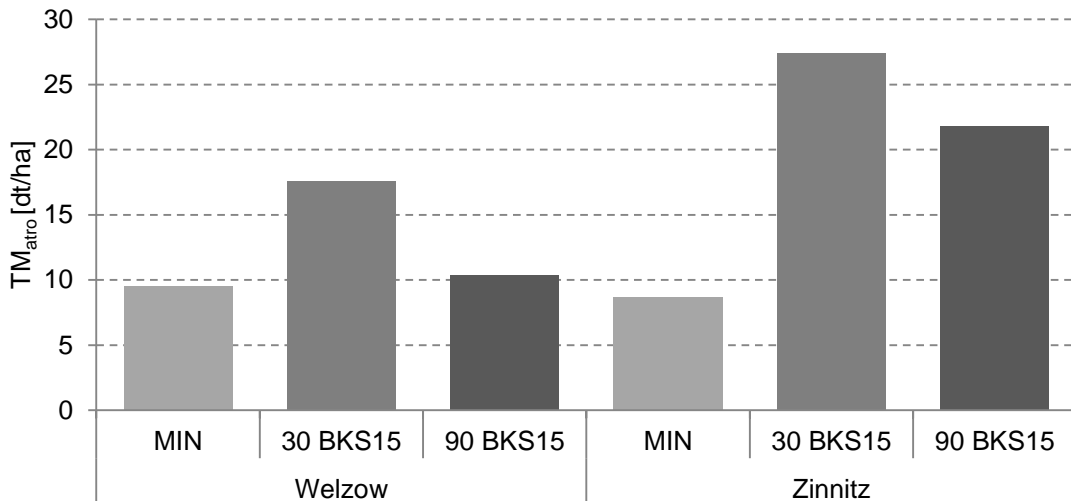


Abbildung 57: Ertrag des Senfes (Ganzpflanze) im Dezember 2012 auf den Böden Welzow und Zinnitz (n = 1)

Im März 2013 wurde Sommergerste auf den Bodensäulen angebaut, deren Ernte im Juni 2013 (Abbildung 58) erfolgt. Wie auch bei dem Senf erreicht die Variante 30 BKS15 auf beiden Böden den Höchstertrag. Der geringste Ertrag liegt auf dem Boden Welzow mit 8,5 dt/ha in der Variante 90 BKS15 vor. Die Ertragsdifferenz der Variante MIN zu der Variante 30 BKS15 beträgt nur 1,1 dt/ha. Die beiden Varianten liegen damit auf vergleichbarem Niveau. Auf dem Boden Zinnitz weisen die Varianten MIN und 90 BKS15 vergleichbar geringe Erträge mit einer Ertragsdifferenz von 6,4 bzw. 4,5 dt/ha zu der Variante 30 BKS15 auf.

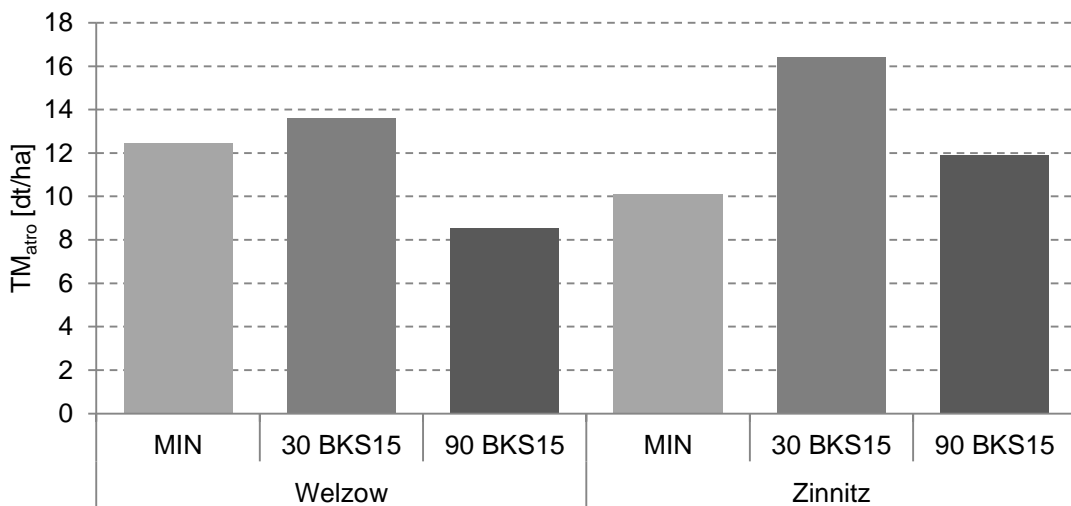


Abbildung 58: Ertrag der Sommergerste (Ganzpflanze) im Juni 2013 auf den Böden Welzow und Zinnitz (n = 1)

In dem verbliebenen Versuchszeitraum 07/2013 - 01/2014 erfolgte erneut der Anbau von Knaulgras. Es wurden zwei Ernten im Oktober 2013 und im Januar 2014 durchgeführt, deren Ertragssumme Abbildung 59 zeigt. Die Ertragssumme auf dem Boden Welzow ist mit weniger als 2 dt/ha in allen Varianten sehr gering. Der Hauptertrag stammt aus der Ernte im Oktober 2013: 1,3 dt/ha (MIN), 1,2 dt/ha (30 BKS15) und 0,4 dt/ha (90 BKS15). Aus dem Januar 2014 stammt ein Ertrag von 0,5 dt/ha (MIN), 0,6 dt/ha (30 BKS15) und 0,3 dt/ha (90 BKS15). Die Ertragssumme der Varianten MIN und 30 BKS15 ist mit 1,8 dt/ha gleich. Die Variante 90 BKS15 weist eine Ertragssumme von 0,7 dt/ha auf.

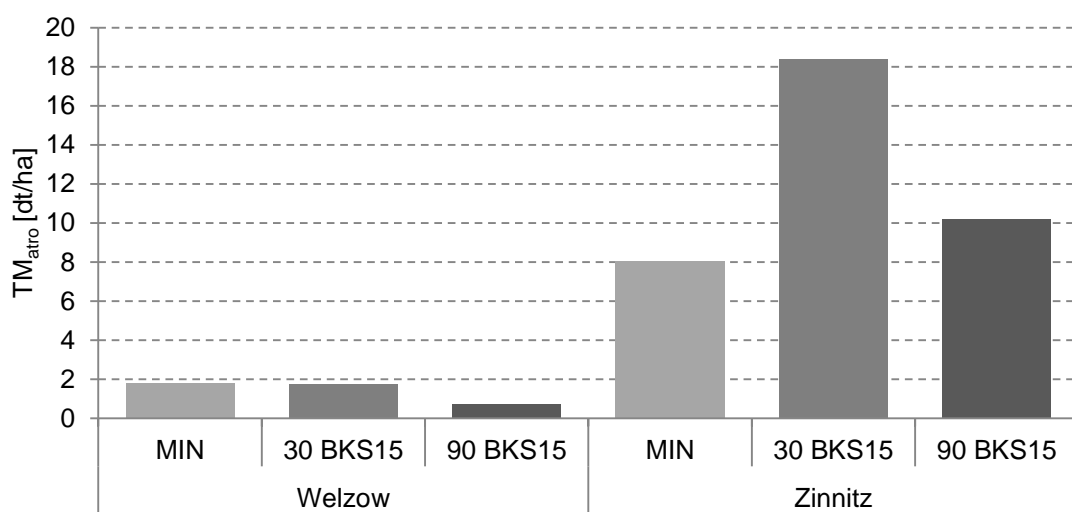


Abbildung 59: Ertragssumme von zwei Knaulgrasernten im Oktober 2013 und Januar 2014 auf den Böden Welzow und Zinnitz (n = 1)

Der Boden Zinnitz weist ein höheres Ertragsniveau auf als der Boden Welzow. Auch hier stammt der größte Ertragsanteil aus der Ernte im Oktober 2013: 5,0 dt/ha (MIN), 12,8 dt/ha (30 BKS15) und 6,6 dt/ha (90 BKS15). Auf die Ernte im Januar entfallen nur: 3,1 dt/ha (MIN), 5,6 dt/ha (30 BKS15) und 3,6 dt/ha (90 BKS15). Der Höchstertrag in Summe liegt mit 18,4 dt/ha in der Variante 30 BKS15 vor. Deutliche geringere Erträge weisen die Varianten MIN (8,1 dt/ha) und 90 BKS15 (10,2 dt/ha) auf.

Mit dem Ziel einen Gesamteindruck über die Ertragsfähigkeit beider Böden und den eingesetzten Düngern zu erlangen, zeigt Abbildung 60 die Summe der erfassten Erträge aller Kulturpflanzen in dem Versuchszeitraum auf beiden Böden. Für den Boden Welzow bestätigt sich eine Zunahme der Ertragsfähigkeit um insgesamt 26,1 dt/ha mit der Applikation von 30 t/ha BKS15 gegenüber der mineralischen Düngung. Die Steigerung der BKS-Gabe von 30 auf 90 t/ha bringt einen weiteren Ertragszuwachs von 7,0 dt/ha. Auf dem Boden Zinnitz zeigt sich mit einer Ertragssteigerung von 79,8 dt/ha



eindeutig ein positiver Ertragseffekt bei dem Einsatz von 30 t/ha BKS15 gegenüber der mineralischen Düngung. Auch die erhöhte BKS-Gabe von 90 t/ha BKS15 erzielt einen Ertragszuwachs im Vergleich zu der Variante MIN. Dieser fällt mit 10,7 dt/ha deutlich geringer aus. Eine Erhöhung der BKS-Gabe von 30 auf 90 t/ha bringt auf dem Boden Zinnitz keine weiteren Ertragssteigerungen.

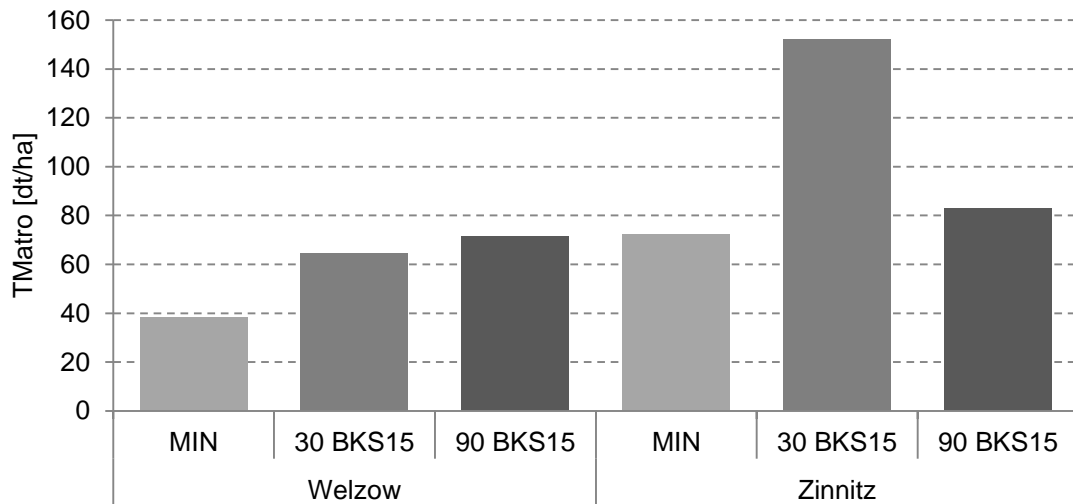


Abbildung 60: Ertragssumme aller Kulturen über den Versuchszeitraum 2011 - 2014 auf den Böden Welzow und Zinnitz (n = 1)

### 4.3.2.3 Gehalte und Entzüge

Die Einordnung der Nährstoffgehalte ist aufgrund des etiolierten Wuchses einhergehend mit der diffizilen Einordnung in den BBCH-Code nur bedingt aussagekräftig. Die Ernte des Knautgrases erfolgte noch vor dem Rispenstadium, so dass die Empfehlungen von Von Wulffen et al. (2008) für Wiesengräser zum Rispenstadium (BBCH 51) aussagekräftiger sind: N 2,0 - 3,5 % TS, P 0,28 - 0,35 % TS und K 2,2 - 3,2 % TS. Optimale Nährstoffgehalte nach Bergmann (1983) für das Knautgras zu der Entwicklungsstufe Blühbeginn (BBCH 61) sind: N 2,8 - 4,0 % TS, P 0,3 - 0,5 % TS und K 2,5 - 3,5 % TS. Tabelle 70 zeigt den Median sowie die minimalen und maximalen Werte der Nährstoffgehalte im Knautgrasaufwuchs der vier Ernten für beide Böden in dem Zeitraum 2011 - 2012. Die N-, P- und K-Gehalte für die einzelnen Ernten sind im Anhang 2.2 aufgeführt.

Tabelle 70: Nährstoffgehalte im Pflanzenaufwuchs der vier Knautgrasernten in dem Zeitraum 2011 - 2012 (Median, Min, Max, n = 1)

Parameter	MIN			30 BKS15			90 BKS15			
	Min	Med.	Max	Min	Med.	Max	Min	Med.	Max	
Welzow										
N	[g/kg TS]	18,99	21,70	24,83	17,88	22,78	25,76	19,97	25,14	28,64
P	[g/kg TS]	2,85	4,63	6,56	3,55	5,22	7,33	3,76	4,44	5,37
K	[g/kg TS]	31,39	43,72	51,06	28,22	45,71	50,91	35,25	45,72	52,86
Zinnitz										
N	[g/kg TS]	22,47	32,15	42,08	21,89	28,03	33,62	33,20	37,53	41,49
P	[g/kg TS]	4,26	4,83	6,00	3,32	4,52	4,98	3,67	4,81	6,03
K	[g/kg TS]	45,57	52,79	69,21	34,71	42,96	57,15	47,72	58,30	70,15

Die N-Gehalte (Median) des Pflanzenaufwuchses aller Varianten auf dem Boden Welzow zeigen nach Von Wulffen et al. (2008) eine optimale Versorgung mit N an. Nach Bergmann (1983) liegt in allen Varianten eine Unterversorgung vor. Die P-Gehalte (Median) des Pflanzenaufwuchses aller Varianten auf dem Boden Welzow zeigen nach Von Wulffen et al. (2008) eine Überversorgung mit P an. Nach Bergmann (1983) sind die Varianten MIN und 90 BKS15 optimal mit P versorgt. Lediglich die Variante 30 BKS15 gilt als leicht überversorgt. Mit K (Median) sind alle Varianten nach Von Wulffen et al. (2008) und Bergmann (1983) als deutlich überversorgt einzustufen. Die Variante MIN weist die geringsten N- und K-Gehalte (Median) im Versuchszeitraum auf. Die geringsten P-Gehalte (Median) des Versuchszeitraumes liegen in der Variante 90 BKS15 vor. Die höchsten N- und K-Gehalte (Median) sind in der Variante 90 BKS15

feststellbar, wobei der K-Gehalt der Variante 30 BKS15 ein vergleichbares Niveau besitzt. Der höchste P-Gehalt (Median) wird in der Variante 30 BKS15 ermittelt. Die N-Gehalte (Median) des Bodens Zinnitz sind nach Von Wulffen et al. (2008) optimal versorgt. Eine Ausnahme bildet die Variante 90 BKS15, die leicht überversorgt ist. Bei der Einordnung nach Bergmann (1983) gelten alle Varianten als optimal versorgt. Die P-Versorgung (Median) ist allen Varianten nach Von Wulffen et al. (2008) als überversorgt und nach Bergmann (1983) als optimal versorgt einzuschätzen. Nach Von Wulffen et al. (2008) und Bergmann (1983) liegt in allen Varianten eine Überversorgung mit K vor. Die geringsten Nährstoffgehalte (Median N, P und K) liegt in der Variante 30 BKS15 vor. Die höchsten N- und K-Gehalte (Median) sind in der Variante 90 BKS15 feststellbar. Der P-Gehalt (Median) weist in den Varianten 90 BKS15 und MIN ein vergleichbar hohes Niveau auf.

Tabelle 71 zeigt die Nährstoffgehalte der im weiteren Versuchsverlauf angebaute Kulturpflanzen. Der Senfaufwuchs auf dem Boden Welzow weist den geringsten N- und P-Gehalt in der Variante MIN und den geringsten K-Gehalt in der Variante 30 BKS15 auf. Den höchsten N-Gehalt weist auf dem Boden Welzow die Variante 30 BKS15 und auf dem Boden Zinnitz die Variante MIN auf. Die höchsten P- und K-Gehalte sind auf beiden Böden in der Variante 90 BKS15 feststellbar. Auf dem Boden Zinnitz liegen die geringsten Gehalte an N, P und K in der Variante 30 BKS15 vor.

Die Sommergerste auf dem Boden Welzow weist in der Variante 30 BKS15 den höchsten N- und P-Gehalt auf. Der höchste K-Gehalt liegt in der Variante 90 BKS15 vor. Den geringsten N-Gehalt weist Variante 90 BKS15 auf, während der geringste P- und K-Gehalt in der Variante MIN vorliegt. Die N- und P-Gehalte des Sommergerstenaufwuchses auf dem Boden Zinnitz sind auf gleichem Niveau. Lediglich bei den K-Gehalten gibt es tendenzielle Unterschiede. Die Variante 30 BKS15 weist den geringsten K-Gehalt und die Variante 90 BKS15 höchsten K-Gehalt auf. Optimale Nährstoffgehalte für Sommergerste im BBCH-Stadium 28 sind nach Von Wulffen et al. (2008) für N 3,5 - 6,4 % TS, P 0,36 - 0,76 % TS und K 3,6 - 5,5 % TS. Bergmann (1983) gibt für das BBCH-Stadium 30/31 eine Empfehlung von N 2,8 - 5,0 % TS, P 0,35 - 0,6 % TS und K 3,0 - 5,5 % TS. Die N- und P-Versorgung aller Varianten auf beiden Böden sind sowohl nach Von Wulffen et al. (2008) als auch nach Bergmann (1983) optimal. Für K liegt in allen Varianten und auf beiden Böden eine Überversorgung vor (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008).

Das Knautgras der Anbauphase 2013 - 2014 weist auf beiden Böden die geringsten N-, P- und K-Gehalte in der Variante 30 BKS15 auf. Die höchsten N- und K-Gehalte auf dem Boden Welzow sind in der Variante 90 BKS15 und der höchste P-Gehalt in der Variante MIN feststellbar. Auf dem Boden Zinnitz weist die Variante MIN die höchsten

N-, P- und K-Gehalte auf. Die Einordnung der N-Gehalte in dem Knautgrasaufwuchs auf dem Boden Welzow ergibt nach Von Wulffen et al. (2008) eine optimale Versorgung der Varianten MIN und 30 BKS15 sowie eine Überversorgung der Variante 90 BKS15. Nach Bergmann (1983) sind alle Varianten mit N optimal versorgt. Mit P sind die Varianten MIN und 90 BKS15 auf dem Boden Welzow überversorgt und die Variante 30 BKS15 im optimalen Bereich angesiedelt (Von Wulffen et al., 2008), wohingegen nach Bergmann (1983) in allen Varianten eine optimale Versorgung vorliegt. Die K-Versorgung der Variante 30 BKS15 auf dem Boden Welzow ist nach Von Wulffen et al. (2008) noch optimal versorgt, nach Bergmann (1983) liegt bereits eine Unterversorgung vor. Die K-Versorgung der Varianten MIN und 90 BKS15 auf dem Boden Welzow ist als überversorgt einzuschätzen (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Auf dem Boden Zinnitz sind die N-Gehalte aller Varianten nach Von Wulffen et al. (2008) und Bergmann (1983) als überversorgt einzustufen. Die P- und K-Gehalte der Varianten MIN und 90 BKS15 sind ebenfalls nach Von Wulffen et al. (2008) und Bergmann (1983) als überversorgt einzuschätzen. Der P-Gehalt der Variante 30 BKS15 ist nach Von Wulffen et al. (2008) als überversorgt und nach Bergmann (1983) als optimal versorgt anzusehen. Die K-Versorgung der Variante 30 BKS15 ist nach Von Wulffen et al. (2008) und Bergmann (1983) im optimalen Bereich.

Tabelle 71: Nährstoffgehalte im Senf-, Sommergerste- und Knautgrasaufwuchs im Zeitraum 2012 - 2013 (n = 1)

Parameter	Welzow			Zinnitz		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
Senf Dezember 2012						
N [g/kg TS]	40,66	57,31	45,61	73,34	54,57	65,94
P [g/kg TS]	3,14	3,59	4,72	4,03	3,67	4,22
K [g/kg TS]	42,04	39,96	42,82	29,49	23,25	59,28
Sommergerste Juni 2013						
N [g/kg TS]	39,57	47,31	37,62	46,00	46,47	46,60
P [g/kg TS]	4,87	5,21	5,14	5,81	5,76	5,76
K [g/kg TS]	56,60	58,56	65,26	69,62	64,80	70,63
Knautgras Oktober 2013						
N [g/kg TS]	34,67	30,08	39,37	47,01	44,28	44,54
P [g/kg TS]	4,11	2,90	3,87	5,33	4,42	5,06
K [g/kg TS]	45,31	22,85	55,73	58,05	31,39	53,51

Tabelle 72 zeigt die Nährstoffentzüge mit dem Biomasseaufwuchs nach Kulturen sowie als Gesamtsumme über den Versuchszeitraum. Mit dem Knautgras (2011 - 2012) werden dem Boden Welzow in der Variante MIN die geringsten Mengen an N, P und K entzogen. In der Variante 90 BKS15 wird in etwa das Vierfache dessen entzogen. Insbesondere die K- und N-Entzüge liegen auf dem Boden Zinnitz auf einem deutlich höheren Niveau. Die geringsten Entzüge auf dem Boden Zinnitz (N in der Variante MIN sowie P und K in der Variante 90 BKS15) sind höher oder zumindest gleichwertig mit den höchsten Entzügen auf dem Boden Welzow. Die höchsten Entzüge mit dem Knautgrasaufwuchs auf dem Boden Zinnitz liegen in der Variante 30 BKS15 vor. Im Vergleich zu den höchsten Entzügen des Bodens Welzow (90 BKS15) betragen sie auf dem Boden Zinnitz das Doppelte.

Tabelle 72: Nährstoffentzüge mit dem Pflanzenaufwuchs nach Kulturen und in Summe über den gesamten Versuchszeitraum für die Böden Welzow und Zinnitz (n = 1)

Parameter	Welzow			Zinnitz			
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	
<b>Knautgras 2011 - 2012</b>							
N	[kg/ha TS]	30,39	64,86	128,88	143,06	272,58	156,95
P	[kg/ha TS]	5,52	14,40	22,70	23,85	39,75	19,13
K	[kg/ha TS]	54,34	115,32	223,20	249,27	406,38	235,92
<b>Senf Dezember 2012</b>							
N	[kg/ha TS]	38,80	100,89	47,12	63,92	149,75	143,67
P	[kg/ha TS]	3,00	6,32	4,88	3,51	10,07	9,20
K	[kg/ha TS]	40,12	70,34	44,23	25,70	63,80	129,17
<b>Sommergerste Juni 2013</b>							
N	[kg/ha TS]	49,24	64,42	32,10	46,41	76,37	55,56
P	[kg/ha TS]	6,07	7,09	4,39	5,87	9,47	6,87
K	[kg/ha TS]	70,45	79,74	55,68	70,24	106,48	84,22
<b>Knautgras Oktober 2013 - 2014</b>							
N	[kg/ha TS]	6,24	5,27	2,79	37,94	81,35	45,47
P	[kg/ha TS]	0,74	0,51	0,27	4,31	8,12	5,17
K	[kg/ha TS]	8,15	4,00	3,96	46,86	57,67	54,63
<b>Summe 2011 - 2014</b>							
<b>N</b>	<b>[kg/ha TS]</b>	<b>124,67</b>	<b>235,44</b>	<b>210,89</b>	<b>291,33</b>	<b>580,05</b>	<b>401,65</b>
<b>P</b>	<b>[kg/ha TS]</b>	<b>15,33</b>	<b>28,32</b>	<b>32,24</b>	<b>37,54</b>	<b>67,41</b>	<b>40,37</b>
<b>K</b>	<b>[kg/ha TS]</b>	<b>173,06</b>	<b>269,4</b>	<b>327,07</b>	<b>392,07</b>	<b>634,33</b>	<b>503,94</b>

Mit dem Senf wird auf dem Boden Welzow die geringste Nährstoffmenge an N, P und K in der Variante MIN und die höchste Nährstoffmenge an N, P und K in der Variante 30 BKS15 entzogen. Auf dem Boden Zinnitz liegen die geringsten Nährstoffentzüge (N, P und K) in der Variante MIN und die höchsten N- und P-Entzüge in der Variante 30 BKS15 sowie für K in der Variante 90 BKS15 vor. Das Niveau des Nährstoffentzuges ist auf dem Boden Zinnitz etwas höher als auf dem Boden Welzow. Der Unterschied ist allerdings nicht mehr so deutlich wie zu dem Entzug mit dem Knautgras.

Zur Sommergerste hat sich das Entzugsniveau der Böden noch stärker angeglichen. Die höchsten Entzüge an N, P und K liegen auf beiden Böden in der Variante 30 BKS15 vor. Die geringsten Entzüge an N, P und K sind auf dem Boden Welzow in der Variante 90 BKS15 und auf dem Boden Zinnitz in der Variante MIN feststellbar.

Die N-, P- und K-Entzüge mit dem Knautgras (2013 - 2014) auf dem Boden Welzow sind sehr gering. Sie liegen alle deutlich unter 10 kg/ha. Die höchsten Entzüge an N, P und K liegen in der Variante MIN und die geringsten Entzüge an N, P und K in der Variante 90 BKS15 vor. Auch die N-, P- und K-Entzüge auf dem Boden Zinnitz sind im Vergleich zu den vorherigen Entzügen geringer. Sie liegen auf einem deutlich höheren Niveau als die Entzüge des Bodens Zinnitz. Die geringsten Entzüge an N, P und K liegen in der Variante MIN und die höchsten Entzüge an N, P und K in der Variante 30 BKS15 vor.

Betrachtet man die Entzüge in der Summe zeigt sich auf beiden Böden ein deutlich höherer Nährstoffentzug in den BKS-Varianten als in der mineralisch gedüngten Variante. Auf dem Boden Welzow bewirkt eine Erhöhung der BKS-Gabe von 30 t/ha auf 90 t/ha keine eindeutige Steigerung der Entzüge. Die Variante 30 BKS15 erzielt einen etwas höheren N-Entzug als die Variante 90 BKS15. Der P- und K-Entzug ist auf dem Boden Welzow in der Variante 90 BKS15 höher als in der Variante 30 BKS15. Auf dem Boden Zinnitz weist die Variante 30 BKS15 insgesamt die höchsten Entzüge an N, P und K auf. Die Erhöhung der BKS-Gabe von 30 t/ha auf 90 t/ha bringt auf diesem Boden keine weitere Steigerung der Entzüge.

### 4.3.3 Sickerwasser

#### 4.3.3.1 Sickerwasseraufkommen in den Böden Welzow und Zinnitz

Die monatliche Sickerwasserentnahme der Bodensäulen **Welzow** ist in der Abbildung 61 für die Tiefenstufe 1 (oben) und 2 (unten) dargestellt. Abbildung 62 zeigt den monatlichen Sickerwasseraustrag Werte für die Tiefenstufe 3. Insbesondere in der ersten Periode, im Juli und August 2011 sowie von April bis Mai 2012, sind erhöhte Sickerwasserraten, insbesondere in den BKS-Varianten, in allen drei Tiefenstufen erkennbar. In diesen Zeiträumen kam es zu Fehlfunktionen der automatischen Bewässerungsanlage. Nach einem weiteren Testlauf im September und Oktober 2012 erfolgt die Bewässerung des Versuches manuell. Die summierten Sickerwassermengen des gesamten Versuchszeitraumes für die einzelnen Tiefenstufen der Varianten betragen:

MIN: 26,99 mm (1), 164,25 mm (2), 1597,76 mm (3)

30 BKS15: 26,43 mm (1), 264,79 mm (2), 1752,47 mm (3)

90 BKS15: 28,21 mm (1), 310,75 mm (2), 1433,35 mm (3)

In der Tiefenstufe 1 weist die Variante 30 BKS15 in den Perioden II und III und die Variante 90 BKS15 in den Perioden IV und V tendenziell erhöhte Sickerwasserraten auf (Abbildung 61 oben). Über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet, weisen alle Varianten in dieser Tiefenstufe ein vergleichbares Niveau auf. In der Tiefenstufe 2 (Abbildung 61 unten) ist kein eindeutiger Trend in der Periode I abzulesen. In den Perioden II - IV liegt der Sickerwasseraustrag aller Varianten auf einem vergleichbaren Niveau. In der Periode V sind die Sickerwasserraten der Variante 90 BKS15 kontinuierlich geringer als die der Varianten MIN und 30 BKS15. Die summierten Sickerwassermengen über den gesamten Versuchszeitraum (s. o.) zeigen jedoch, dass in der Tiefenstufe 2 die Variante 90 BKS15 im Vergleich zu der Variante MIN einen annähernd doppelt so hohen Sickerwasseraustrag aufweist. In der Tiefenstufe 3 (Abbildung 62) weist die Variante 30 BKS15 in den Monaten August 2011, April und Mai 2012 erhöhte Sickerwasserraten auf. Von November 2011 bis März 2012 sind insbesondere in der Variante MIN erhöhte Sickerwasserraten festzustellen. In den Perioden II - V liegen die Sickerwasserausträge der Varianten auf einem vergleichbaren Niveau. Die summierten Sickerwassermengen über den gesamten Versuchszeitraum (s. o.) zeigen in der Variante 90 BKS15 die geringsten und in der Variante 30 BKS15 die höchsten Sickerwassermengen. Über den gesamten Versuchszeitraum sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten festzustellen (Anhang 2.3). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 2.4 zu entnehmen.

Die monatliche Sickerwasserentnahme der Bodensäulen **Zinnitz** ist in der Abbildung 63 für die Tiefenstufe 1 (oben) und 2 (unten) dargestellt. Abbildung 64 zeigt den monatlichen Sickerwasseraustrag für die Tiefenstufe 3. In der ersten Periode, insbesondere von Oktober bis Dezember 2011 und März bis Mai 2012, treten in den Varianten MIN und 90 BKS15 erhöhte Sickerwasserraten aufgrund von Fehlfunktionen der automatischen Bewässerungsanlage auf (s. Kapitel 3.3.4, Abbildung 11). Die summierten Sickerwassermengen über den gesamten Versuchszeitraum für die einzelnen Tiefenstufen der Varianten betragen:

MIN: 51,07 mm (1), 331,63 mm (2), 883,41 mm (3)

30 BKS15: 48,12 mm (1), 48,62 mm (2), 392,26 mm (3)

90 BKS15: 28,18 mm (1), 333,52 mm (2), 1034,28 mm (3)

In der Tiefenstufe 1 weist die Variante 30 BKS15 in der Periode I im Juli 2011 eine deutlich erhöhte Sickerwasserrate auf (Abbildung 63 oben). Im Oktober und Dezember 2011 treten in der Variante MIN deutlich erhöhte Sickerwasserraten auf. In den Perioden II - V sind die Sickerwasserraten relativ homogen. Die Variante 90 BKS15 weist kontinuierlich tendenziell geringere Sickerwasserraten auf als die Varianten MIN und 30 BKS15, was sich auch in den summierten Sickerwassermengen widerspiegelt (s. o.). In der Tiefenstufe 2 (Abbildung 63 unten) werden in der Periode I ebenfalls die Schwankungen bedingt durch die Fehlfunktionen der automatischen Bewässerung deutlich. Insbesondere in den Varianten MIN und 90 BKS15 treten erhöhte Sickerwasserraten in den Zeiträumen Oktober bis Dezember 2011 und März 2012 bis Mai 2012 auf. In den Perioden II - V fallen nur geringe Sickerwassermengen an. Die Variante MIN weist tendenziell höhere Sickerwasserraten auf. Der summierte Sickerwasseraustrag über den gesamten Versuchszeitraum beträgt in der Variante 30 BKS15 nur 48,62 mm. Die Varianten MIN und 90 BKS15 weisen einen Sickerwasseraustrag von jeweils mehr als 330 mm auf. Die Sickerwasserraten in der Tiefenstufe 3 sind in allen Varianten im Vergleich zu den anderen Tiefenstufen deutlich höher (Abbildung 64). Auch hier fallen die Schwankungen in den Varianten MIN und 90 BKS15 in der Periode I auf. Die Sickerwasserraten der Varianten MIN und 90 BKS15 liegen in den Perioden II - V tendenziell über denen der Variante 30 BKS15. Insgesamt weist die Variante 30 BKS15 mit knapp 400 mm eine deutlich geringere Sickerwassermenge auf als die Varianten MIN und 90 BKS15. Über den gesamten Versuchszeitraum weist die Variante MIN in allen drei Tiefenstufen signifikant höhere Sickerwassermengen auf als die Variante 30 BKS15. In der Tiefenstufe 3 ist zudem der Sickerwasseraustrag der Variante 90 BKS15 signifikant höher als der Sickerwasseraustrag der Variante 30 BKS15 (Anhang 2.17). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 2.18 zu entnehmen.



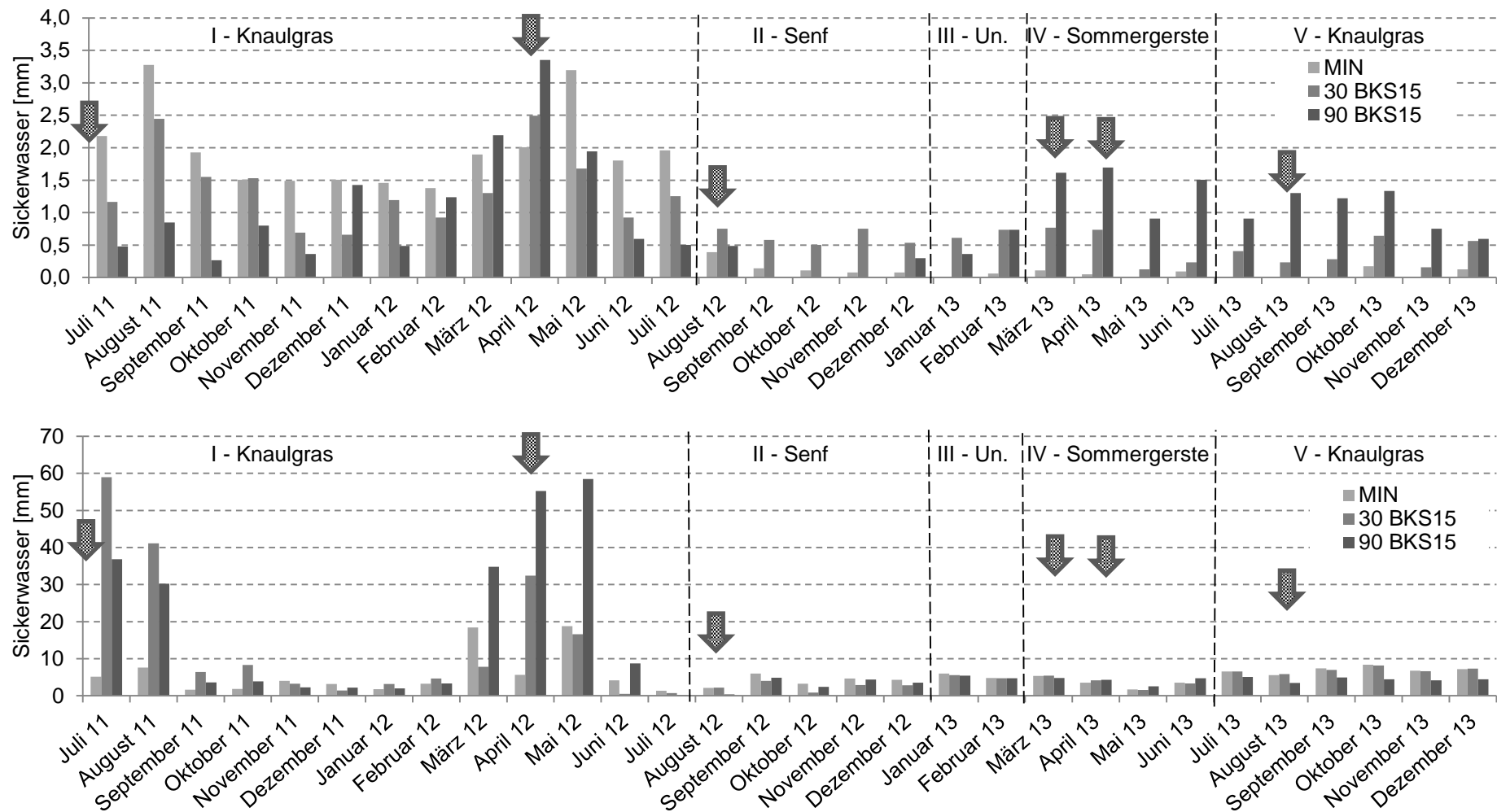


Abbildung 61: Sickerwasseraustrag der Bodensäulen Welzow der Tiefenstufen 1 (15 cm, oben) und 2 (45 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

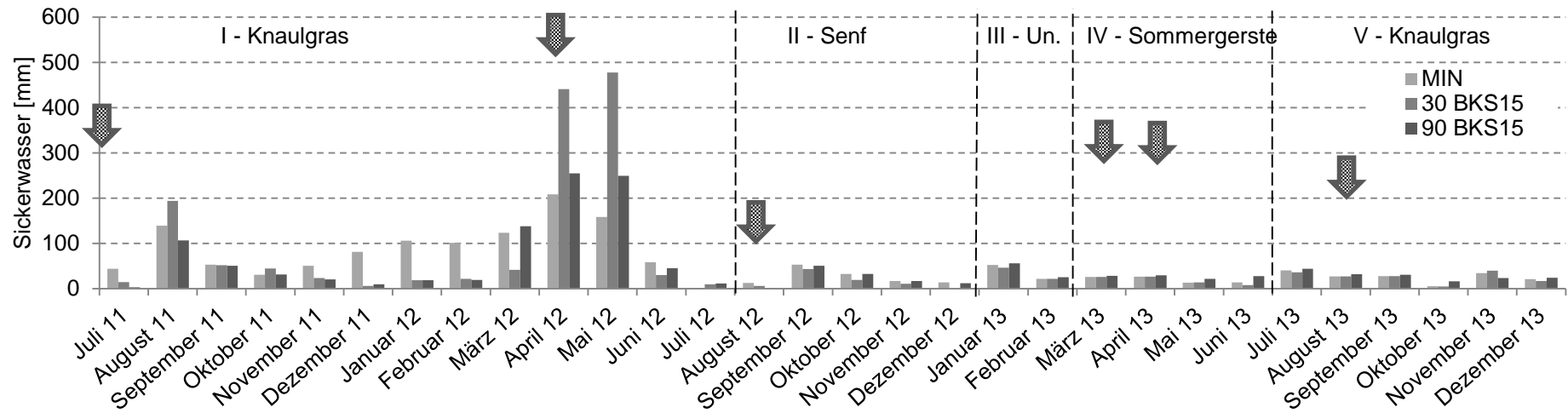


Abbildung 62: Sickerwasseraustrag der Bodensäulen Welzow der Tiefenstufe 3 (100 cm) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

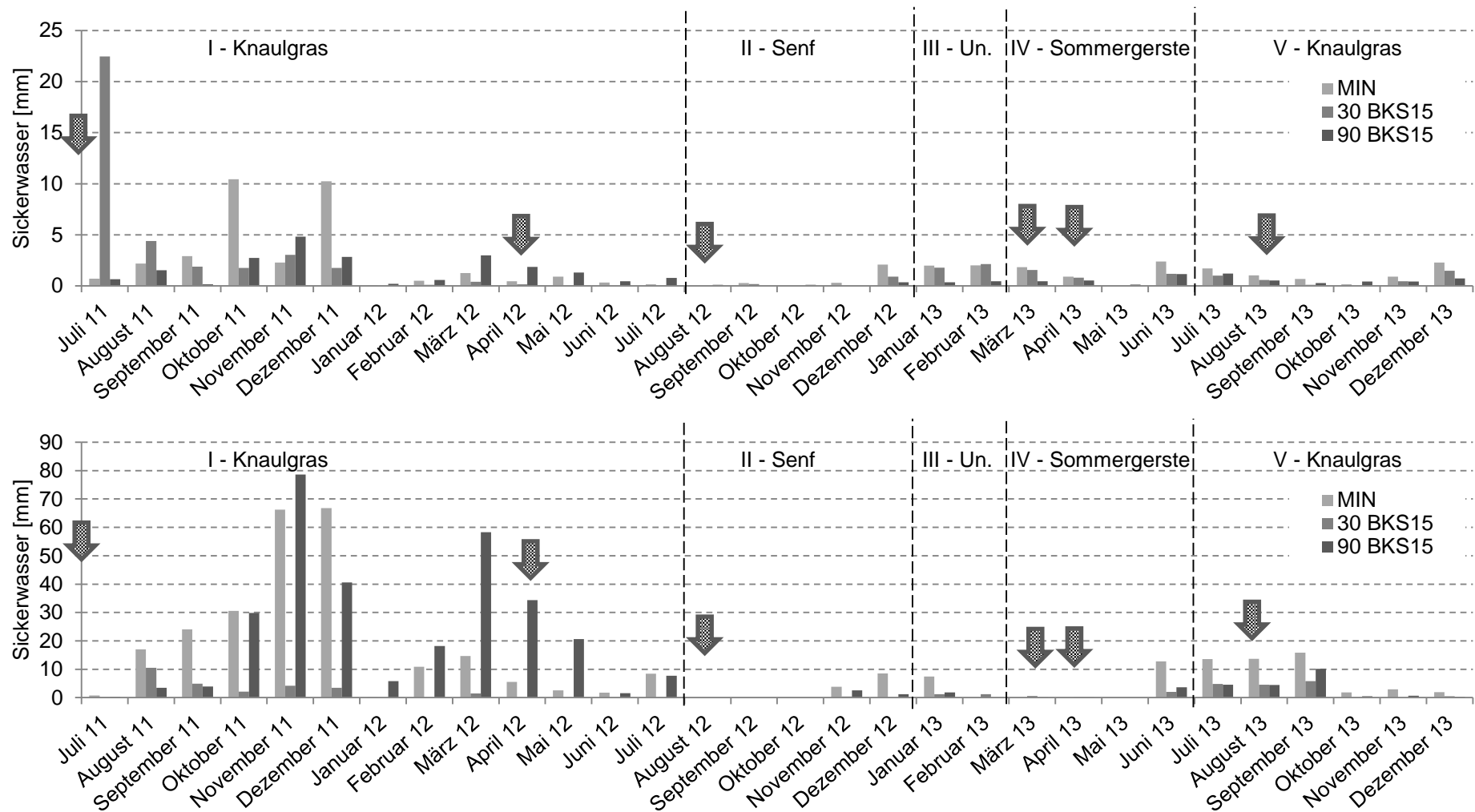


Abbildung 63: Sickerwasseraustrag der Bodensäulen Zinnitz der Tiefenstufen 1 (15 cm, oben) und 2 (45 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

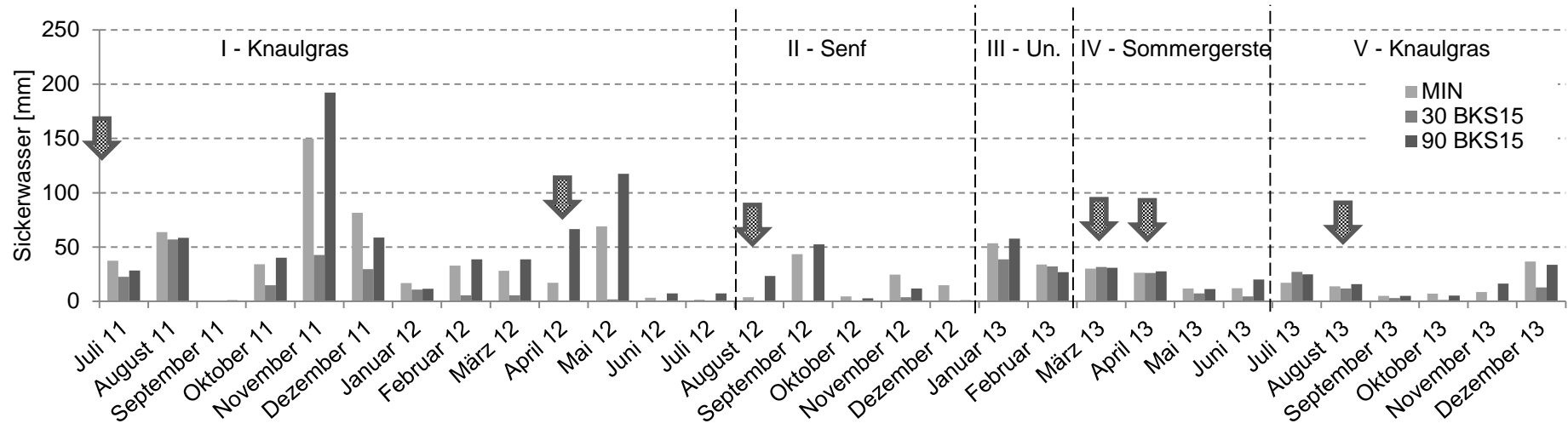


Abbildung 64: Sickerwasseraustrag der Bodensäulen Zinnitz der Tiefenstufe 3 (100 cm) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

#### 4.3.3.2 Sickerwasserqualität des Bodens Welzow

Das Sickerwasser der Bodensäulen wurde in den Tiefenstufen 1 (15 cm), 2 (45 cm) und 3 (100 cm) aufgefangen. Die Sickerwassermengen nahmen in der Regel von der ersten zur dritten Tiefenstufe zu. Im Versuchsverlauf traten immer wieder Phasen mit geringem Sickerwasserstrom auf, so dass nicht ausreichend Material für eine Analyse anfiel. Fehlende Analysewerte sind daher auf unzureichende Sickerwassermengen zurückzuführen. Die Angaben zur Bewässerung des Bodensäulenversuches sind in Kapitel 3.3.4, Abbildung 11 aufgeführt. Die erhobenen Daten werden entsprechend der Bedeckung mit der jeweiligen Kulturpflanze in fünf Perioden (I: 07/2011 - 07/2012 Knaulgras, II: 08/2012 - 12/2012 Senf, III: 01/2013 - 02/2013 Unbestellt, IV: 03/2013 - 06/2013 Sommergerste, V: 07/2013 - 12/2014 Knaulgras) für die statistische Auswertung zusammengefasst und sind in den Abbildungen kenntlich gemacht.

Tabelle 73: Mittlere pH-Werte für das Sickerwasser aus den einzelnen Tiefenstufen der Bodensäulen Welzow für die Perioden sowie den gesamten Versuchszeitraum

Tiefenstufe	Periode <sup>1)</sup>	MIN <sup>2)</sup>		30 BKS15		90 BKS15	
		pH <sup>3)</sup>	SD <sup>4)</sup>	pH <sup>3)</sup>	SD <sup>4)</sup>	pH <sup>3)</sup>	SD <sup>2) 4)</sup>
1	I	8,4 <sup>a</sup>	0,3	8,7 <sup>ab</sup>	0,5	8,9 <sup>b</sup>	0,3
	II	n. b.	n. b.	8,4	0,3	n. b.	n. b.
	III	n. b.	n. b.	8,4	0,1	8,8	n. b.
	IV	n. b.	n. b.	8,1	0,2	8,4	0,3
	V	n. b.	n. b.	8,2	0,3	8,5	0,4
	<b>Gesamt</b>		<b>8,4<sup>a</sup></b>	<b>0,3</b>	<b>8,5<sup>ab</sup></b>	<b>0,4</b>	<b>8,7<sup>b</sup></b>
2	I	8,1 <sup>a</sup>	0,3	8,0 <sup>ab</sup>	0,3	7,9 <sup>b</sup>	0,2
	II	7,9	0,2	8,1	0,2	8,1	0,2
	III	8,2	0,4	8,0	0,1	8,3	0,1
	IV	8,0	0,3	8,0	0,3	8,0	0,2
	V	8,1	0,2	8,0	0,1	8,2	0,3
	<b>Gesamt</b>		<b>8,0</b>	<b>0,2</b>	<b>8,0</b>	<b>0,2</b>	<b>8,0</b>
3	I	7,7	0,5	7,7	0,4	7,6	0,3
	II	7,9	0,3	8,1	0,5	7,5	0,3
	III	7,8	0,04	7,8	0,1	7,5	0,5
	IV	7,7	0,2	7,8	0,2	7,3	0,1
	V	8,0	0,2	8,0	0,2	7,6	0,1
	<b>Gesamt</b>		<b>7,8<sup>a</sup></b>	<b>0,4</b>	<b>7,8<sup>a</sup></b>	<b>0,4</b>	<b>7,5<sup>b</sup></b>

<sup>1)</sup> Perioden: I: 07/2011 - 07/2012 Knaulgras, II: 08/2012 - 12/2012 Senf, III: 01/2013 - 02/2013 Unbestellt, IV: 03/2013 - 06/2013 Sommergerste, V: 07/2013 - 12/2013 Knaulgras. <sup>2)</sup> n. b. = Nicht bestimmt, <sup>3)</sup> Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede an. <sup>4)</sup> SD = Standardabweichung

Tabelle 73 zeigt die Entwicklung der mittleren **pH-Werte** im Sickerwasser in dem Versuchszeitraum für die einzelnen Tiefenstufen der Bodensäulen Welzow. Die pH-Werte

aller Tiefenstufen sind im gesamten Versuchszeitraum als leicht basisch einzuschätzen. Auch nehmen die pH-Werte in allen Varianten vom Oberboden zum Unterboden hin ab. Den stärksten Abfall des pH-Wertes um 1,13 von der Tiefenstufe 1 zur Tiefenstufe 3 ist in der Variante 90 BKS15 zu verzeichnen. In der Tiefenstufe 1 weist die Variante 90 BKS15 den höchsten pH-Wert und in der Tiefenstufe 3 den geringsten pH-Wert auf. In der Tiefenstufe 2 liegen im Mittel alle Varianten auf einem vergleichbaren Niveau. In der Tiefenstufe 1 und 2 (Periode I) unterscheiden sich in der die pH-Werte der Varianten MIN und 90 BKS15 signifikant voneinander. Über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet liegt nur in der Tiefenstufe 1 ein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten MIN und 90 BKS15 vor. In den weiteren Perioden und der Tiefenstufe 3 liegen keine signifikanten Unterschiede vor bzw. ist eine statistische Auswertung aufgrund fehlender Daten nicht möglich. Bei der Betrachtung der pH-Werte über den gesamten Versuchszeitraum unterscheiden sich die Varianten MIN und 90 BKS15 sowie die Varianten 30 BKS15 und 90 BKS15 in der Tiefenstufe 3 signifikant voneinander.

Die Abbildung 65 und die Abbildung 66 zeigen die monatlichen Werte der **elektrischen Leitfähigkeit** (elektr. LF) im Versuchszeitraum für die Bodensäulen Welzow. In der Tiefenstufe 1 (Abbildung 65 oben) ist größtenteils nicht ausreichend Sickerwasser für eine Analyse verfügbar. In der Periode I sind die gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten der Varianten bis auf einzelne Peaks vergleichbar. In der Tiefenstufe 2 (Abbildung 65 unten) erfolgt eine durchgehende Analyse der Sickerwässer. In der ersten Periode zeigt die Variante 90 BKS15 im gesamten Zeitraum deutlich höhere elektrische Leitfähigkeiten als die Varianten MIN und 30 BKS15. Diese nehmen allerdings im Verlauf dieser Periode (I) von 996  $\mu\text{S}/\text{cm}$  auf 568  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ab. Die elektrische Leitfähigkeit der Varianten MIN und 30 BKS15 geht im gleichen Zeitraum um etwa 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  auf circa 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  zurück. In den Perioden II, III und V ist die jeweilige elektrische Leitfähigkeit der Varianten vergleichbar. In der Periode IV sind die Werte der elektrischen Leitfähigkeit der Variante 90 BKS15 durchgehend höher als die der Varianten MIN und 30 BKS15. In der Tiefenstufe 3 (Abbildung 66) sind die gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten in der Periode I deutlich höher als in den folgenden Perioden (II - V, Ausnahme: August 2012). Im Juli und August 2011 weist die Variante MIN erhöhte elektrische Leitfähigkeiten von über 1100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  auf. Von September 2011 bis Mai 2012 sind die elektrischen Leitfähigkeiten der Variante 90 BKS15 (beispielweise September 2011: 1003  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) erhöht. Die elektrischen Leitfähigkeiten beider Varianten nehmen im Verlauf der ersten Periode deutlich ab und betragen im Juli 2012 539 (MIN) bzw. 504 (90 BKS15)  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Die elektrische Leitfähigkeit der Variante 30 BKS15 liegt auf einem

geringeren Niveau und weist im Verlauf der ersten Periode einen Rückgang von 649  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (August 2011) auf 460  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Juli 2012) auf. Die elektrische Leitfähigkeit der Variante 90 BKS15 ist über den gesamten Versuchszeitraum in der Tiefenstufe 2 signifikant höher als die elektrische Leitfähigkeit der Varianten MIN und 30 BKS15. Auch in der Tiefenstufe 3 ist die elektrische Leitfähigkeit der Variante 90 BKS15 signifikant höher als die elektrische Leitfähigkeit der Variante 30 BKS15 (Anhang 2.5). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 2.6 zu entnehmen.

Die **NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen** konnten aufgrund von geringen Sickerwassermengen insbesondere in den Tiefenstufen 1 und 2 nicht durchgehend bestimmt werden. In der Tiefenstufe 1 (Abbildung 67 oben) sind in der Periode I nur geringe NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen feststellbar, die unterhalb des Grenzwertes von 50 mg/l entsprechend der Nitratrichtlinie der Europäischen Gemeinschaft (1991) und der deutschen Trinkwasserverordnung (TrinkwV, 2001) liegen. In den Perioden IV und V zeigen sich erhöhte NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen (>100 mg/l) kurz nach der Düngergabe in der Variante 90 BKS15. Die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen der Varianten MIN und 30 BKS15 konnten in diesen Perioden nicht bestimmt werden. In der Tiefenstufe 2 (Abbildung 67 unten) ist der Verlauf der NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen besser nachzuvollziehen. Die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen der ersten Periode liegen unterhalb des Grenzwertes von 50 mg/l (EG, 1991; TrinkwV, 2001). Lediglich die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen im Sickerwasser der Variante 90 BKS15 sind von Juli bis September 2011 leicht erhöht. In der Periode II überschreiten die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen im Sickerwasser der Variante 90 BKS15 mit 219,1 mg/l (September 2012) und 108,6 mg/l (Oktober 2012) den Grenzwert von 50 mg/l (EG, 1991; TrinkwV, 2001) deutlich. Die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen der Variante MIN nehmen innerhalb dieser Periode leicht bis auf 50 mg/l zu. Die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen der Variante 30 BKS15 sind nicht durchgehend messbar. Im November 2012 wird eine erhöhte NO<sub>3</sub>-N-Konzentration von 100,0 mg/l festgestellt. In Periode III und IV sind die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen im Sickerwasser aller Varianten mit < 35 mg/l gering. Auffällig ist eine deutliche Erhöhung der NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen in allen Varianten um bis zu 150 mg/l im Juni (Periode IV) und Juli 2013 (Periode V). Diese ist vermutlich auf die Ernte der Sommergerste und die anschließende Bodenbearbeitung zur Aussaat des Knautgrases zurückzuführen. Im weiteren Verlauf der Periode V liegen die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen im Sickerwasser unter 35 mg/l. Lediglich im Oktober 2013 ist ein Anstieg der NO<sub>3</sub>-N-Konzentration im Sickerwasser der Varianten 30 BKS15 und 90 BKS15 auf 73,1 mg/l bzw. 70,9 mg/l feststellbar. In Abbildung 68 sind die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen der Tiefenstufe 3 dargestellt. Der NO<sub>3</sub>-N-Grenzwert von

50 mg/l (EG, 1991; TrinkwV, 2001) wird in der Periode I nur durch leicht erhöhte NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen bis 60 mg/l im Sickerwasser der Variante MIN überschritten. Ab September 2011 sind die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen im Sickerwasser der Variante 90 BKS15 gegenüber den anderen Varianten leicht erhöht. In der Periode II liegen die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen im Sickerwasser aller Varianten zunächst auf einem moderaten Niveau von etwa 10 mg/l. Im November und Dezember 2012 steigen die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen der Varianten MIN auf 101,7 mg/l bzw. 138,4 mg/l und 90 BKS15 auf 92,4 mg/l bzw. 169,7 mg/l an. Auch zu Beginn der Periode III liegen die Werte auf diesem hohen Niveau. Die NO<sub>3</sub>-N-Konzentration der Variante 30 BKS15 ist erst im Januar 2013 wieder messbar und beträgt 91,0 mg/l. Im Februar 2013 liegen die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen wieder in der Spanne von 8,1 mg/l (MIN) bis 24,1 mg/l (30 BKS15). In der Periode IV weisen alle Varianten NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen < 20 mg/l auf. Die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen im Sickerwasser steigen in allen Varianten bis September 2013 (Periode V) um bis zu 110 mg/l an. Im September und Oktober 2013 weist die Variante MIN höhere NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen im Sickerwasser auf als die Varianten 30 BKS15 und 90 BKS15. Im November und Dezember 2013 sinken die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen auf ein Niveau von etwa 50 mg/l ab. Die Variante 90 BKS15 weist in der Tiefenstufe 2 über den gesamten Versuchszeitraum eine signifikant höhere NO<sub>3</sub>-N-Konzentration auf als die Variante MIN (Anhang 2.7). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 2.8 zu entnehmen.

Abbildung 69 zeigt die **NPOC(D)-Konzentration** im Sickerwasser der Tiefenstufen 2 (oben) und 3 (unten). Die aufgefangenen Sickerwassermengen der Tiefenstufe 1 genügen für diese Analyse nicht, so dass hier keine wertbaren Daten vorhanden sind. Auch in der Tiefenstufe 2 treten insbesondere in der Periode I noch größere Datenlücken auf (Abbildung 69 oben), die eine Auswertung erschweren. Vermutlich liegt zu Beginn der Periode I eine leicht erhöhte NPOC(D)-Konzentration im Sickerwasser der Variante 90 BKS15 vor. In den weiteren Perioden (II - V) liegen die NPOC(D)-Konzentrationen im Sickerwasser in etwa um 10 mg/l. Die NPOC(D)-Konzentrationen nehmen im Vergleich zur Variante MIN mit der Erhöhung der BKS-Gabe von 30 auf 90 t/ha tendenziell zu. Diese Beobachtungen werden durch die NPOC(D)-Konzentrationen des Sickerwassers aus der Tiefenstufe 3 (Abbildung 69 unten) bestätigt. Zu Beginn der ersten Periode (Juli und August 2011) kommt es zu erhöhten NPOC(D)-Konzentrationen im Sickerwasser in allen drei Varianten. Im weiteren Versuchsverlauf pegeln sich die NPOC(D)-Konzentrationen unterhalb von 10 mg/l ein. Die NPOC(D)-Konzentrationen nehmen im Vergleich zur Variante MIN mit der Erhöhung der BKS-Gabe von 30 auf 90 t/ha tendenziell zu. Über den gesamten Versuchszeitraum weist



die Variante 90 BKS15 in den Tiefenstufen 2 und 3 signifikant höhere NPOC(D)-Konzentrationen auf als die Varianten MIN und 30 BKS15 (Anhang 2.9). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 2.10 zu entnehmen.

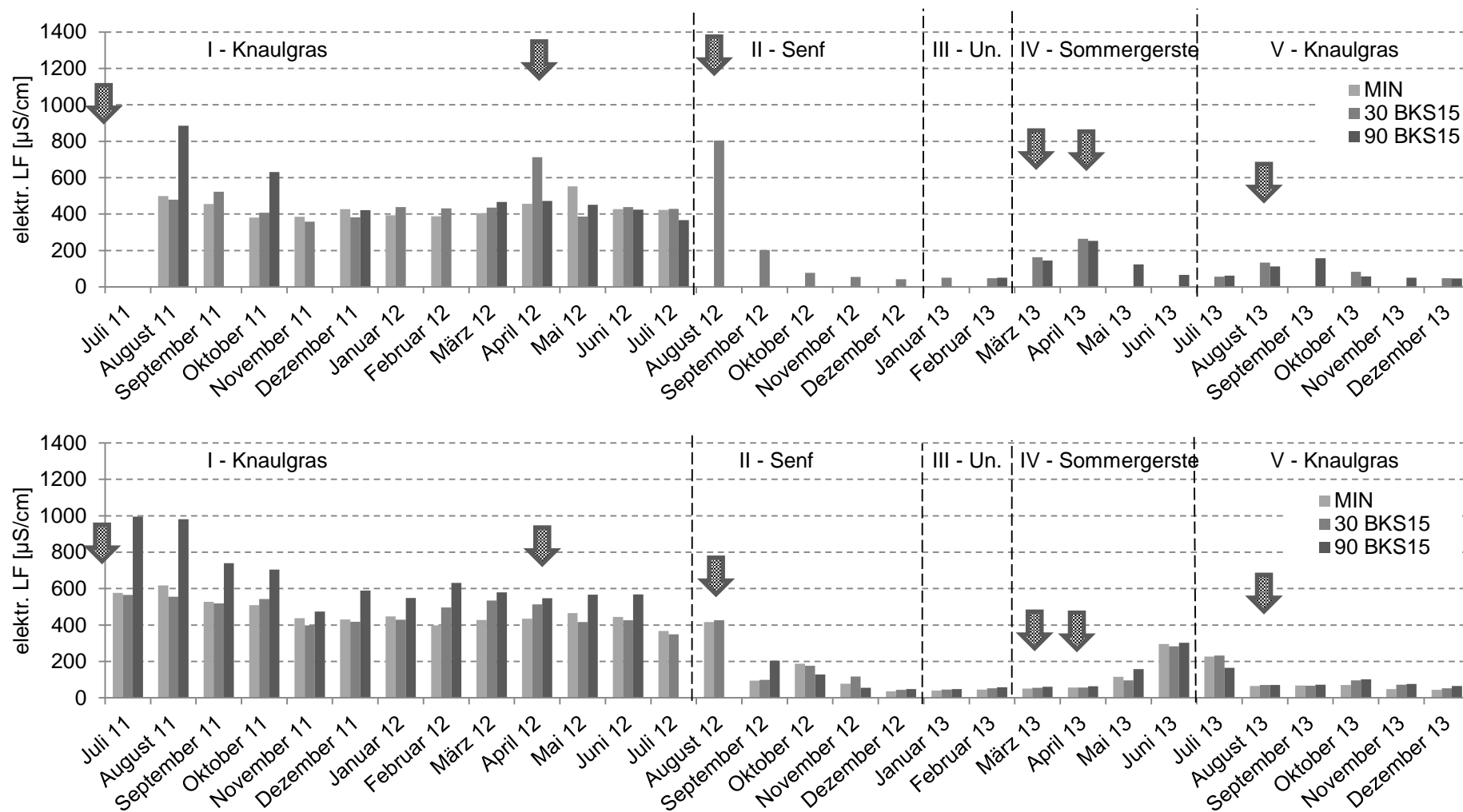


Abbildung 65: Elektrische Leitfähigkeit des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in den Tiefenstufen 1 (15 cm, oben) und 2 (45 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

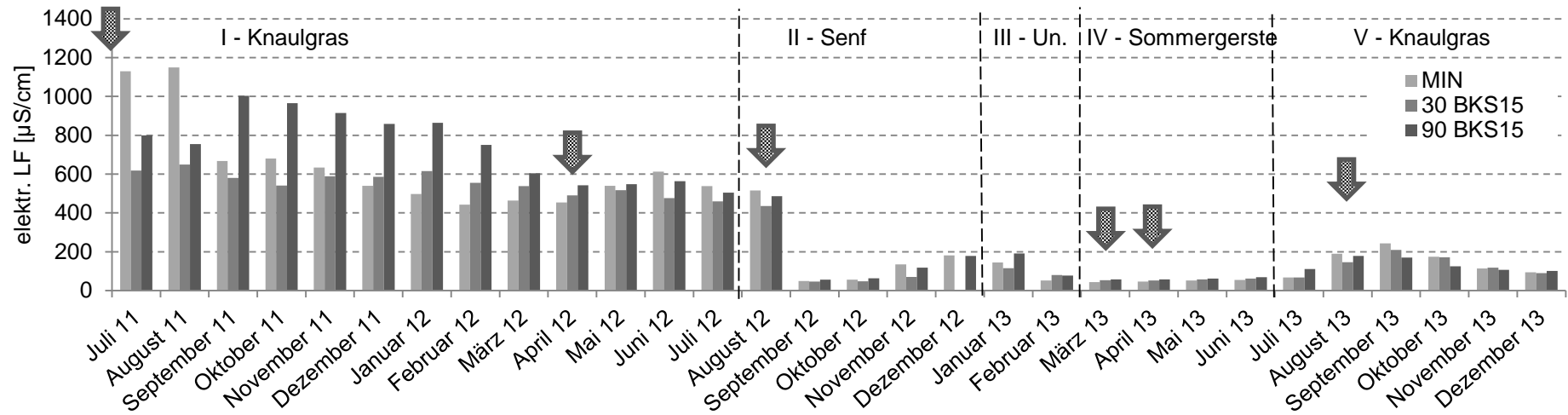


Abbildung 66: Elektrische Leitfähigkeit des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in der Tiefenstufe 3 (100 cm) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

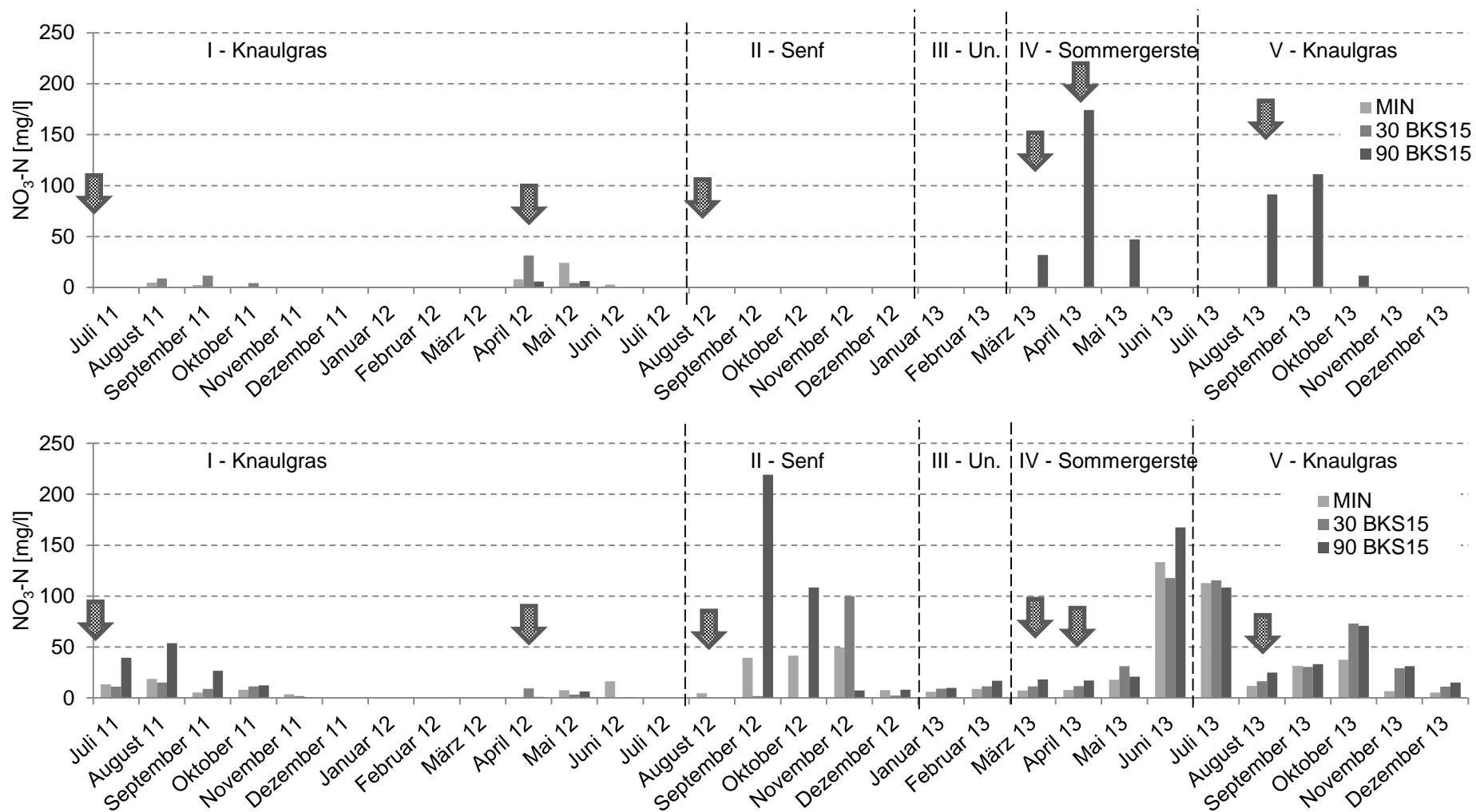


Abbildung 67: NO<sub>3</sub>-N-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in den Tiefenstufen 1 (15 cm, oben) und 2 (45 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

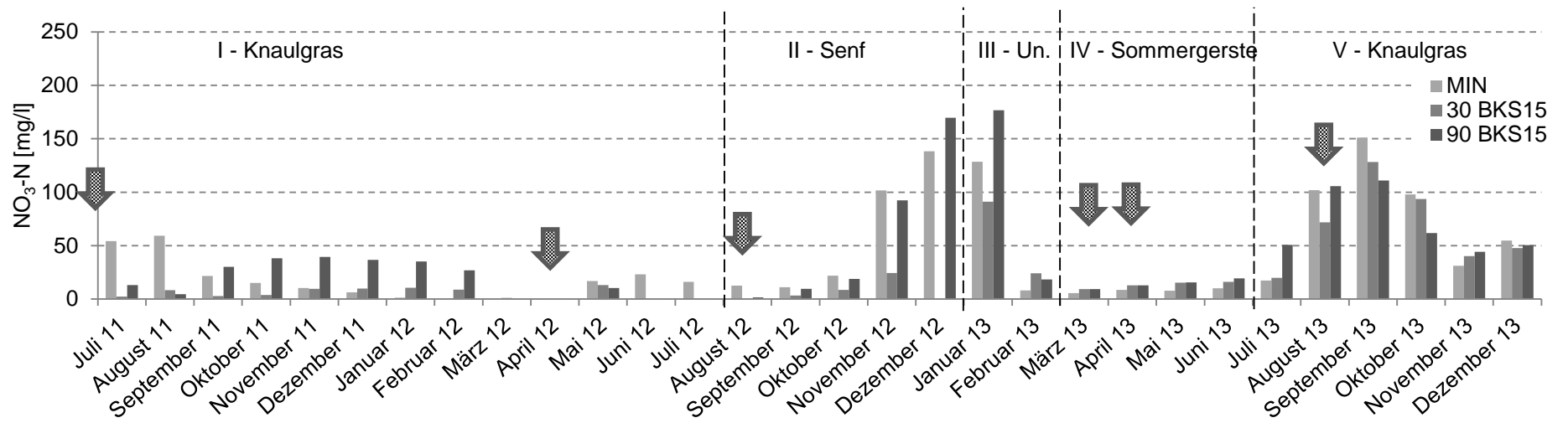


Abbildung 68: NO<sub>3</sub>-N-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in der Tiefenstufe 3 (100 cm) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1

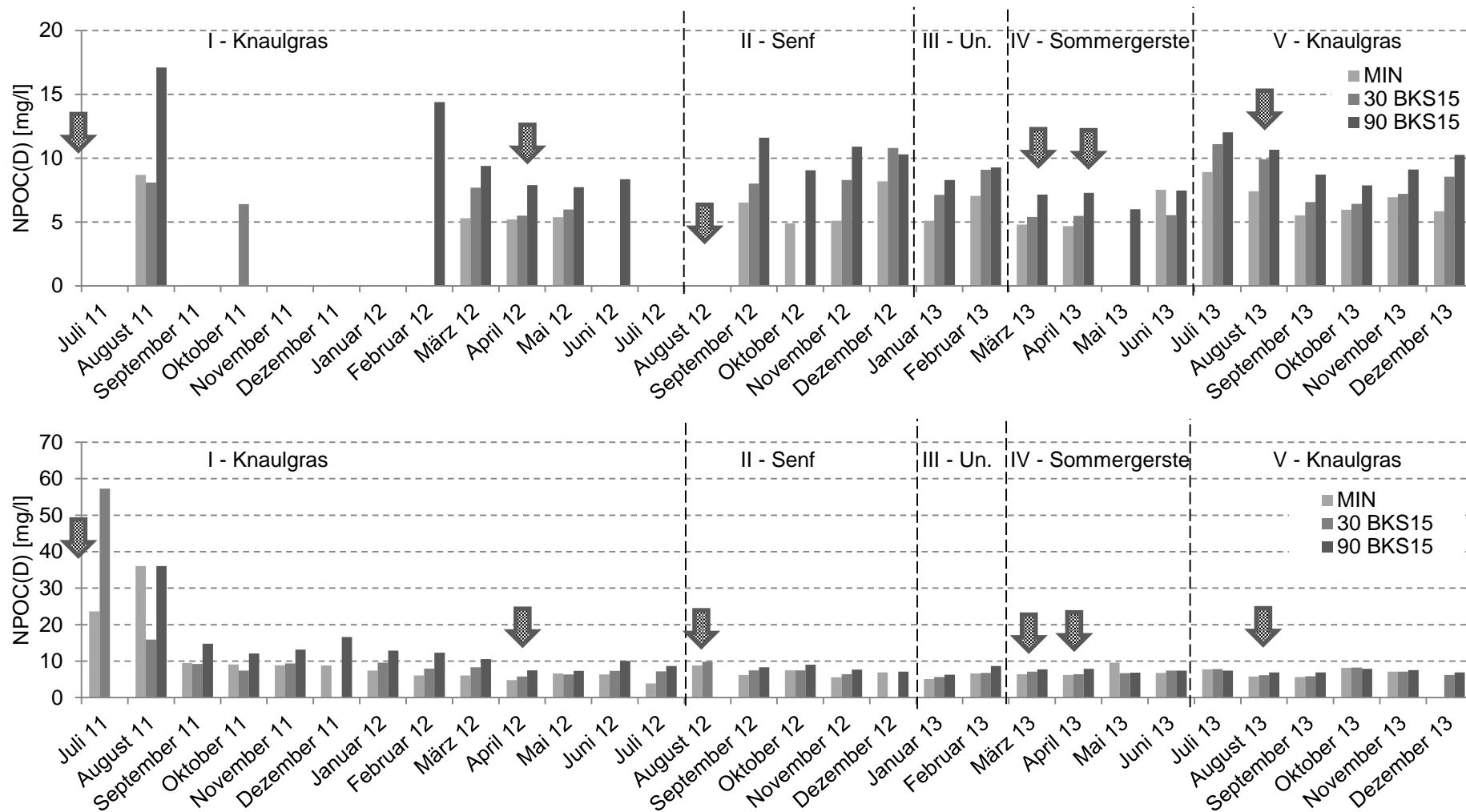


Abbildung 69: NPOC(D)-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in den Tiefenstufen 2 (45 cm, oben) und 3 (100 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

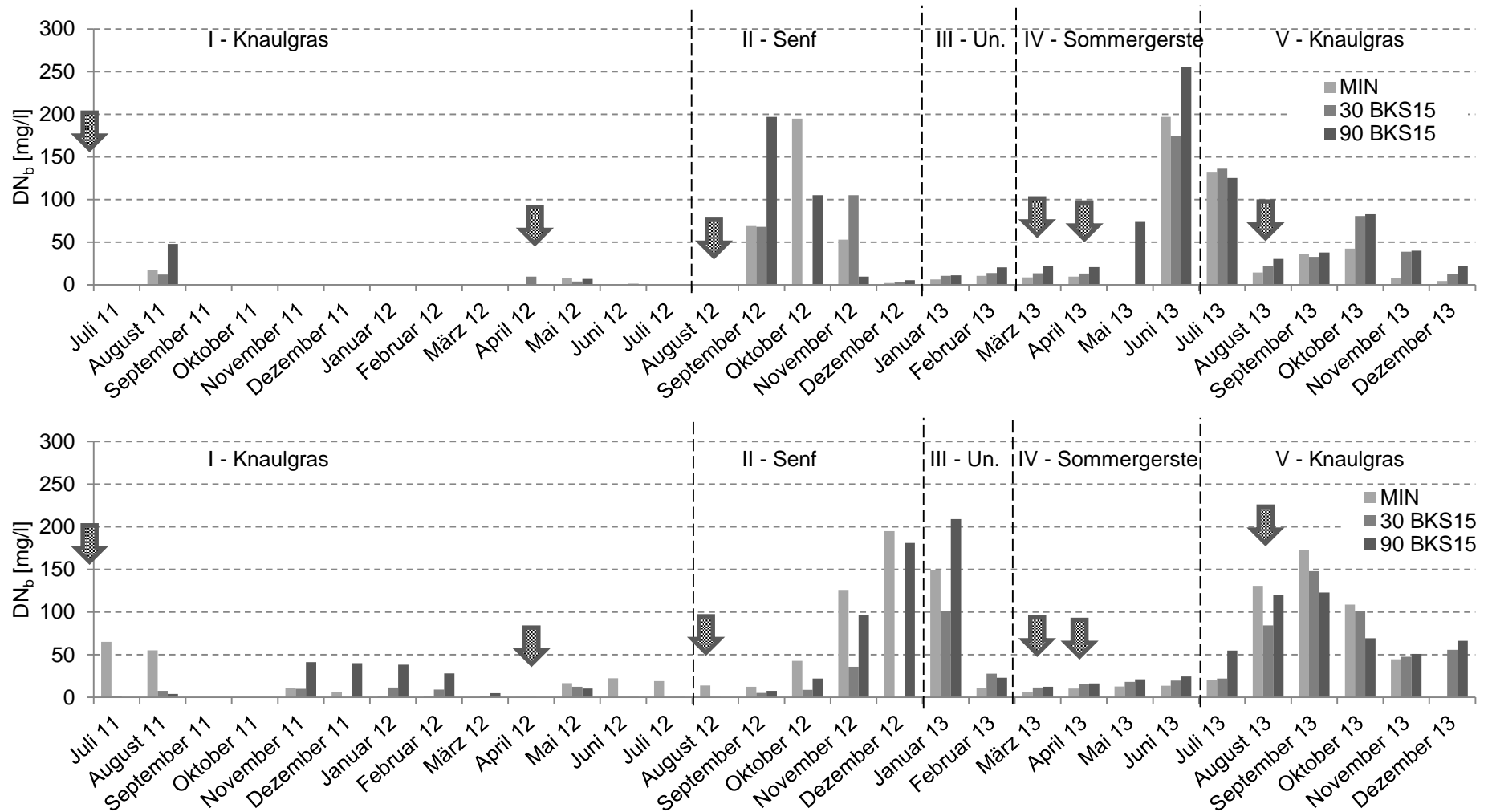


Abbildung 70: DN<sub>b</sub>-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in den Tiefenstufen 2 (45 cm, oben) und 3 (100 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

Abbildung 70 zeigt die **DN<sub>b</sub>-Konzentration** im Sickerwasser der Tiefenstufen 2 (oben) und 3 (unten). Die aufgefangenen Sickerwassermengen der Tiefenstufe 1 genügen für diese Analyse nicht, so dass hier keine auswertbaren Daten vorhanden sind. Auch in den Tiefenstufen 2 und 3 treten insbesondere in der Periode I noch größere Datenlücken auf, die eine Auswertung erschweren. In der Periode II treten in der Tiefenstufe 2 (Abbildung 70 oben) von September bis November 2012 erhöhte DN<sub>b</sub>-Konzentrationen im Sickerwasser aller Varianten auf. Im Juni und Juli 2013 (Periode IV bzw. V) sind ebenfalls in allen Varianten erhöhte DN<sub>b</sub>-Konzentrationen im Sickerwasser festzustellen. In der Tiefenstufe 3 treten erhöhte DN<sub>b</sub>-Konzentrationen im Sickerwasser von November 2012 bis Januar 2013 (Periode II bzw. III) sowie von August bis Oktober 2013 (Periode V) in allen Varianten auf. Außerhalb dieser Peaks sind tendenziell höhere DN<sub>b</sub>-Konzentrationen mit der Steigerung der BKS-Gabe zu verzeichnen. Über den gesamten Versuchszeitraum weist die Variante 90 BKS15 in der Tiefenstufe 2 signifikant höhere DN<sub>b</sub>-Konzentrationen auf als die Varianten MIN und 30 BKS15 (Anhang 2.11). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 2.12 zu entnehmen.

Die **o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen** des Sickerwassers liegen meist unterhalb des Bestimmungsgrenzwertes von 0,02 mg/l (Abbildung 71). Für die Darstellung der o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen und die statistische Auswertung wurde der halbe Grenzwert angenommen. In der Tiefenstufe 1 liegen nur Einzelwerte vor, die nicht auswertbar sind. In der Tiefenstufe 2 (Abbildung 71, oben) sind mehr messbare aber mit weniger als 0,15 mg/l sehr geringe o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen zu verzeichnen als in der Tiefenstufe 3 (Abbildung 71, unten). Im gesamten Versuchszeitraum treten in allen Varianten und Tiefenstufen keine relevanten o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen mit dem Sickerwasser auf. Es treten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten über den gesamten Versuchszeitraum (Anhang 2.13) und in den einzelnen Perioden (Anhang 2.14) auf.

In der Tiefenstufe 1 liegen nur Einzelwerte für die **K-Konzentrationen** des Sickerwassers vor, welche nicht auswertbar sind. In der Tiefenstufe 2 treten vor allem in der Variante 90 BKS15 hohe K-Konzentrationen mit bis zu 49,5 mg/l in der Periode I auf (Abbildung 72, oben). Dies ist auf die hohe K-Fracht von 1125 kg/ha mit der einmaligen Düngung der 90 t/ha BKS15 zurückzuführen. Im weiteren Versuchsverlauf werden die K-Konzentrationen der Variante 90 BKS15 geringer und nähern sich dem Niveau der Varianten MIN und 30 BKS15 an. Die K-Konzentrationen der Varianten MIN und 30 BKS15 liegen in der Regel unter 10 mg/l. In der Tiefenstufe 3 liegen die K-Konzentrationen aller Varianten unter 5 mg/l (Abbildung 72, unten). Die Variante 90



BKS15 weist etwas höhere K-Konzentrationen auf als die Varianten 30 BKS15 und MIN. Über den gesamten Versuchszeitraum weist die Variante 90 BKS15 in der Tiefenstufe 2 und 3 signifikant höhere K-Konzentrationen auf als die Varianten MIN und 30 BKS15 (Anhang 2.15). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 2.16 zu entnehmen.

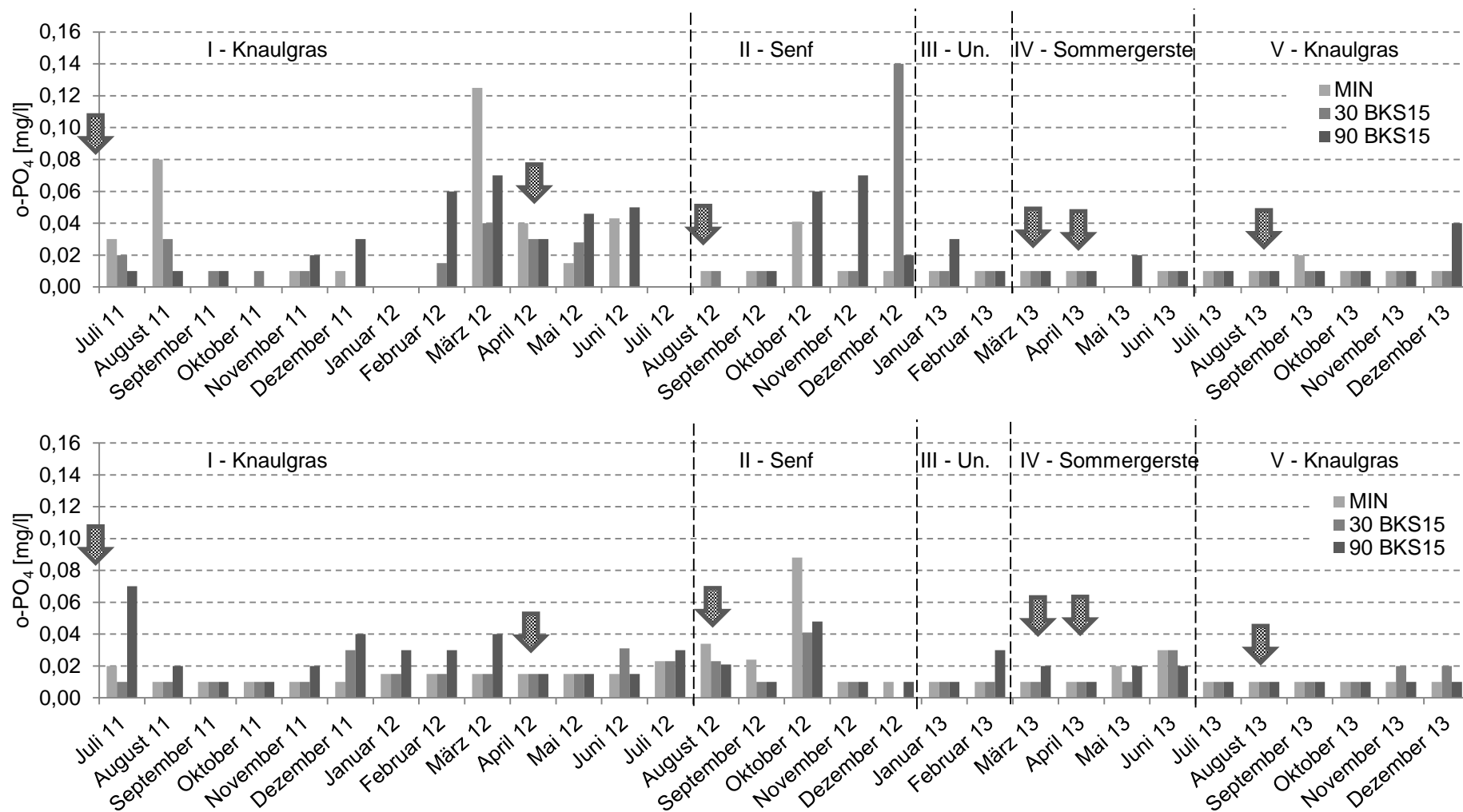


Abbildung 71: o-PO<sub>4</sub>-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in den Tiefenstufen 2 (45 cm, oben) und 3 (100 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

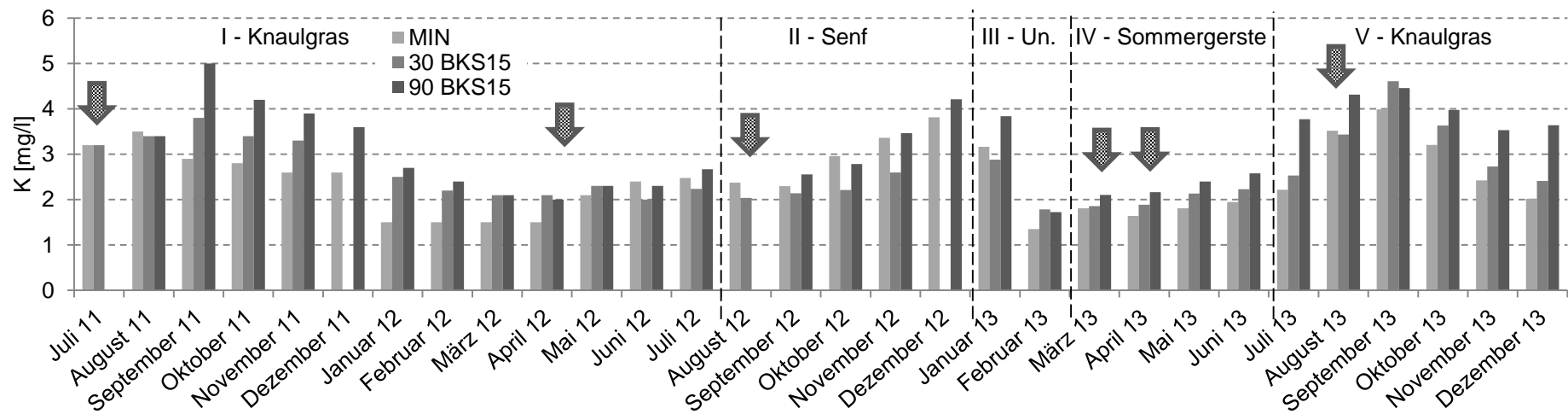
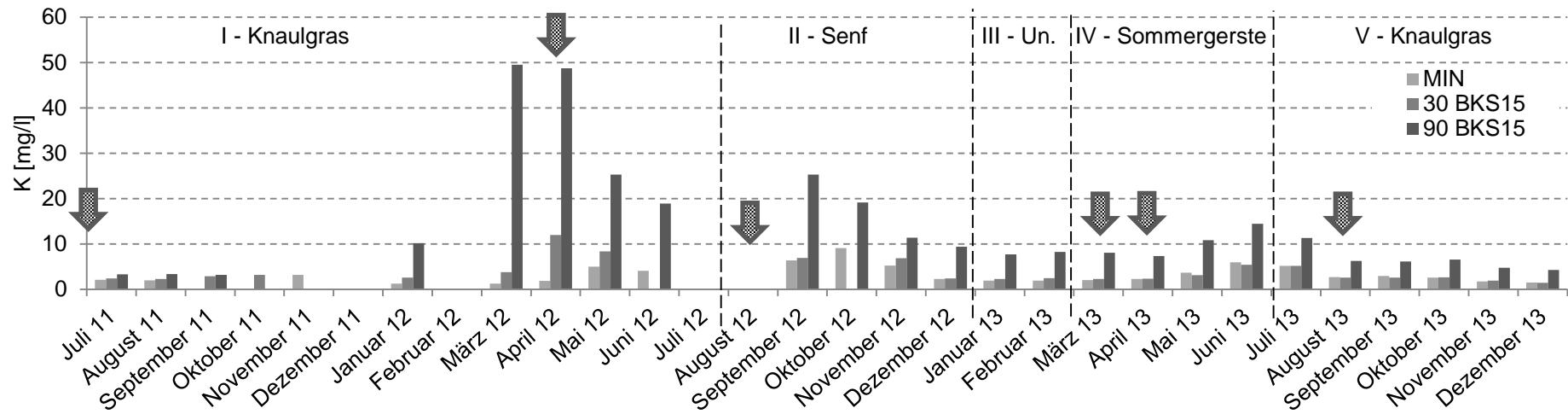


Abbildung 72: K-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in den Tiefenstufen 2 (45 cm, oben) und 3 (100 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

#### 4.3.3.3 Sickerwasserqualität des Bodens Zinnitz

Tabelle 74 zeigt die Entwicklung der mittleren **pH-Werte** im Sickerwasser in dem Versuchszeitraum für die einzelnen Tiefenstufen der Bodensäulen Zinnitz. Das Sickerwasser der Tiefenstufen 1 und 3 ist in den Bereich neutral bis leicht basisch einzuordnen. Das Sickerwasser der zweiten Tiefenstufe ist leicht sauer (MIN und 30 BKS15) bis neutral (90 BKS15) einzuordnen. In der ersten Periode der Tiefenstufe 1 fällt die Variante 90 BKS15 durch einen hohen mittleren pH-Wert auf, der sich allerdings nicht statistisch absichern lässt. In den Tiefenstufen 1 und 2 weist die Variante 90 BKS15 die höchsten mittleren pH-Werte im Sickerwasser auf. In der Tiefenstufe 1 liegt der geringste mittlere pH-Wert in der Variante MIN vor. Auffällig sind die sehr geringen, leicht sauren pH-Werte der Variante 30 BKS25 in der Tiefenstufe 2. In der Tiefenstufe 3 liegen die Variante MIN und 90 BKS15 auf einem vergleichbaren Niveau, während die Variante 30 BKS15 tendenziell höhere pH-Werte im Sickerwasser aufweist.

Signifikante Unterschiede liegen zwischen den Varianten 30 BKS15 und 90 BKS15 in der Tiefenstufe 2, Periode V vor. Zudem unterscheiden sich die pH-Werte der Varianten MIN und 30 BKS15 sowie 30 BKS15 und 90 BKS15 in der Tiefenstufe 3, Periode I signifikant. In der Tiefenstufe 3, Periode IV liegt ein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten MIN und 30 BKS15 vor. In den weiteren Perioden bzw. Tiefenstufen liegen keine signifikanten Unterschiede vor bzw. ist eine statistische Auswertung aufgrund fehlender Daten nicht möglich. Über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet, liegt in der Tiefenstufe 2 ein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten 30 BKS15 und 90 BKS15 sowie in der Tiefenstufe 3 zwischen den Varianten MIN und 30 BKS15 sowie 30 BKS15 und 90 BKS15 vor.

Tabelle 74: Mittlere pH-Werte für das Sickerwasser aus den einzelnen Tiefenstufen der Bodensäulen Zinnitz für die Perioden sowie den gesamten Versuchszeitraum

Tiefenstufe	Periode1)	MIN		30 BKS15		90 BKS15	
		pH <sup>3)</sup>	SD <sup>2) 4)</sup>	pH <sup>3)</sup>	SD <sup>2) 4)</sup>	pH <sup>3)</sup>	SD <sup>2) 4)</sup>
1	I	7,70	0,71	7,77	0,21	8,52	0,52
	II	7,37	n. b.	7,76	n. b.	n. b.	n. b.
	III	7,10	0,50	7,83	0,13	6,90	n. b.
	IV	7,18	0,28	7,51	0,24	7,42	0,68
	V	7,30	0,25	7,35	0,25	7,19	0,22
	<b>Gesamt</b>		<b>7,43</b>	<b>0,54</b>	<b>7,62</b>	<b>0,27</b>	<b>7,88</b>
2	I	6,77	0,35	6,44	0,68	7,05	0,72
	II	6,86	0,03	n. b.	n. b.	7,49	0,14
	III	6,53	n. b.	5,48	0,52	7,34	n. b.
	IV	6,42	n. b.	5,33	0,09	6,91	n. b.
	V	6,57 <sup>ab</sup>	0,32	5,51 <sup>a</sup>	0,74	6,99 <sup>b</sup>	0,26
	<b>Gesamt</b>		<b>6,70<sup>ab</sup></b>	<b>0,32</b>	<b>5,83<sup>a</sup></b>	<b>0,75</b>	<b>7,08<sup>b</sup></b>
3	I	7,09 <sup>ac</sup>	0,60	7,58 <sup>b</sup>	0,71	7,04 <sup>ac</sup>	0,54
	II	7,54	0,52	8,72	n. b.	7,60	0,60
	III	6,80	0,21	7,14	0,12	6,94	0,09
	IV	7,12 <sup>a</sup>	0,21	7,53 <sup>b</sup>	0,49	7,21 <sup>ab</sup>	0,22
	V	7,70	0,40	7,53	0,52	7,52	0,37
	<b>Gesamt</b>		<b>7,28<sup>a</sup></b>	<b>0,55</b>	<b>7,57<sup>b</sup></b>	<b>0,61</b>	<b>7,24<sup>a</sup></b>

<sup>1)</sup> Perioden: I: 07/2011 - 07/2012 Knaulgras, II: 08/2012 - 12/2012 Senf, III: 01/2013 - 02/2013 Unbestellt, IV: 03/2013 - 06/2013 Sommergerste, V: 07/2013 - 12/2013 Knaulgras. <sup>2)</sup> n. b. = Nicht bestimmt, <sup>3)</sup> Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede an. <sup>4)</sup> SD = Standardabweichung

In der Tiefenstufe 1 ist insbesondere in den Perioden I und II nicht ausreichend Sickerwasser für eine Analyse der **elektrischen Leitfähigkeit** verfügbar (Abbildung 73 oben). Von August 2011 bis November 2011 zeigt sich jedoch ein deutlicher Rückgang der gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten in allen Varianten. Ab März 2012 ist bis zum Ende der ersten Periode zumindest für die Varianten MIN und 90 BKS15 ein leichter Anstieg der elektrischen Leitfähigkeiten zu verzeichnen. Für die Periode II liegen keine aussagekräftigen Werte vor. In der Periode III liegen die elektrischen Leitfähigkeiten auf vergleichbarem Niveau, während sie im Verlauf der Periode IV tendenziell zunehmen. Die Variante 90 BKS15 weist in der Periode V tendenziell die höchsten gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten auf. Auch in der Tiefenstufe 2 fehlen in allen Perioden aufgrund von geringen Sickerwassermengen die Analyseergebnisse, insbesondere für die Variante 30 BKS15 (Abbildung 73 unten). In der ersten Periode nehmen die gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten von August bis Dezember 2011 ab, während sie ab April bis Juli 2012 zunehmen. Die höchsten elektrischen Leitfähigkeiten liegen von August bis November 2011 in der Variante MIN und die geringsten in der Variante 30 BKS15 vor. Im weiteren Verlauf der Periode I sind die Werte der Variante

90 BKS15 am höchsten. Für die Variante 30 BKS15 kann erstmals im Januar 2013 (Periode III) wieder ein Wert ermittelt werden. Für die Perioden II, III und IV ist aufgrund der großen Datenlücken keine zuverlässige Aussage zu treffen. In der Periode V weist die Variante 30 BKS15 teilweise deutlich höhere elektrische Leitfähigkeiten auf als die Varianten MIN und 90 BKS15. In der Tiefenstufe 3 (Abbildung 74) sind die gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten in der Periode I deutlich höher als in den folgenden Perioden (II - V, Ausnahme: August 2012). Bis November 2011 staffeln sich die gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten der Höhe nach MIN > 30 BKS15 > 90 BKS15. Von Dezember 2011 bis März 2012 weist die Variante 30 BKS15 die höchsten elektrischen Leitfähigkeiten (770 bis 660  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) auf, während die Varianten MIN und 90 BKS15 ein um etwa 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  geringeres vergleichbares Niveau einnehmen. Ab September 2012 (Periode II) liegen die elektrischen Leitfähigkeiten aller Varianten unter 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . In den Perioden III, IV und V weist die Variante MIN tendenziell eine höhere elektrische Leitfähigkeit auf als die Variante 90 BKS15. Die elektrische Leitfähigkeit in der Variante 30 BKS15 ist in diesen Perioden geringer als die der Varianten MIN und 90 BKS15. Über den gesamten Versuchszeitraum liegt für den Parameter der elektrischen Leitfähigkeit nur in der Tiefenstufe 3 ein signifikanter Unterschied zwischen der Variante MIN und den Varianten 30 BKS15 und 90 BKS15 vor (Anhang 2.19). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 2.20 zu entnehmen.

Aufgrund geringer Sickerwassermengen ergibt sich für die **NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen** in der Tiefenstufe 1 nur ein lückenhafter Datenbestand (Abbildung 75 oben). Zu Beginn der ersten Periode sind sehr hohe NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen (Variante MIN 211,0 mg/l), im Sickerwasser feststellbar. Diese nehmen bis November 2011 (Periode I) ab. Für die Perioden II, III, IV und V ist aufgrund der großen Datenlücken keine zuverlässige Aussage zu treffen. Die gemessenen Einzelwerte der Variante MIN zeigen häufig eine Überschreitung des NO<sub>3</sub>-N-Grenzwertes von 50 mg/l (EG, 1991; TrinkwV, 2001), während die Einzelwerte der Variante 30 BKS15 diesen Grenzwert einhalten. Auch in der Tiefenstufe 2 liegen viele Datenlücken vor (Abbildung 75 unten). In der Periode I ist von August bis Dezember 2011 ein Rückgang der NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen von 53,8 (MIN), 37,4 (30 BKS15) und 38,6 (90 BKS15) auf unter 10 mg/l in allen Varianten zu verzeichnen. Mit der Düngergabe steigen die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen im Sickerwasser der Varianten MIN und 90 BKS15 ab April 2012 wieder leicht an. In der Periode II und III liegen die gemessenen einzelnen NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen der Varianten MIN und 90 BKS15 über 100 mg/l. Die nur in der Periode III gemessene NO<sub>3</sub>-N-Konzentration der Variante 30 BKS15 liegt unter 40 mg/l. Erst im letzten Monat der

Periode IV im Juni 2013 tritt in allen Varianten wieder ausreichend Sickerwasser für eine Analyse der  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen auf. Die höchsten  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen liegen in der Variante MIN (113 mg/l) und die geringsten in der Variante 90 BKS15 (67 mg/l) vor. Davon ausgehend steigen die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen in der Periode V bis August 2013 deutlich an: 224 mg/l (30 BKS15), 195 mg/l (MIN) und 125 mg/l (90 BKS15). Der  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Grenzwert von 50 mg/l (EG, 1991; TrinkwV, 2001) wird um ein Vielfaches überschritten. Bis zum Versuchsende nehmen die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen der Variante MIN wieder ab. Für die Varianten 30 BKS15 und 90 BKS15 lag leider nicht genügend Sickerwasser vor. Abbildung 76 zeigt die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen der Tiefenstufe 3. Hier treten größere Datenlücken nur in der Variante 30 BKS15 in den Perioden I und II auf. In der ersten Periode gehen die anfangs erhöhten  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen der Variante MIN von 79 mg/l (August 2011) auf 16 mg/l (Januar 2012) zurück. In der Variante 30 BKS15 bleiben die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen bis Januar 2012 relativ stabil bei Werten um 50 mg/l. Die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen der Variante 90 BKS15 nehmen bis Oktober 2011 auf 37 mg/l zu und gehen anschließend auf 7 mg/l im Februar 2012 zurück. In der Periode II ist eine Erhöhung der  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen der Varianten MIN und 90 BKS15 zu verzeichnen. Für die Variante 30 BKS15 ist die Datenlage nicht aussagekräftig. In der Periode III liegen in den Varianten MIN und 90 BKS15 mit mehr als 100 bzw. 70 mg/l deutlich erhöhte  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen vor. Die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration der Variante 30 BKS15 liegt in der Periode III und IV relativ stabil bei unter 40 mg/l. Allerdings ist eine tendenzielle Zunahme im Verlauf der Periode IV feststellbar. Die höchsten erfassten  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen der Tiefenstufe 3 betragen im März 2013 (Periode IV) 142 mg/l (MIN) und 115 mg/l (90 BKS15), während die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration im Sickerwasser der Variante 30 BKS15 nur 28,2 mg/l beträgt. Im Verlauf der Periode IV nehmen die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen im Sickerwasser der Varianten MIN und 90 BKS15 kontinuierlich auf etwa 60 mg/l ab. Dieses Niveau halten die beiden Varianten auch im Verlauf der Periode V. Lediglich im Dezember 2013 kommt es zu einer deutlichen Erhöhung auf 110 mg/l in den Varianten MIN und 90 BKS15. Die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen nehmen im Verlauf der Periode V tendenziell auf 60 mg/l zu. Die Variante MIN weist über den gesamten Versuchszeitraum signifikant höhere  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen in der Tiefenstufe 2 gegenüber der Variante 90 BKS15 und in der Tiefenstufe 3 gegenüber der Variante 30 BKS15 auf (Anhang 2.21). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 2.22 zu entnehmen.

Zur **NPOC(D)-Konzentration** liegen in der Tiefenstufe 1 nur drei Einzelwerte vor, weshalb auf eine Darstellung verzichtet wird. In der Tiefenstufe 2 ist lediglich in der Periode

V eine Auswertung möglich (Abbildung 77Abbildung 78, oben). Die tendenziell höchsten NPOC(D)-Konzentrationen weist die Variante 30 BKS 15, gefolgt von den Varianten MIN und 90 BKS15 auf. Abbildung 77 (unten) zeigt die NPOC(D)-Konzentrationen der Tiefenstufe 3. Für die Periode I lässt sich anhand des Datenmaterials keine Aussage ableiten. In der Periode II liegt die einzige gemessene NPOC(D)-Konzentration der Variante 30 BKS15 deutlich über den mehrfach gemessenen NPOC(D)-Konzentrationen der Varianten MIN und 90 BKS15. Allerdings liegt die NPOC(D)-Konzentration der Variante 30 BKS15 in den Perioden III und IV in jedem Monat deutlich über den Werten der Varianten MIN und 90 BKS15. Die Variante MIN weist tendenziell geringere NPOC(D)-Konzentrationen auf als die Variante 90 BKS15. Diese Beobachtungen werden auch in der Periode V bestätigt. In der Tiefenstufe 3 liegen über den gesamten Versuchszeitraum signifikante Unterschiede für die NPOC(D)-Konzentration zwischen den Varianten MIN und 90 BKS15 sowie zwischen den Varianten 30 BKS15 und 90 BKS15 vor (Anhang 2.23). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 2.24 zu entnehmen.



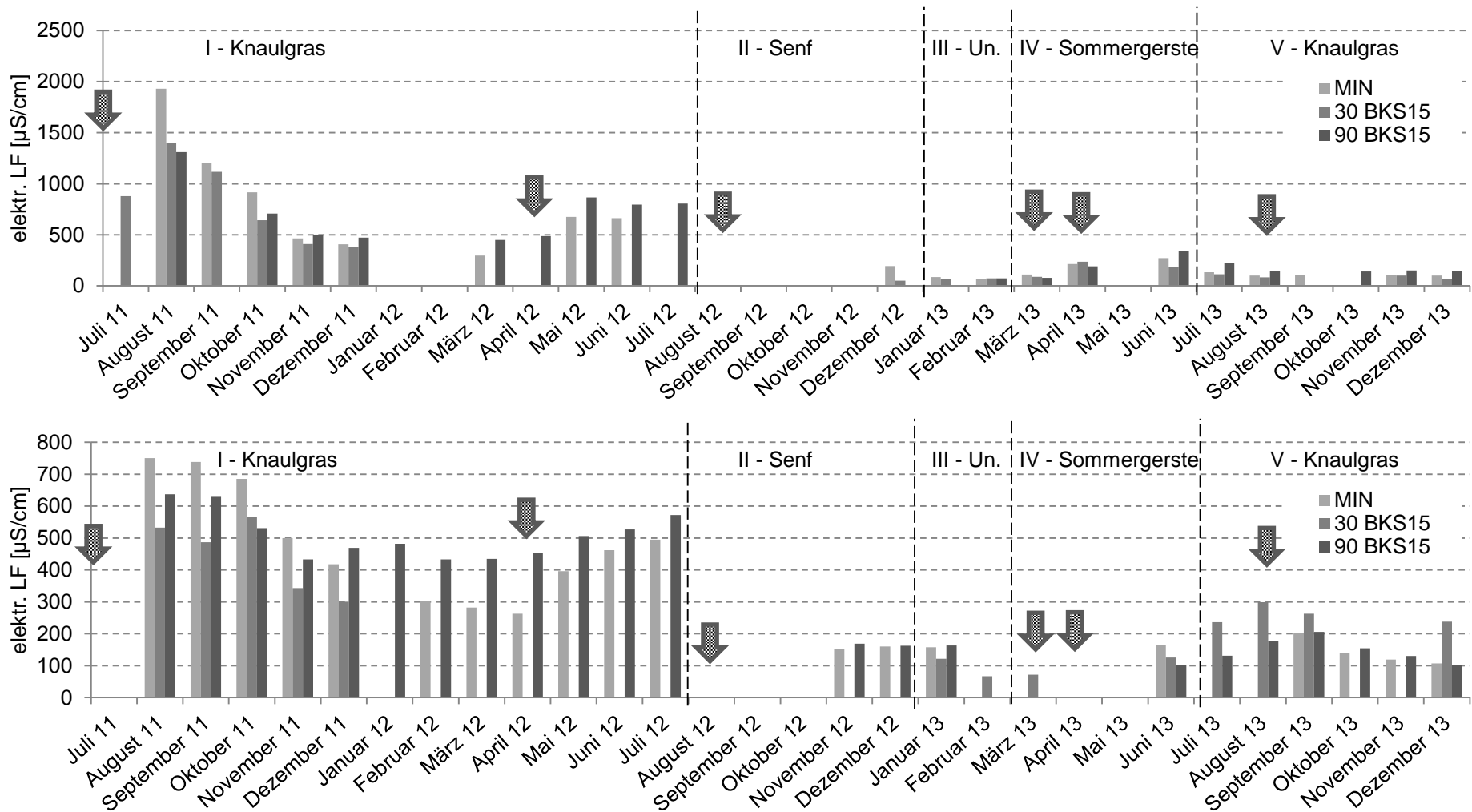


Abbildung 73: Elektrische Leitfähigkeit des Sickerwassers der Bodensäulen Zinnitz in den Tiefenstufen 1 (15 cm, oben) und 2 (45 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

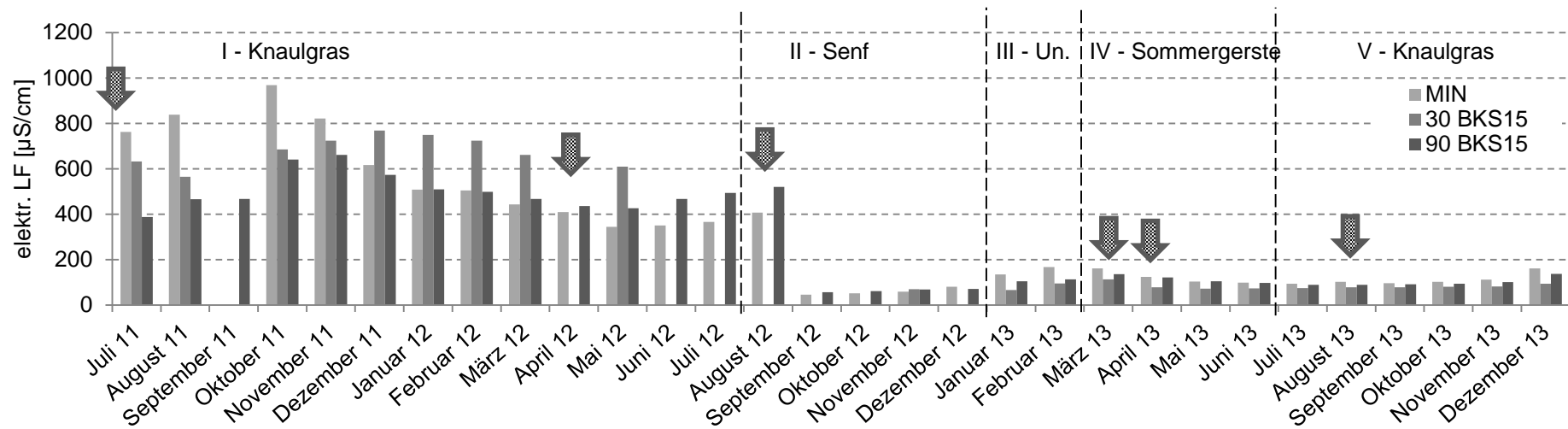


Abbildung 74: Elektrische Leitfähigkeit des Sickerwassers der Bodensäulen Zinnitz in der Tiefenstufe 3 (100 cm) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

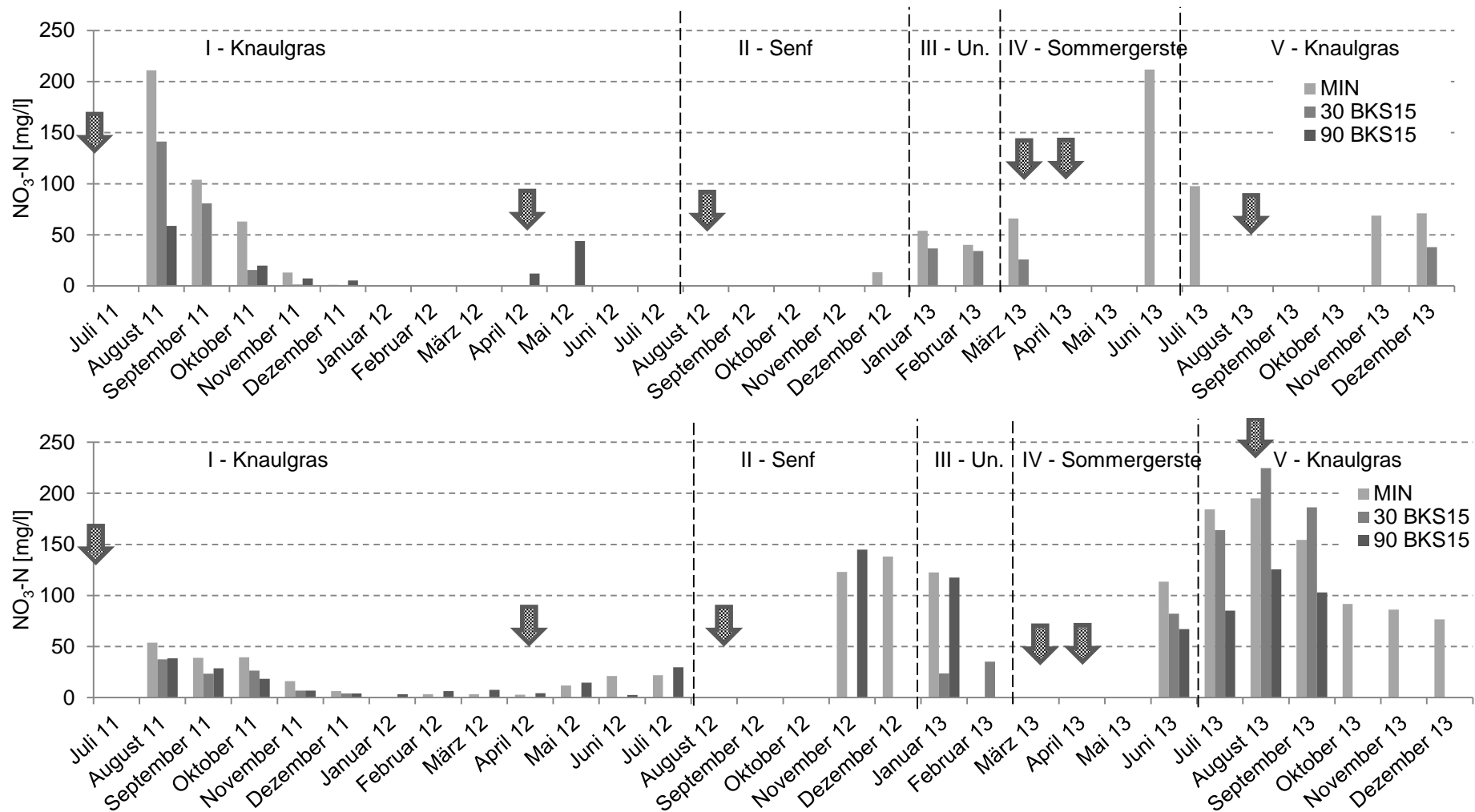


Abbildung 75: NO<sub>3</sub>-N-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Zinnitz in den Tiefenstufen 1 (15 cm, oben) und 2 (45 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

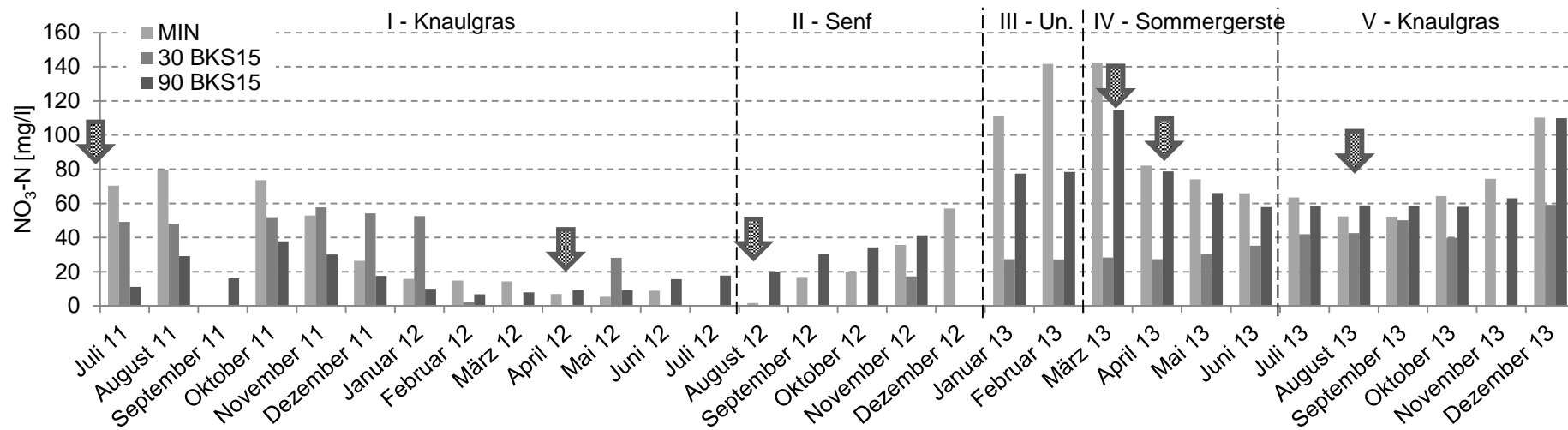


Abbildung 76: NO<sub>3</sub>-N-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Zinnitz in der Tiefenstufe 3 (100 cm) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

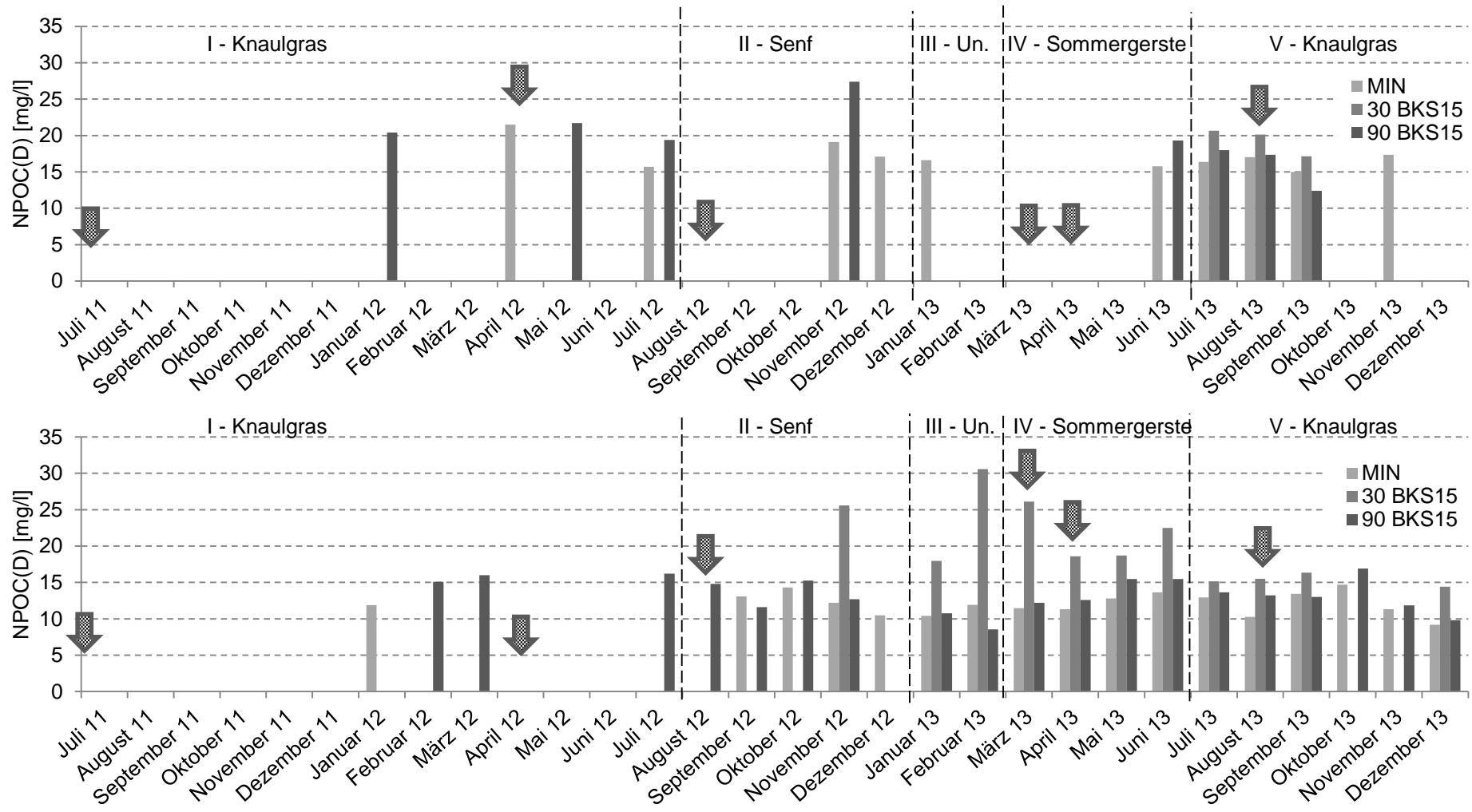


Abbildung 77: NPOC(D)-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Zinnitz in der Tiefenstufe 2 (45 cm, oben) und 3 (100 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

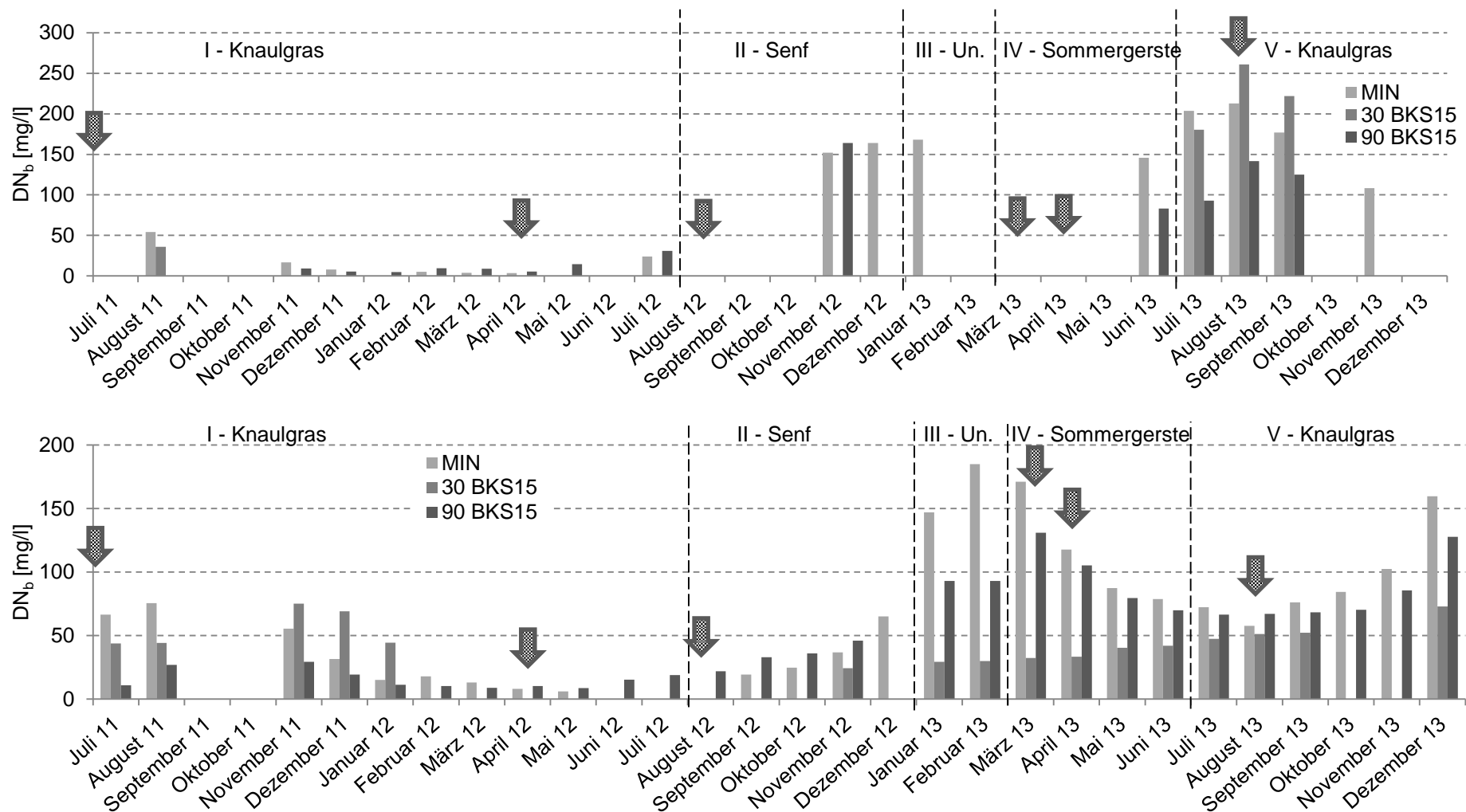


Abbildung 78: DN<sub>b</sub>-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Zinnitz in der Tiefenstufe 2 (45 cm, oben) und 3 (100 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

Für die **DN<sub>b</sub>-Konzentration** sind in der Tiefenstufe 1 nur drei Einzelwerte vorhanden, auf eine Darstellung wird daher verzichtet. In der Tiefenstufe 2 ist lediglich in der Periode V eine Auswertung möglich (Abbildung 78, oben). Die tendenziell höchsten DN<sub>b</sub>-Konzentrationen liegen in der Variante 30 BKS 15, gefolgt von den Varianten MIN und 90 BKS15 vor. Abbildung 78 (unten) zeigt die DN<sub>b</sub>-Konzentrationen der Tiefenstufe 3. Zu Beginn der Periode I liegen die höchsten DN<sub>b</sub>-Konzentrationen in der Variante MIN vor. Von November 2011 bis Januar 2012 weist die Variante 30 BKS15 die höchsten DN<sub>b</sub>-Konzentrationen auf. Bis Januar 2012 liegen in der Variante 90 BKS15 die geringsten DN<sub>b</sub>-Konzentrationen vor. Ab Februar 2012 können nicht mehr alle DN<sub>b</sub>-Konzentrationen bestimmt werden. Es ist die Tendenz erkennbar, dass die Variante 90 BKS15 geringere DN<sub>b</sub>-Konzentrationen aufweist als die Variante MIN, die allerdings zum Ende der Periode I ansteigen. In der Periode II nehmen die DN<sub>b</sub>-Konzentrationen der Varianten MIN und 90 BKS15 zu, wobei die DN<sub>b</sub>-Konzentrationen der Variante 90 BKS15 nun tendenziell höher sind als die der Variante MIN. Für die Variante 30 BKS15 kann nur ein Wert im November 2012 ermittelt werden. Dieser liegt deutlich unter den DN<sub>b</sub>-Konzentrationen der Varianten MIN und 90 BKS15. In den Perioden III, IV und V weist die Variante MIN deutlich höhere DN<sub>b</sub>-Konzentrationen auf als die Variante 90 BKS15 und 30 BKS15. Die DN<sub>b</sub>-Konzentrationen steigen bis Februar 2013 (MIN) bzw. März 2013 (90 BKS15) an, danach sinken die DN<sub>b</sub>-Konzentrationen bis August 2013 (MIN) bzw. Juli 2013 (90 BKS15) ab. Die DN<sub>b</sub>-Konzentrationen der Variante 30 BKS15 steigen von Januar (29 mg/l) bis Dezember 2013 (73 mg/l) kontinuierlich an. Sie liegen damit immer deutlich unter dem Niveau der Varianten MIN und 90 BKS15. Die DN<sub>b</sub>-Konzentrationen der Variante MIN ist über den gesamten Versuchszeitraum signifikant höher als die DN<sub>b</sub>-Konzentrationen der Varianten 30 BKS15 und 90 BKS15 vor (Anhang 2.25). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 2.26 zu entnehmen.

Zu der **o-PO<sub>4</sub>-Konzentration** liegen in der Tiefenstufe 1 nur Einzelwerte vor, weshalb auf eine Darstellung verzichtet wird. Die o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen aller Varianten in der Tiefenstufe 2 liegen in der Regel unter 10 mg/l (Abbildung 79, oben). In der Variante 30 BKS15 stand im Gegensatz zu den Varianten MIN und 90 BKS15 aufgrund des besseren Pflanzenwachstums häufig nicht genügend Material zur Bestimmung der o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen zur Verfügung. Bei Konzentrationen unterhalb des Bestimmungsgrenzwertes von 0,02 mg/l wurde der halbe Grenzwert für die Darstellung und die statistische Auswertung angenommen. In der Tiefenstufe 3 sind die o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen mit bis zu 0,23 mg/l etwas höher als in der Tiefenstufe 2 (Abbildung 79, unten). In der Periode I weist die Variante 90 BKS15 die höchsten o-PO<sub>4</sub>-

Konzentrationen auf. Im Versuchsverlauf steigen die o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen aller Varianten (Periode II) an. Ab der Periode III weist die Variante 30 BKS15 die höchsten o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen auf. Insgesamt sind die o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen als gering einzuschätzen. Lediglich in der Tiefenstufe 3 über den gesamten Versuchszeitraum sind die o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen der Variante 30 BKS15 signifikant höher als die o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen der Variante MIN (Anhang 2.27). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 2.28 zu entnehmen.

Für die **K-Konzentration** des Sickerwassers liegen in der Tiefenstufe 1 nur Einzelwerte vor, welche nicht auswertbar sind. In der Tiefenstufe 2 treten vor allem in der Variante 90 BKS15 hohe K-Konzentrationen mit bis zu 57,4 mg/l in der Periode II auf (Abbildung 80, oben). Dies ist auf die hohe K-Fracht von 1125 kg/ha mit der einmaligen Düngung der 90 t/ha BKS15 zurückzuführen. Anders als in dem Boden Welzow bleiben die K-Konzentrationen der Variante 90 BKS15 auf einem höheren Niveau als die Varianten MIN und 30 BKS15. Die K-Konzentrationen der Varianten MIN und 30 BKS15 liegen in der Regel unter 15 mg/l, wobei die Variante MIN höhere K-Konzentrationen aufweist als die Variante 30 BKS15. Insbesondere für die Variante 30 BKS15 stand aufgrund des besseren Pflanzenwachstums häufiger nicht genügend Material zur Analyse zur Verfügung. In der Tiefenstufe 3 liegen die K-Konzentrationen aller Varianten in der Regel unter 10 mg/l (Abbildung 80, unten). Die Variante 90 BKS15 weicht davon mit einem einmaligen Peak in Höhe von 13,3 mg/l K im Dezember 2011 ab. Im Versuchsverlauf pegeln sich die K-Konzentrationen aller Varianten auf etwa 4 mg/l ein. Über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet sind die K-Konzentrationen der Variante 90 BKS15 in der Tiefenstufe 2 signifikant höher als die K-Konzentrationen der Variante 30 BKS15 (Anhang 2.29). In der Tiefenstufe 3 liegt ein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten MIN und 30 BKS15 vor (Anhang 2.29). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 2.16 zu entnehmen.



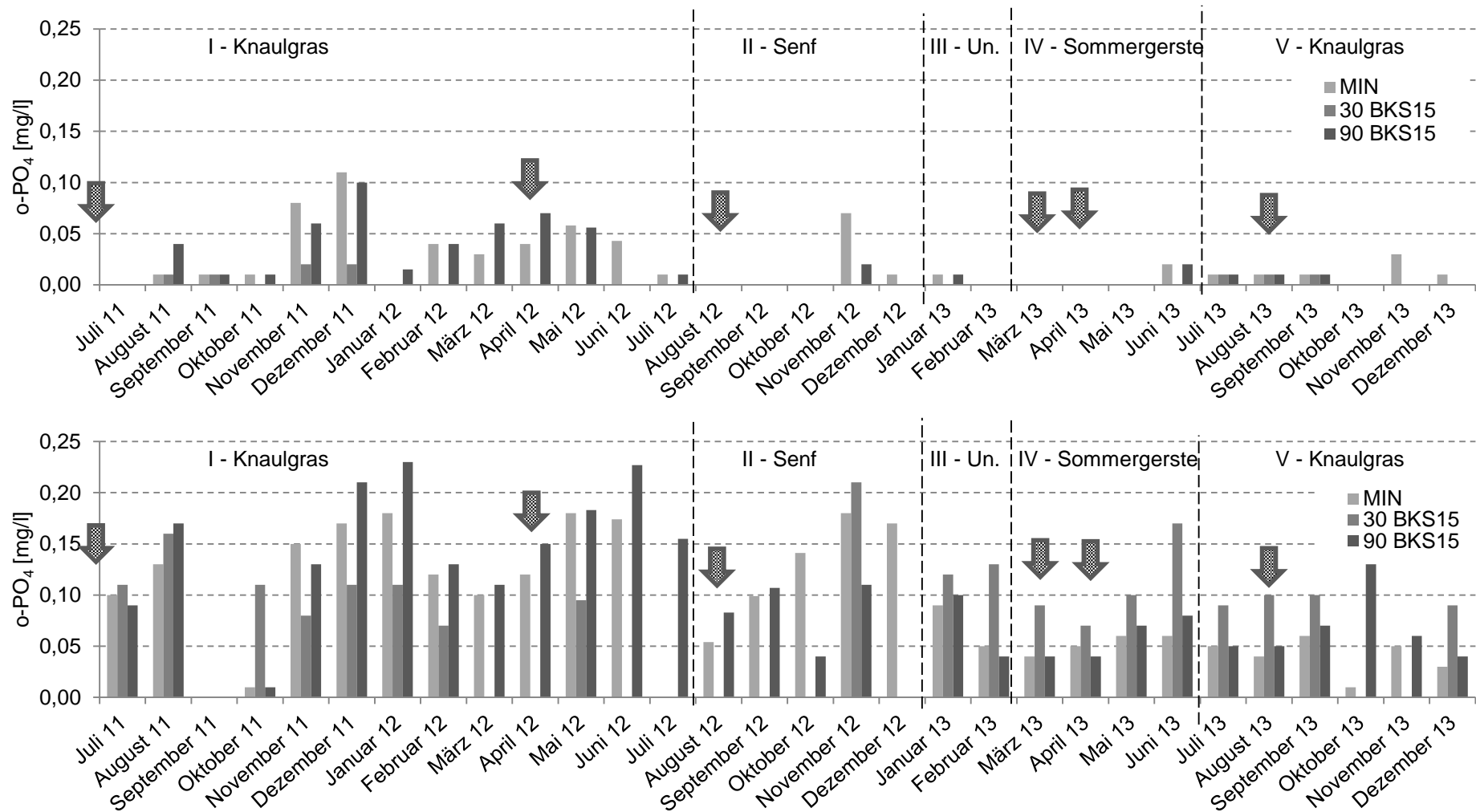


Abbildung 79: o-PO<sub>4</sub>-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Zinnitz in den Tiefenstufen 2 (45 cm, oben) und 3 (100 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

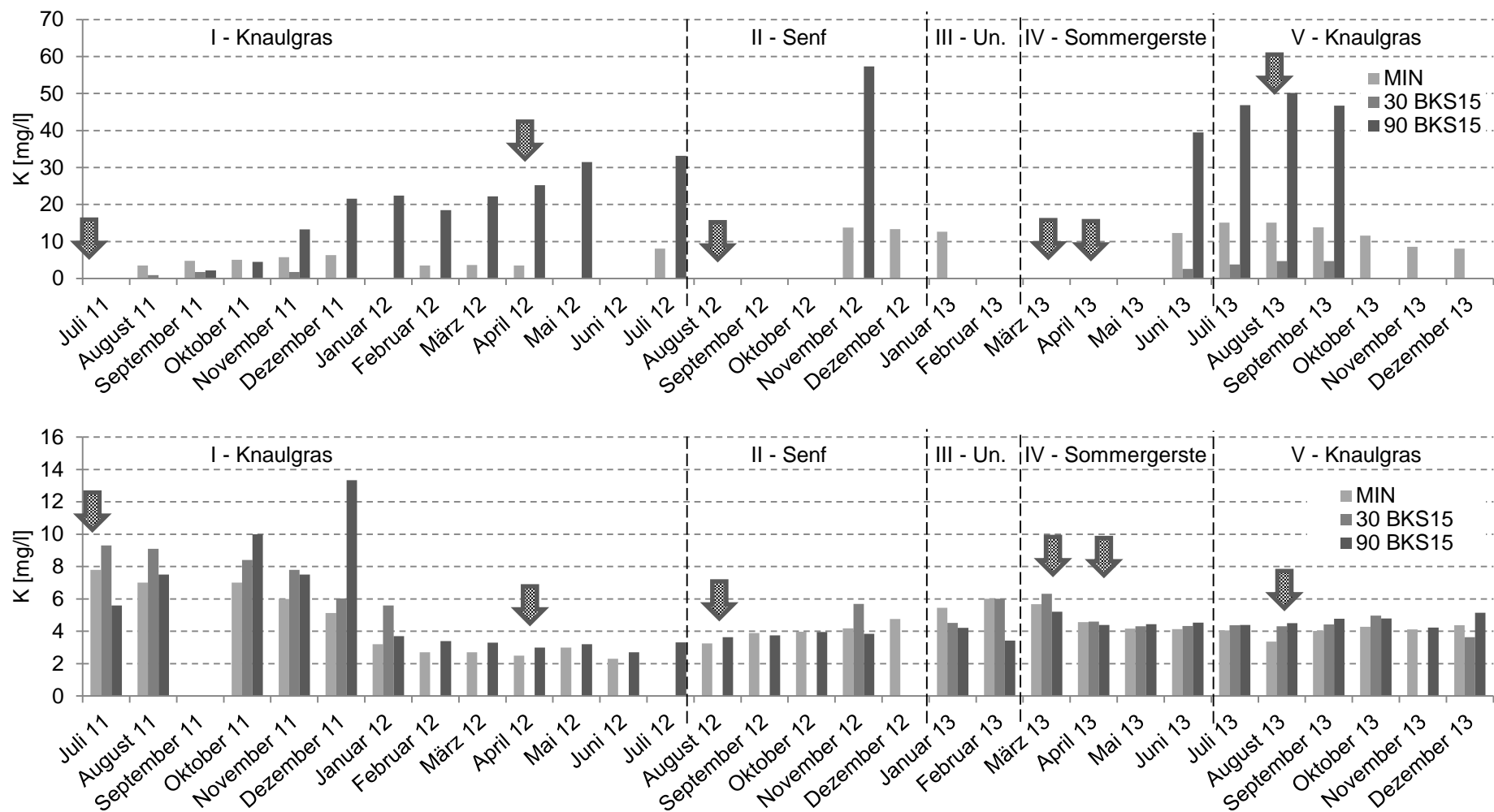


Abbildung 80: K-Konzentration des Sickerwassers der Bodensäulen Welzow in den Tiefenstufen 2 (45 cm, oben) und 3 (100 cm, unten) für den gesamten Versuchszeitraum (Un. = unbestellt, Pfeile markieren Düngergaben, n = 1)

#### 4.3.3.4 Nährstofffrachten bzw. -austräge mit dem Sickerwasser für die Bodensäulen Welzow und Zinnitz

Tabelle 75 gibt die  $N_{\min}$ -Frachten (Tiefenstufe 1 und 2) und  $N_{\min}$ -Austräge (Tiefenstufe 3) als Summe der  $\text{NO}_3\text{-N}$ - und  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Frachten bzw. -Austräge mit dem Sickerwasser für die einzelnen Tiefenstufen im Versuchsverlauf nach Perioden und über den gesamten Zeitraum für die Bodensäulen Welzow an. In der Tiefenstufe 1 liegen nur geringe  $N_{\min}$ -Frachten vor, was auch auf die niedrigen Sickerwasserraten und die dadurch fehlenden Analyseergebnisse zurückzuführen ist. Über den gesamten Zeitraum betrachtet, nehmen die  $N_{\min}$ -Frachten bzw. -Austräge mit Erhöhung der BKS-Gabe im Vergleich zur Variante MIN zu. Signifikante Unterschiede sind in dieser Tiefenstufe 1 nicht feststellbar. In der Tiefenstufe 2 treten erhöhte  $N_{\min}$ -Frachten in der Variante 30 BKS15 (Periode I und V) und 90 BKS15 (Periode IV) auf. Lediglich die  $N_{\min}$ -Fracht der Variante 90 BKS15 ist gegenüber der Variante MIN in der Periode IV signifikant höher. In der Tiefenstufe 3 fallen die Perioden I und V durch hohe  $N_{\min}$ -Austräge in allen Varianten auf. Darüber hinaus ist der  $N_{\min}$ -Austrag der Variante 90 BKS15 in der Periode III deutlich erhöht. Die höchsten  $N_{\min}$ -Austräge über den gesamten Versuchszeitraum liegen in der Tiefenstufe 3 in der Variante MIN vor. Die Erhöhung der BKS-Gabe von 30 auf 90 t/ha führt zu einer Steigerung der  $N_{\min}$ -Austräge, die aber unter dem Niveau der mineralisch gedüngten Variante bleiben. Signifikante Unterschiede liegen in der Periode II zwischen den Varianten MIN und 30 BKS15 sowie in der Periode IV zwischen den Varianten MIN und 90 BKS15 vor. Über den gesamten Zeitraum ist in der Tiefenstufe 3 ein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten 30 BKS15 und 90 BKS15 nachzuweisen.

Tabelle 75:  $N_{\min}$ -Frachten (Tiefenstufe 1 und 2) und  $N_{\min}$ -Austräge (Tiefenstufe 3) mit dem Sickerwasser der Bodensäulen Welzow nach Perioden und für den gesamten Versuchszeitraum (n = 1, arith. Mittel; SD)

Tiefenstufe	Periode <sup>1)</sup>	MIN <sup>2)</sup>		30 BKS15 <sup>2)</sup>		90 BKS15 <sup>2)</sup>	
		$N_{\min}$ [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>	$N_{\min}$ [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>	$N_{\min}$ [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>
1	I	1,23	0,24	1,86	0,47	0,33	0,10
	II	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	III	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	IV	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	3,90	1,43
	V	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	2,72	0,66
	<b>Gesamt</b>		<b>1,23</b>	<b>0,24</b>	<b>1,86</b>	<b>0,45</b>	<b>6,94</b>
2	I	4,66	0,56	17,97	2,58	36,79	6,08
	II	6,49	1,07	3,06	1,64	13,95	4,94
	III	0,79	0,05	1,05	0,02	1,34	0,19
	IV	5,73 <sup>a</sup>	2,21	5,55 <sup>ab</sup>	1,70	10,04 <sup>b</sup>	3,58
	V	14,38 <sup>(a) 4)</sup>	2,69	19,42 <sup>(b) 4)</sup>	2,84	13,24 <sup>(a) 4)</sup>	1,86
	<b>Gesamt</b>		<b>32,06<sup>(a) 4)</sup></b>	<b>1,67</b>	<b>47,05<sup>(b) 4)</sup></b>	<b>2,35</b>	<b>75,36<sup>(b) 4)</sup></b>
3	I	177,40	22,62	90,66	17,11	83,26	7,65
	II	51,48 <sup>a</sup>	7,66	5,78 <sup>b</sup>	1,10	47,31 <sup>ab</sup>	8,36
	III	68,92	46,24	47,87	26,34	104,04	67,02
	IV	6,23 <sup>a</sup>	0,53	9,29 <sup>ab</sup>	0,90	15,22 <sup>b</sup>	1,15
	V	105,25	14,51	91,11	11,48	122,66	11,29
	<b>Gesamt</b>		<b>409,28<sup>ab</sup></b>	<b>19,62</b>	<b>244,72<sup>a</sup></b>	<b>14,63</b>	<b>372,50<sup>b</sup></b>

<sup>1)</sup> Perioden: I: 07/2011 - 07/2012 Knaulgras, II: 08/2012 - 12/2012 Senf, III: 01/2013 - 02/2013 Unbestellt, IV: 03/2013 - 06/2013 Sommergerste, V: 07/2013 - 12/2013 Knaulgras. <sup>2)</sup> n. b. = Nicht bestimmt, Kleinbuchstaben geben signifikante Unterschiede an, <sup>3)</sup> SD = Standardabweichung, <sup>4)</sup> Es liegt ein signifikanter Unterschied in dieser Tiefenstufe und Periode vor, der allerdings im paarweisen Vergleich durch die Fehlerkorrektur nicht belegt werden kann.

Tabelle 76 zeigt analog die  $N_{\min}$ -Frachten (Tiefenstufe 1 und 2) und  $N_{\min}$ -Austräge (Tiefenstufe 3) mit dem Sickerwasser für die Bodensäulen Zinnitz. In der Tiefenstufe 1 treten erhöhte  $N_{\min}$ -Frachten in der Periode I auf. Die Variante MIN hat die höchsten  $N_{\min}$ -Frachten, während die Variante 90 BKS15 nur sehr geringe  $N_{\min}$ -Frachten aufweist. Letzteres ist vor allem auf geringe Sickerwassermengen und die dadurch fehlenden Analyseergebnisse zurückzuführen. Es liegen keine signifikanten Unterschiede vor. In der Tiefenstufe 2 fallen die Perioden I und V mit erhöhten  $N_{\min}$ -Frachten in allen Varianten auf. Die Variante MIN hat in allen Perioden sehr hohe  $N_{\min}$ -Frachten, während die BKS-Varianten eher moderate  $N_{\min}$ -Frachten aufweisen. Dies ist größtenteils geringen Sickerwassermengen geschuldet. Signifikante Unterschiede liegen in der Periode I zwischen den Varianten MIN und 30 BKS15 sowie in der Periode V zwischen den Varianten MIN und 90 BKS15 vor. Über den gesamten Zeitraum unterscheiden sich die Varianten 30 BKS15 und 90 BKS15 signifikant von der Variante MIN. In der Tiefenstufe 3 treten insbesondere in der Periode I in allen Varianten erhöhte  $N_{\min}$ -Austräge auf. Die Variante MIN weist in allen Perioden sehr hohe  $N_{\min}$ -Austräge und damit auch insge-

samt die höchsten  $N_{\min}$ -Austräge in dieser Tiefenstufe auf. Die  $N_{\min}$ -Austräge der Variante 90 BKS15 sind ebenfalls erhöht. Die geringsten  $N_{\min}$ -Austräge sind in der Variante 30 BKS15 in allen Perioden sowie in Summe über den gesamten Versuchszeitraum festzustellen. In den einzelnen Perioden sind keine signifikanten Unterschiede nachweisbar. Jedoch unterscheiden sich die Varianten MIN und 90 BKS15 von der Variante 30 BKS15 signifikant über den gesamten Versuchszeitraum.

Tabelle 76:  $N_{\min}$ -Frachten (Tiefenstufe 1 und 2) und  $N_{\min}$ -Austräge (Tiefenstufe 3) mit dem Sickerwasser der Bodensäulen Zinnitz nach Perioden und für den gesamten Versuchszeitraum (n = 1, arith. Mittel; SD)

Tiefenstufe	Periode <sup>1)</sup>	MIN <sup>2)</sup>		30 BKS15 <sup>2)</sup>		90 BKS15 <sup>2)</sup>	
		$N_{\min}$ [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>	$N_{\min}$ [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>	$N_{\min}$ [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>
1	I	14,64	2,79	8,08	2,65	2,75	0,30
	II	0,28	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	III	1,88	0,19	1,38	0,05	n. b.	n. b.
	IV	6,30	2,73	0,41	n. b.	n. b.	n. b.
	V	3,92	0,59	0,56	n. b.	n. b.	n. b.
	<b>Gesamt</b>	<b>27,02</b>	<b>2,10</b>	<b>10,43</b>	<b>1,95</b>	<b>2,75</b>	<b>0,30</b>
2	I	49,34 <sup>a</sup>	4,86	6,10 <sup>b</sup>	1,57	27,55 <sup>ab</sup>	1,87
	II	16,47	4,98	0,00	n. b.	3,76	n. b.
	III	9,13	n. b.	0,72	0,10	2,17	n. b.
	IV	14,46	n. b.	1,68	n. b.	2,43	n. b.
	V	81,76 <sup>a</sup>	12,89	29,15 <sup>ab</sup>	1,51	19,98 <sup>b</sup>	3,43
	<b>Gesamt</b>	<b>171,16<sup>a</sup></b>	<b>8,55</b>	<b>37,64<sup>b</sup></b>	<b>4,23</b>	<b>55,89<sup>b</sup></b>	<b>2,54</b>
3	I	219,87 <sup>(a) 4)</sup>	25,14	93,22 <sup>(b) 4)</sup>	10,31	129,91 <sup>(b) 4)</sup>	15,45
	II	25,61	4,27	0,68	n. b.	26,55	6,47
	III	107,30	8,07	19,35	1,27	65,92	16,76
	IV	81,47 <sup>(a) 4)</sup>	16,37	19,92 <sup>(b) 4)</sup>	3,61	76,40 <sup>(a) 4)</sup>	12,50
	V	72,26	14,24	26,12	4,45	77,13	12,63
	<b>Gesamt</b>	<b>506,50<sup>a</sup></b>	<b>21,02</b>	<b>159,29<sup>b</sup></b>	<b>7,62</b>	<b>375,91<sup>a</sup></b>	<b>14,35</b>

<sup>1)</sup> Perioden: I: 07/2011 - 07/2012 Knautgras, II: 08/2012 - 12/2012 Senf, III: 01/2013 - 02/2013 Unbestellt, IV: 03/2013 - 06/2013 Sommergerste, V: 07/2013 - 12/2013 Knautgras. <sup>2)</sup> n. b. = Nicht bestimmt, Kleinbuchstaben geben signifikante Unterschiede an, <sup>3)</sup> SD = Standardabweichung, <sup>4)</sup> Es liegt ein signifikanter Unterschied in dieser Tiefenstufe und Periode vor, der allerdings im paarweisen Vergleich durch die Fehlerkorrektur nicht belegt werden kann.

Im gesamten Versuchszeitraum traten in dem Boden Welzow und in dem Boden Zinnitz keine relevanten o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen in dem Sickerwasser auf bzw. es fiel nicht ausreichend Sickerwasser zur Bestimmung der o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen an. Es gibt dementsprechend keine nennenswerten P-Frachten (Tiefenstufe 1 und 2) und P-Austräge (Tiefenstufe 3) mit dem Sickerwasser in allen Varianten für den Boden Welzow (Tabelle 77) und den Boden Zinnitz (Tabelle 78). Eine statistische Berechnung ist für die meisten Perioden aller Tiefenstufen aufgrund fehlender Daten nicht möglich. In den übrigen Fällen treten keine signifikanten Unterschiede auf.

Tabelle 77: P-Frachten (Tiefenstufe 1 und 2) und P-Austräge (Tiefenstufe 3) mit dem Sickerwasser der Bodensäulen Welzow nach Perioden und für den gesamten Versuchszeitraum (n = 1, arith. Mittel; SD)

Tiefenstufe	Periode <sup>1)</sup>	MIN <sup>2)</sup>		30 BKS15 <sup>2)</sup>		90 BKS15 <sup>2)</sup>	
		P [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>	P [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>	P [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>
1	I	0,037	0,003	0,332	0,053	0,516	0,045
	II	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	III	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	IV	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	V	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	<b>Gesamt</b>	<b>0,037</b>	<b>0,003</b>	<b>0,332</b>	<b>0,053</b>	<b>0,516</b>	<b>0,045</b>
2	I	0,055	0,006	0,030	0,002	0,053	0,003
	II	0,013	0,002	0,027	0,010	0,025	0,005
	III	0,003	n. b.	0,003	n. b.	0,006	0,002
	IV	0,005	0,001	0,005	0,001	0,008	0,001
	V	0,011	0,001	0,009	0,000	0,014	0,002
	<b>Gesamt</b>	<b>0,087</b>	<b>0,004</b>	<b>0,074</b>	<b>0,004</b>	<b>0,106</b>	<b>0,003</b>
3	I	0,029 (a) <sup>4)</sup>	0,001	0,033 (a) <sup>4)</sup>	0,001	0,054 (b) <sup>4)</sup>	0,003
	II	0,026	0,005	0,013	0,002	0,016	0,003
	III	0,003	n. b.	0,003	n. b.	0,006	0,002
	IV	0,011	0,002	0,009	0,002	0,011	0,001
	V	0,009	n. b.	0,013	0,001	0,009	n. b.
	<b>Gesamt</b>	<b>0,078</b>	<b>0,002</b>	<b>0,071</b>	<b>0,001</b>	<b>0,096</b>	<b>0,002</b>

<sup>1)</sup> Perioden: I: 07/2011 - 07/2012 Knaulgras, II: 08/2012 - 12/2012 Senf, III: 01/2013 - 02/2013 Unbestellt, IV: 03/2013 - 06/2013 Sommergerste, V: 07/2013 - 12/2013 Knaulgras. <sup>2)</sup> n. b. = Nicht bestimmt, Kleinbuchstaben geben signifikante Unterscheide an, <sup>3)</sup> SD = Standardabweichung, <sup>4)</sup> Es liegt ein signifikanter Unterschied in dieser Tiefenstufe und Periode vor, der allerdings im paarweisen Vergleich aufgrund der Fehlerkorrektur nicht belegt werden kann.

Tabelle 78: P-Frachten (Tiefenstufe 1 und 2) und P-Austräge (Tiefenstufe 3) mit dem Sickerwasser der Bodensäulen Zinnitz nach Perioden und für den gesamten Versuchszeitraum (n = 1, arith. Mittel; SD)

Tiefenstufe	Periode <sup>1)</sup>	MIN <sup>2)</sup>		30 BKS15 <sup>2)</sup>		90 BKS15 <sup>2)</sup>	
		P [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>	P [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>	P [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>
1	I	0,219	0,022	0,050	n. b.	1,006	0,083
	II	0,012	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	III	0,075	0,026	0,027	n. b.	n. b.	n. b.
	IV	0,020	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	V	0,029	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	<b>Gesamt</b>	<b>0,354</b>	<b>0,023</b>	<b>0,077</b>	<b>0,016</b>	<b>1,006</b>	<b>0,083</b>
2	I	0,066	0,005	0,009	0,001	0,071	0,004
	II	0,012	0,006	n. b.	n. b.	0,003	n. b.
	III	0,002	n. b.	n. b.	n. b.	0,002	n. b.
	IV	0,003	n. b.	n. b.	n. b.	0,003	n. b.
	V	0,011	0,001	0,005	n. b.	0,005	n. b.
	<b>Gesamt</b>	<b>0,094</b>	<b>0,004</b>	<b>0,014</b>	<b>0,001</b>	<b>0,083</b>	<b>0,004</b>
3	I	0,216	0,008	0,127	0,004	0,271	0,009
	II	0,097	0,008	0,032	n. b.	0,051	0,005
	III	0,021	0,004	0,038	0,001	0,021	0,006
	IV	0,032	0,001	0,065	0,007	0,035	0,003
	V	0,036	0,003	0,057	0,001	0,060	0,005
	<b>Gesamt</b>	<b>0,402</b>	<b>0,008</b>	<b>0,319</b>	<b>0,005</b>	<b>0,438</b>	<b>0,009</b>

<sup>1)</sup> Perioden: I: 07/2011 - 07/2012 Knautgras, II: 08/2012 - 12/2012 Senf, III: 01/2013 - 02/2013 Unbestellt, IV: 03/2013 - 06/2013 Sommergerste, V: 07/2013 - 12/2013 Knautgras. <sup>2)</sup> n. b. = Nicht bestimmt, <sup>3)</sup> SD = Standardabweichung

Tabelle 79 zeigt die K-Frachten (Tiefenstufe 1 und 2) und K-Austräge (Tiefenstufe 3) mit dem Sickerwasser für den Boden Welzow. Zur Bestimmung der K-Konzentrationen stand häufig nicht genügend Sickerwasser für eine Analyse zur Verfügung, so dass insbesondere in der Tiefenstufe 1 aber auch in den weiteren Tiefenstufen die K-Frachten bzw. -Austräge zu gering sind. In der Tiefenstufe 1 können lediglich in der Variante 90 BKS15 geringe K-Frachten festgestellt werden. Eine statistische Berechnung ist für diese Tiefenstufe aufgrund fehlender Daten nicht möglich. Die Varianten MIN und 30 BKS15 weisen vergleichbare geringe K-Frachten (Tiefenstufe 2) und K-Austräge (Tiefenstufe 3) auf. Die Variante 90 BKS15 verzeichnet in der Tiefenstufe 2 signifikant höhere K-Frachten als die Varianten MIN (Periode I, II, V und Gesamt) und 30 BKS15 (Periode I, V und Gesamt). Die K-Fracht der Variante 90 BKS15 ist insgesamt in der Tiefenstufe 2 um 38,5 bzw. 36,9 kg/ha höher als die K-Fracht der Variante MIN bzw. 30 BKS15. Dies ist größtenteils auf fehlende K-Konzentrationen der Varianten MIN und 30 BKS15 (siehe Abbildung 72) zurückzuführen. Auch in der Tiefenstufe 3 weist die Variante 90 BKS15 signifikant höhere K-Austräge als die Varianten MIN (Periode I, IV, V und Gesamt) und 30 BKS15 (Gesamt) auf.

Tabelle 79: K-Frachten (Tiefenstufe 1 und 2) und K-Austräge (Tiefenstufe 3) mit dem Sickerwasser der Bodensäulen Welzow nach Perioden und für den gesamten Versuchszeitraum (n = 1, arith. Mittel; SD)

Tiefenstufe	Periode <sup>1)</sup>	MIN <sup>2)</sup>		30 BKS15 <sup>2)</sup>		90 BKS15 <sup>2)</sup>	
		K [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>	K [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>	K [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>
1	I	0,14	0,03	0,14	n. b.	n. b.	n. b.
	II	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	III	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	IV	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	3,44	1,32
	V	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	5,40	1,28
	<b>Gesamt</b>	<b>0,14</b>	<b>0,03</b>	<b>0,14</b>	<b>n. b.</b>	<b>8,84</b>	<b>1,41</b>
2	I	3,28 <sup>a</sup>	0,21	5,89 <sup>a</sup>	0,56	25,47 <sup>b</sup>	3,05
	II	3,61 <sup>a</sup>	0,44	2,54 <sup>ab</sup>	0,41	10,23 <sup>b</sup>	1,15
	III	0,61	0,00	0,75	0,02	2,50	0,06
	IV	2,19 <sup>(a) 4)</sup>	0,28	2,07 <sup>(a) 4)</sup>	0,23	6,39 <sup>(b) 4)</sup>	0,50
	V	2,62 <sup>a</sup>	0,20	2,58 <sup>a</sup>	0,20	6,18 <sup>b</sup>	0,39
	<b>Gesamt</b>	<b>12,30<sup>a</sup></b>	<b>0,31</b>	<b>13,84<sup>a</sup></b>	<b>0,40</b>	<b>50,77<sup>b</sup></b>	<b>1,98</b>
3	I	4,79 <sup>a</sup>	0,11	5,10 <sup>ab</sup>	0,15	5,73 <sup>b</sup>	0,15
	II	2,32	0,10	1,41	0,04	2,04	0,12
	III	0,71	0,20	0,73	0,12	0,87	0,23
	IV	1,13 <sup>a</sup>	0,02	1,27 <sup>ab</sup>	0,03	1,45 <sup>b</sup>	0,03
	V	2,72 <sup>a</sup>	0,12	3,03 <sup>ab</sup>	0,13	3,71 <sup>b</sup>	0,06
	<b>Gesamt</b>	<b>11,68<sup>a</sup></b>	<b>0,12</b>	<b>11,55<sup>a</sup></b>	<b>0,13</b>	<b>13,81<sup>b</sup></b>	<b>0,14</b>

<sup>1)</sup> Perioden: I: 07/2011 - 07/2012 Knaulgras, II: 08/2012 - 12/2012 Senf, III: 01/2013 - 02/2013 Unbestellt, IV: 03/2013 - 06/2013 Sommergerste, V: 07/2013 - 12/2013 Knaulgras. <sup>2)</sup> n. b. = Nicht bestimmt, Kleinbuchstaben geben signifikante Unterschiede an, <sup>3)</sup> SD = Standardabweichung, <sup>4)</sup> Es liegt ein signifikanter Unterschied in dieser Tiefenstufe und Periode vor, der allerdings im paarweisen Vergleich durch die Fehlerkorrektur nicht belegt werden kann.

Tabelle 80 zeigt die K-Frachten (Tiefenstufe 1 und 2) und K-Austräge (Tiefenstufe 3) mit dem Sickerwasser für den Boden Zinnitz. Auch auf diesem Boden stand häufig nicht genügend Sickerwasser für eine Analyse der K-Konzentrationen zur Verfügung, so dass insbesondere in der Tiefenstufe 1 aber auch in den weiteren Tiefenstufen die K-Frachten bzw. -Austräge zu gering sind. In der Tiefenstufe 1 sind die K-Frachten der Variante 30 BKS15 tendenziell höher als die der Variante MIN. Für die Variante 90 BKS15 konnten keine K-Frachten festgestellt werden, da nicht genügend Sickerwasser vorhanden war. Eine statistische Berechnung ist für diese Tiefenstufe aufgrund fehlender Daten nicht möglich. Analog zu dem Boden Welzow liegen auch in dem Boden Zinnitz in der Tiefenstufe 2 erhöhte K-Frachten der Variante 90 BKS15 vor, die um 56,7 bzw. 62,5 kg/ha höher sind als die K-Fracht der Variante MIN bzw. 30 BKS15. Dies ist größtenteils auf fehlende K-Konzentrationen der Varianten MIN und 30 BKS15 (siehe Abbildung 80) zurückzuführen. In der Periode V ist die K-Fracht der Variante 90 BKS15 signifikant höher als die K-Fracht der Variante 30 BKS15. Die K-Frachten der Varianten MIN und 90 BKS15 sind über den gesamten Zeitraum signifikant höher als



die K-Fracht der Variante 30 BKS15. Die K-Austräge in der Tiefenstufe 3 steigen über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet mit Erhöhung der BKS-Gabe an. Die signifikant geringsten K-Austräge liegen in der Variante MIN (Periode I, V und Gesamt) gegenüber der Variante 30 BKS15 (Periode I und Gesamt) und der Variante 90 BKS15 (Periode V) vor.

Tabelle 80: K-Frachten (Tiefenstufe 1 und 2) und K-Austräge (Tiefenstufe 3) mit dem Sickerwasser der Bodensäulen Zinnitz nach Perioden und für den gesamten Versuchszeitraum (n = 1, arith. Mittel; SD)

Tiefenstufe	Periode <sup>1)</sup>	MIN <sup>2)</sup>		30 BKS15 <sup>2)</sup>		90 BKS15 <sup>2)</sup>	
		K [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>	K [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>	K [kg/ha]	SD <sup>3)</sup>
1	I	6,92	n. b.	11,67	n. b.	n. b.	n. b.
	II	0,15	n. b.	0,00	n. b.	n. b.	n. b.
	III	0,01	0,00	0,01	0,01	n. b.	n. b.
	IV	0,57	0,27	0,04	n. b.	n. b.	n. b.
	V	1,02	0,15	0,06	n. b.	n. b.	n. b.
	<b>Gesamt</b>	<b>7,18</b>	<b>2,37</b>	<b>11,78</b>	<b>5,21</b>	<b>n. b.</b>	<b>n. b.</b>
2	I	6,69	0,24	0,68	0,13	29,34	1,55
	II	4,08	0,05	0,00	n. b.	8,65	n. b.
	III	1,91	n. b.	0,01	0,01	0,00	n. b.
	IV	1,85	n. b.	0,40	n. b.	5,96	n. b.
	V	10,92 <sup>ab</sup>	0,48	2,00 <sup>a</sup>	0,08	21,68 <sup>b</sup>	0,30
	<b>Gesamt</b>	<b>8,88<sup>a</sup></b>	<b>0,66</b>	<b>3,08<sup>b</sup></b>	<b>0,28</b>	<b>65,62<sup>a</sup></b>	<b>2,65</b>
3	I	7,44 <sup>a</sup>	0,32	6,97 <sup>b</sup>	0,24	10,03 <sup>ab</sup>	0,51
	II	3,03	0,08	0,86	n. b.	2,29	0,02
	III	1,73	0,06	1,59	0,16	1,15	0,08
	IV	2,80	0,11	2,95	0,15	2,80	0,06
	V	3,65 <sup>a</sup>	0,05	3,28 <sup>ab</sup>	0,07	4,20 <sup>b</sup>	0,05
	<b>Gesamt</b>	<b>4,42<sup>a</sup></b>	<b>0,21</b>	<b>15,64<sup>b</sup></b>	<b>0,27</b>	<b>20,47<sup>ab</sup></b>	<b>0,34</b>

<sup>1)</sup> Perioden: I: 07/2011 - 07/2012 Knautgras, II: 08/2012 - 12/2012 Senf, III: 01/2013 - 02/2013 Unbestellt, IV: 03/2013 - 06/2013 Sommergerste, V: 07/2013 - 12/2013 Knautgras. <sup>2)</sup> n. b. = Nicht bestimmt, Kleinbuchstaben geben signifikante Unterschiede an, <sup>3)</sup> SD = Standardabweichung

#### 4.3.4 N-, P- und K-Bilanzen des Bodensäulenversuches 2011 - 2013

Für die Erstellung der N-, P- und K-Bilanzen der Versuchsböden Welzow und Zinnitz (Tabelle 81) wurden nur die Austräge der Tiefenstufe 3 verwendet. Die Frachten der Tiefenstufen 1 und 2 wurden nicht berücksichtigt. Die BKS-Gabe bewirkt in dem Boden Welzow höhere N-Ernteentzüge als die Variante MIN. Die N-Austräge mit dem Sickerwasser werden in der Variante 30 BKS15 gegenüber der Variante MIN verringert. Die Erhöhung der BKS-Gabe auf 90 t/ha führt zu tendenziell geringeren N-Austrägen als in der Variante MIN. Die N-Austräge mit dem Sickerwasser sind insgesamt sehr hoch, allerdings ist durch die BKS-Gabe mit hohen N<sub>t</sub>-Konzentrationen keine deutliche Zu-

nahme der N-Auswaschungsverluste zu verzeichnen. Die Varianten MIN und 90 BKS15 weisen negative N-Bilanzen auf. Lediglich die Variante 30 BKS15 hält einen geringen N-Anteil im Bodenkörper zurück. Auch in dem Boden Zinnitz weist die Variante 30 BKS15 deutlich höhere N-Entzüge mit dem Erntegut und geringere N-Auswaschungen auf als die Variante MIN. Mit der Steigerung der BKS-Düngung nehmen der N-Entzug ab und die N-Auswaschungsverluste im Vergleich zu der Variante MIN zu. Die N-Auswaschungsverluste sind insgesamt als sehr hoch einzustufen. Die N-Bilanzen aller Varianten sind negativ. Jedoch bewirkt die BKS-Gabe im Vergleich zu der Variante MIN zu einer deutlichen Reduzierung der N-Auswaschungsverluste, wobei die BKS15-Gabenhöhe von 30 t/ha stärker reduzierend wirkt als die Gabe von 90 t/ha. Die P-Ernteentzüge beider Böden sind sehr gering. In dem Boden Welzow ist eine tendenzielle Steigerung mit Erhöhung der BKS-Gabe feststellbar. Der Boden Zinnitz weist in der Variante 30 BKS15 die höchsten Entzüge auf. Für beide Böden liegen keine P-Austräge mit dem Sickerwasser vor. Hier ist kein Einfluss der BKS-Gabe feststellbar. Der größte P-Anteil verbleibt im Bodenkörper. In beiden Böden erhöht sich der K-Ernteentzug mit der BKS-Gabe. Allerdings ist nur in dem Boden Welzow eine Steigerung des K-Ernteentzuges mit Erhöhung der BKS-Gabe feststellbar. Die K-Austräge mit dem Sickerwasser sind in beiden Böden sehr gering. Es ist eine tendenzielle Zunahme der K-Austräge mit Erhöhung der BKS-Gabe auf 90t/ha zu verzeichnen. Der überwiegende Teil des Kaliums wird im Bodenkörper gehalten.

Die hohen N-Auswaschungsverluste beider Versuchsböden sind in den BKS-Varianten im Vergleich zur mineralisch gedüngten Variante reduziert. Dieser Effekt ist bei einer geringeren Aufwandmenge in Höhe von 30 t/ha BKS15 stärker ausgeprägt als bei einer Gabenhöhe von 90 t/ha BKS15. Die P- und K-Auswaschungen aller Varianten sind gering. Der Einsatz des BKS15 führt nicht zu zusätzlichen N-, P- und K-Auswaschungsverlusten.

Tabelle 81: N-, P- und K-Bilanzen der Böden Welzow und Zinnitz für den gesamten Versuchszeitraum

Bilanz	Welzow			Zinnitz			
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	
N [kg/ha]							
Input	BKS	0	400	1200	0	400	1200
	Düngung	500	450	350	500	450	350
	Deposition	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
	Summe	509,5	859,5	1559,5	509,5	859,5	1559,5
Output	Ernteentzug	124,7	235,4	210,9	291,3	580,1	401,7
	Sickerwasser	409,3	244,7	372,5	506,5	159,3	375,9
	Summe	534,0	480,2	583,4	797,8	739,3	777,6
<b>Bilanz</b>	<b>-24,5</b>	<b>379,3</b>	<b>976,1</b>	<b>-288,3</b>	<b>120,2</b>	<b>781,9</b>	
P [kg/ha]							
Input	BKS	0	75	225	0	75	225
	Düngung	150	60	60	150	60	60
	Deposition	0	0	0	0	0	0
	Summe	150	135	285	150	135	285
Output	Ernteentzug	15,3	28,3	32,2	37,5	67,4	40,4
	Sickerwasser	0,1	0,1	0,1	0,4	0,3	0,4
	Summe	15,4	28,4	32,3	37,9	67,7	40,8
<b>Bilanz</b>	<b>134,6</b>	<b>106,6</b>	<b>252,7</b>	<b>112,1</b>	<b>67,3</b>	<b>244,2</b>	
K [kg/ha]							
Input	BKS	0	375	1125	0	375	1125
	Düngung	280	130	130	280	130	130
	Deposition	0	0	0	0	0	0
	Summe	280	505	1255	280	505	1255
Output	Ernteentzug	173,1	269,4	327,1	392,1	634,3	503,9
	Sickerwasser	11,7	11,5	13,8	18,6	15,6	20,5
	Summe	184,7	280,9	340,9	410,7	650,0	524,4
<b>Bilanz</b>	<b>95,3</b>	<b>224,1</b>	<b>914,1</b>	<b>-130,7</b>	<b>-145,0</b>	<b>730,6</b>	

## 4.4 Lysimeter

### 4.4.1 Bodenparameter

#### 4.4.1.1 Physikalische Bodenkennwerte

Eine bodenphysikalische Untersuchung während dem Versuchsablauf erfolgte nur für den Oberboden Welzow im Juli 2012 zusätzlich zu den Daten zum Versuchsbeginn (vgl. Tabelle 23). Die Trockenrohdichte der Varianten MIN und 90 BKS15 betragen  $1,7 \text{ g/cm}^3$ , während die Variante 3x30 BKS15 eine Trockenrohdichte von nur  $1,6 \text{ g/cm}^3$  aufweist. Die geringen Gesamtporenvolumina der Varianten MIN und 90 BKS15 betragen 37,7 Vol.-%. Nur die Variante 3x30 BKS15 weist eine Zunahme des Gesamtporenvolumens auf ein mittleres Niveau gegenüber der mineralischen Referenzvariante um 2,8 Vol.-% auf (Ad-Hoc-AG Boden, 2005).

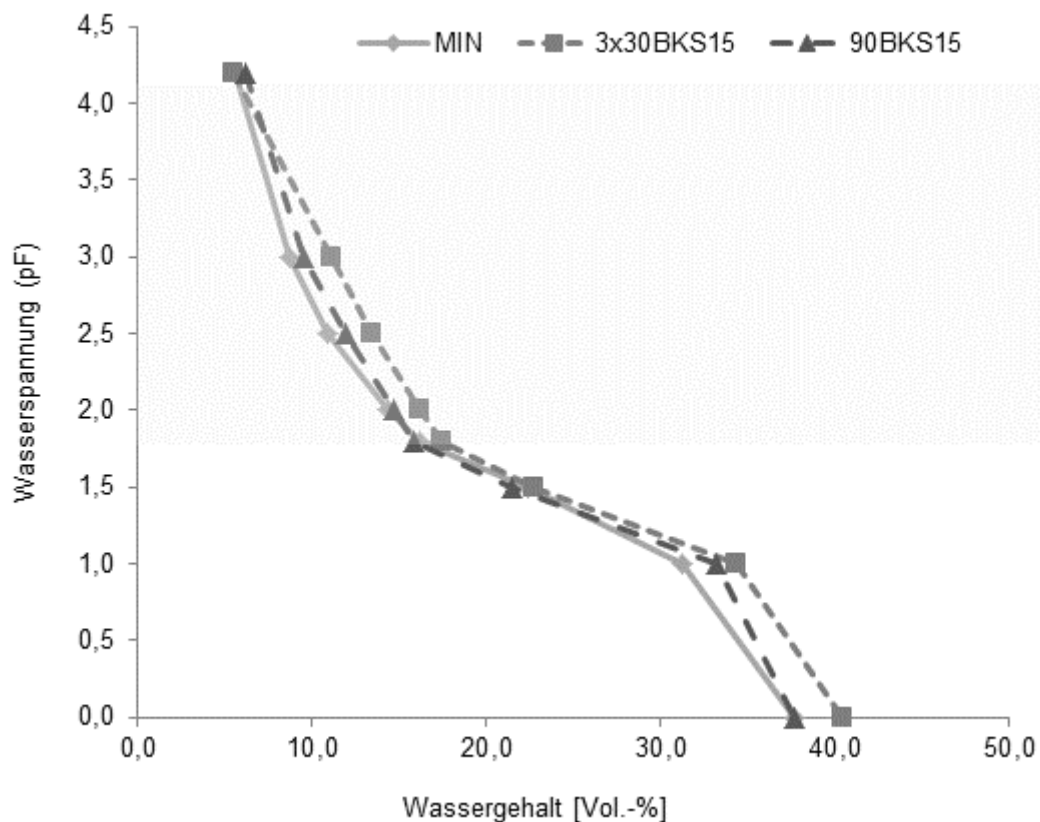


Abbildung 81: pF-WG-Kurve für den Oberboden Welzow im Juli 2012 ( $n = 6$ ), Bereich der nutzbaren Feldkapazität (nFK) ist grau hervorgehoben.

Die Variante 90 BKS15 und die mineralische Referenzvariante haben einen vergleichbaren Verlauf der pF-WG-Kurven (Abbildung 81). Der grau hinterlegte Bereich in Ab-

bildung 81 zeigt die nutzbare Feldkapazität (nFK) an. Hier zeigt sich, dass im Boden der Variante 3x30 BKS15 eine tendenziell höhere nFK vorliegt als in den Varianten 90 BKS15 und MIN. Auch die Luftkapazität (LK;  $pF = 0,0 - 1,8$ ) ist im Boden der Variante 3x30 BKS15 tendenziell höher als in den Varianten 90 BKS15 und MIN. Das Totwasser (TW;  $pF = 4,2$ ) im Boden der Variante 90 BKS15 ist tendenziell höher als in der mineralischen Referenzvariante und in der Variante 3x30 BKS15. Die Einstufung der bodenphysikalischen Parameter (nFK, LK, TW) ist für alle Varianten einheitlich als gering (nFK, TW) bzw. hoch (LK) (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Es liegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten vor.

#### 4.4.1.2 Chemische Bodenkennwerte

Tabelle 82 zeigt die chemischen Kennwerte der Oberböden in den Lysimetern während des Versuchsverlaufes. Der Boden **Welzow** weist bereits mit 7,5 einen hohen pH-Wert auf, der durch die BKS-Gabe nicht beeinträchtigt wird. Der  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalt im Boden sowie das C/N-Verhältnis nehmen mit der BKS-Gabe zu. Bereits nach zwei Gaben á 30 t/ha BKS15 erreicht die Variante 3x30 BKS15 im Juli 2012 (vgl. Tabelle 25) das Niveau des  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehaltes der Variante 90 BKS15. Auch die  $C_{hwl}$ -,  $N_{hwl}$ -,  $K_{DL}$ - und  $P_{DL}$ -Gehalte steigen mit der BKS-Gabe im Vergleich zur reinen Mineraldüngung an. Die  $C_{hwl}$ -Gehalte nehmen im Versuchsverlauf tendenziell zu. Sie sind allerdings im gesamten Versuchszeitraum und in allen Varianten als sehr gering (Bereich V) nach Schulz (1997) einzuordnen. Die  $N_{hwl}$ -Gehalte steigen zwischen dem September 2011 und Juli 2012 an und verbleiben dann in etwa auf diesem Niveau. Die Versorgung mit  $P_{DL}$  und  $K_{DL}$  nimmt im Versuchsverlauf zu. Im Juli 2013 liegt eine optimale Versorgung (Gehaltsklasse C) in den Varianten 3x30 BKS15 und 90 BKS15 nach Von Wulffen et al. (2008) vor. Die Variante 3x30 BKS15 weist im Juli 2013 tendenziell die höheren Werte für nahezu alle untersuchten Bodenparameter (Ausnahme  $P_{DL}$ ) auf als die Mineraldüngung und die Variante 90 BKS15.

Der saure pH-Wert des **Braunerde-Podsols** (pH 5,3 Variante MIN) wird durch die BKS-Gabe leicht angehoben. Die einmalige Gabe von 90 t/ha BKS15 bewirkt einen deutlichen Anstieg um 0,8. Die schrittweise Applikation des BKS15 erzeugt einen kontinuierlichen Anstieg des pH-Wertes im Versuchslauf (3x30 BKS15). Der  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalt im Boden sowie das C/N-Verhältnis nehmen mit der BKS-Gabe zu. Allerdings ist der  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalt der Variante 90 BKS15 in den Versuchsjahren 2012 und 2013 gegenüber dem ersten Versuchsjahr 2011 rückläufig. Der Boden der Variante 3x30 BKS15 verzeichnet ansteigende  $C_{org}$ - und stabile  $N_t$ -Gehalte über den gesamten Versuchszeitraum. Die  $C_{hwl}$ -Gehalte sind nach Schulz (1997) im ersten Versuchsjahr in allen Varianten als sehr hoch (Bereich I) einzustufen. Durch die schrittweise Applikati-

on des BKS15 ist in der Variante 3x30 BKS15 ein kontinuierlicher Anstieg des  $C_{\text{hwl}}$ -Gehaltes festzustellen, wohingegen in der Variante 90 BKS15 ein leichter Abfall im letzten Versuchsjahr zu beobachten ist. Die  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte der mineralischen Referenzvariante (MIN) nehmen kontinuierlich ab und sind ab dem Jahr 2012 in den Bereich II (hoch) nach Schulz (1997) einzuordnen. Die BKS-gedüngten Varianten weisen höhere  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte im Boden auf als die mineralisch gedüngte Variante. Die Variante 90 BKS15 weist nach einem Anstieg um 15,5 mg/kg (2011 zu 2012) einen Rückgang um 21,3 mg/kg (2012 zu 2013) des  $N_{\text{hwl}}$ -Gehaltes auf. Die Schwankungen in der Variante 3x30 BKS15 sind etwas verhaltener. Der  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalt der mineralischen Referenzvariante ist mit etwa 2 mg/kg kontinuierlich rückläufig. Im Versuchszeitraum erfolgt eine Aufdüngung mit  $K_{\text{DL}}$  (vgl. Tabelle 24) in allen Varianten. Die mineralische Referenzvariante wird von der Versorgungsstufe A in die Versorgungsstufe B nach Von Wulffen et al. (2008) angehoben. Die Varianten mit BKS-Düngung erreichen in Abhängigkeit von der Applikationsmenge die höheren Gehaltsstufen. Durch die hohe Anfangsgabe des BKS15 von 90 t/ha liegt im ersten Versuchsjahr (90 BKS15) eine deutliche Überversorgung an  $K_{\text{DL}}$  vor (Gehaltsklasse D). Diese wird über den Versuchszeitraum abgebaut. Im Jahr 2013 ist der Braunerde-Podsol der Variante 90 BKS15 in die optimale Versorgungsstufe C nach Von Wulffen et al. (2008) einzuordnen. Die  $K_{\text{DL}}$ -Gehalte der Variante 3x30 BKS15 nehmen kontinuierlich über den Versuchszeitraum zu. Im Jahr 2013 liegt eine deutliche Überversorgung (Versorgungsstufe E) nach Von Wulffen et al. (2008) vor. Der Braunerde-Podsol ist generell nach Von Wulffen et al. (2008) als überversorgt einzustufen (Gehaltsklasse D bzw. E in 2011). Die BKS-Varianten weisen höhere  $P_{\text{DL}}$ -Gehalte auf als die mineralische Referenzvariante. Die Variante 90 BKS15 weist nach der hohen Anfangsgabe von 90 t/ha tendenziell abnehmende  $P_{\text{DL}}$ -Gehalte auf. Hingegen verzeichnet die Variante 3x30 BKS15 mit einer stufenweisen BKS15-Applikation tendenziell zunehmende  $P_{\text{DL}}$ -Gehalte. Eine deutliche Zunahme der  $K_{\text{DL}}$ - und  $P_{\text{DL}}$ -Gehalte im Boden der Variante 3x30 BKS15 ist insbesondere im Versuchsjahr 2013 gegenüber dem Versuchsjahr 2012 zu erkennen. Signifikante Unterschiede innerhalb der Standorte und Termine liegen nicht vor.

Tabelle 82: Chemische Kennwerte der Oberböden Welzow und Braunerde-Podsol in den Lysimetern im Versuchsverlauf (arith. Mittel, SD = Standardabweichung, n = 2)

Termin	Variante	pH		C <sub>org</sub>		N <sub>t</sub>		C/N - Verhältnis	C <sub>hwl</sub> <sup>1)</sup>		N <sub>hwl</sub>		K <sub>DL</sub> <sup>2)</sup>		P <sub>DL</sub> <sup>2)</sup>	
		(CaCl <sub>2</sub> )	SD	[%]	SD	[%]	SD		[mg/kg]	SD	[mg/kg]	SD	[mg/kg]	SD	[mg/kg]	SD
Welzow (W)																
September 2011	MIN	7,5	0,1	0,19	0,04	0,014	0,002	14	75,0 V	7,1	3,2	0,2	9,0 A	1,4	20,0 B	4,2
	3x30 BKS15	7,5	0,1	0,28	0,05	0,018	0,004	16	89,0 V	17,0	5,2	2,0	22,5 A	10,6	22,5 B	2,1
	90 BKS15	7,5	0,0	0,50	0,06	0,032	0,005	16	107,5 V	6,4	7,2	0,1	41,5 B	10,6	32,0 B	0,0
Juli 2012	MIN	7,5	0,0	0,19	0,01	0,013	0,000	15	72,5 V	0,7	7,0	0,0	27,0 A	0,0	26,5 B	4,9
	3x30 BKS15	7,5	0,0	0,47	0,01	0,025	0,001	19	102,5 V	12,0	12,0	1,4	54,0 B	2,8	34,5 B	2,1
	90 BKS15	7,5	0,0	0,51	0,07	0,029	0,003	18	117,0 V	12,7	13,0	1,4	73,0 B	15,6	35,0 B	1,4
Juli 2013	MIN	7,5	0,0	0,21	0,01	0,016	0,002	14	96,1 V	0,4	7,4	0,1	41,0 B	5,7	29,1 B	3,1
	3x30 BKS15	7,5	0,0	0,64	0,11	0,032	0,004	20	146,6 V	10,0	13,3	0,1	95,1 C	5,7	40,5 C	2,1
	90 BKS15	7,5	0,0	0,52	0,07	0,032	0,005	17	143,5 V	22,9	11,5	2,4	93,0 C	8,5	41,5 C	4,9
Braunerde-Podsol (P)																
September 2011	MIN	5,3	0,1	1,54	0,01	0,110	0,000	14	406,0 I	26,9	49,0	2,8	7,0 A	1,4	98,0 D	2,8
	3x30 BKS15	5,6	0,1	1,74	0,10	0,115	0,007	15	448,5 I	37,5	54,5	7,8	53,0 B	15,6	112,0 D	8,5
	90 BKS15	6,1	0,1	2,20	0,45	0,135	0,021	16	520,5 I	37,5	57,0	7,1	186,5 D	17,7	150,5 E	20,5
Juli 2012	MIN	5,3	0,1	1,59	0,13	0,110	0,014	14	325,5 II	19,1	47,0	2,8	28,0 A	2,8	90,0 D	2,8
	3x30 BKS15	5,7	0,1	1,86	0,13	0,125	0,007	15	443,0 I	2,8	64,5	0,7	97,5 C	3,5	99,5 D	2,1
	90 BKS15	5,8	0,0	2,00	0,12	0,130	0,000	15	533,0 I	43,8	72,5	6,4	125,5 D	0,7	120,5 D	21,9
Juli 2013	MIN	5,6	0,1	1,39	0,11	0,096	0,006	15	368,7 II	30,6	45,2	2,5	45,3 B	20,3	106,9 D	11,3
	3x30 BKS15	6,0	0,0	2,16	0,08	0,125	0,007	17	540,0 I	28,6	60,5	9,2	219,4 E	7,6	151,2 E	17,8
	90 BKS15	5,9	0,0	1,90	0,11	0,120	0,000	16	504,0 I	22,6	51,2	3,0	104,5 C	20,3	125,9 E	25,3

<sup>1)</sup> römische Zahlen kennzeichnen die Gehaltsklassen nach Schulz (1997) <sup>2)</sup> Großbuchstaben kennzeichnen die Versorgungsstufen nach Von Wulffen et al. (2008)

Abbildung 82 zeigt die  $N_{\min}$ -Gehalte der Lysimeterböden, die zu Beginn des Frühjahrs und unmittelbar nach der Ernte der Kultur bestimmt wurden. Insbesondere die  $N_{\min}$ -Gehalte des Kippbodens **Welzow** sind als sehr gering einzuordnen. Sie liegen zudem in dem gesamten Versuchszeitraum deutlich unter dem Niveau des Braunerde-Podsols. Die  $N_{\min}$ -Werte des Bodens Welzow liegen zur Frühjahrsbeprobung in der Staffelung MIN < 3x30 BKS15 < 90 BKS15 etwas höher als unmittelbar nach der Ernte. Zur Beprobung nach der Ernte liegen alle Varianten des Bodens Welzow auf einem vergleichbaren Niveau.

Der **Braunerde-Podsol** weist nach der Ernte 2011 in der mineralischen Referenzvariante die höchsten  $N_{\min}$ -Werte auf. Allerdings ist der  $N_{\min}$ -Gehalt dieser Variante im gesamten weiteren Versuchsverlauf tendenziell rückläufig. Zur Frühjahrsbeprobung erfolgt insbesondere in den BKS15-gedüngten Varianten ein Mineralisierungsschub von zusätzlich 23 kg  $N_{\min}$ /ha (90 BKS15) bzw. 12 kg  $N_{\min}$ /ha (3x30 BKS15) gegenüber der Herbstbeprobung 2011. Über den Vegetationszeitraum nehmen die  $N_{\min}$ -Gehalte ab, liegen aber nach der Ernte nach wie vor gestaffelt MIN < 3x30 BKS15 < 90 BKS15 vor. Im Frühjahr 2013 weist die Variante 3x30 BKS15 tendenziell höhere  $N_{\min}$ -Werte auf als die Variante 90 BKS15. Nach der Ernte 2013 pegeln sich die  $N_{\min}$ -Werte aller Varianten auf dem gleichen niedrigen Niveau ein. Signifikante Unterschiede innerhalb der Standorte und Termine liegen nicht vor.

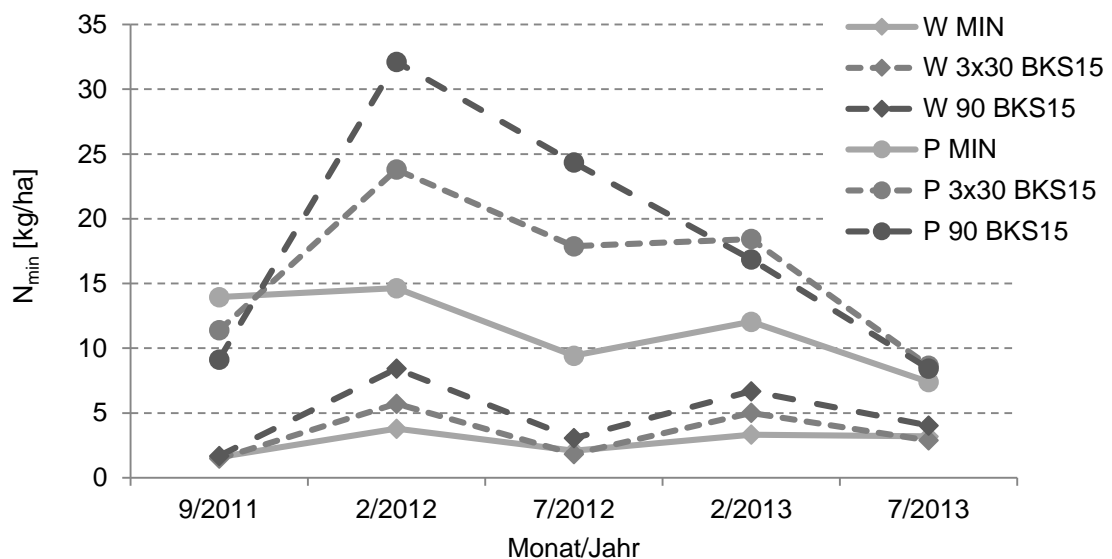


Abbildung 82:  $N_{\min}$ -Werte [kg/ha] des Bodens Welzow (W) und des Braunerde-Podsols (P) im Versuchszeitraum (arith. Mittel, n = 2)



## 4.4.2 Pflanzenaufwuchs

### 4.4.2.1 Entwicklung des Pflanzenaufwuchses

Auf den Lysimetern wurden die Fruchtarten Mais (*Zea mays* L.) im Jahr 2011 und Winterroggen (*Secale cereale* L.) in den Jahren 2011/2012 und 2012/2013 angebaut. Die Entwicklung des Pflanzenaufwuchses auf den Lysimetern mit dem Boden Welzow beschreibt Tabelle 83. In Tabelle 84 ist die Entwicklung des Pflanzenaufwuchses auf den Lysimetern mit der Podsol-Braunerde dargestellt. Zur Erreichung des Zielbestandes von 10 Maispflanzen je Lysimeter im Mai 2011 waren insgesamt zwei Nachsaaten nötig. Der Bestand entwickelte sich im weiteren Vegetationsverlauf gleichmäßig. Die Wuchshöhen zur Ernte waren auf dem Boden Welzow zwischen den Varianten vergleichbar (Tabelle 83). Je ein Lysimeter der Variante 30 BKS15 und 90 BKS15 mit der Podsol-Braunerde hatten einen Bestand von 12 Maispflanzen, der zum Teil durch verzögertes Auflaufen zustande kam. Im Juli bestockten sich zudem einzelne Maispflanzen. Zur Ernte wies der Mais der Variante 30 BKS15 auf der Podsol-Braunerde eine um einen halben Meter geringere Wuchshöhe auf als die Varianten MIN und 90 BKS15 (Tabelle 84).

Im Herbst 2011 trat ein zum Teil starker Verbiss durch Wildtiere an dem Winterroggenbestand der Lysimeter Welzow auf. Im November 2011 wurde eine Fraßschädigung von etwa 40 % der Pflanzen des Bestandes der Variante 90 BKS15 festgestellt. Die anderen Varianten auf dem Boden Welzow waren mit etwa 10 - 20 % weniger stark geschädigt. Im Verlauf des Winters kam es zu einer Reduzierung der Pflanzen. Der Vorwinterbestand betrug durchschnittlich 177 (Welzow) bzw. 198 (Braunerde-Podsol) Pflanzen je Lysimeter. Im März 2012 war der Bestand beider Böden und aller Varianten durch Verbiss leicht geschädigt. Die Fraßschäden wurden im Vegetationsverlauf kompensiert, so dass zur Ernte im Juli 2012 auf beiden Böden ein gleichmäßiger Bestand vorhanden war (Tabelle 83 und Tabelle 84). Die Winterroggenpflanzen auf der Podsol-Braunerde wiesen Halmbruch auf.

Im Anschluss an die Winterroggenernte wurde erneut Winterroggen angebaut. Der Bestand war im Oktober 2012 mit durchschnittlich 105 (Welzow) bzw. 115 (Braunerde-Podsol) Pflanzen je Lysimeter nur etwa halb so stark wie im Vorjahr. Bis zum Frühjahr 2013 reduzierte sich der Bestand. Leichte Fraßschäden waren vor allem an den Varianten des Bodens Welzow zu verzeichnen.

Tabelle 83: Bestandsentwicklung der angebauten Kulturpflanzen Mais und Winterroggen im Versuchszeitraum auf den Lysimetern mit dem Boden Welzow

Datum	MIN <sup>1)</sup>			30 BKS15 <sup>1)</sup>			90 BKS15 <sup>1)</sup>		
	Anzahl <sup>2)</sup>	Höhe [cm]	BBCH	Anzahl <sup>2)</sup>	Höhe [cm]	BBCH	Anzahl <sup>2)</sup>	Höhe [cm]	BBCH
Mais									
08.06.2011	10	n. b.	13/16	10	n. b.	12/16	10	n. b.	13/17
29.06.2011	10	52,5	14/30	10	48,0	14/30	10	48,0	14/32
14.07.2011	10	102,5	15/51	10	113,3	16/51	10	109,0	17/51
20.07.2011	10	129,2	18/61	10	134,0	19/61	10	124,0	19/61
27.07.2011	10	155,0	18/67	10	157,8	31/67	10	144,7	31/67
10.08.2011	10	176,0	18/71	10	180,0	31/71	10	172,5	33/71
01.09.2011	10	185,8	51/83	10	186,0	51/83	10	183,8	51/83
Winterroggen									
18.10.2011	n. b.	3,9	10/12	n. b.	5,0	10/12	n. b.	6,0	10/13
09.11.2011	189	4,9	12/21	180	6,1	12/22	163	5,9	12/22
30.11.2011	n. b.	5,4	13/23	n. b.	6,3	13/24	n. b.	6,9	13/25
14.03.2012	102	3,5	21/25	112	4,5	21/26	111	4,8	21/26
03.05.2012	n. b.	47,2	41/47	n. b.	53,2	41/49	n. b.	54,2	41/51
20.06.2012	n. b.	109,8	73/77	n. b.	118,5	73/77	n. b.	117,7	73/77
09.07.2012	153	n. b.	85/87	142	n. b.	85/87	155	n. b.	85/87
Winterroggen									
11.10.2012	110	5,5	19/25	112	4,6	19/25	94	4,4	19/24
21.11.2012	n. b.	9,2	21/26	n. b.	9,0	21/28	n. b.	8,5	21/29
15.04.2013	81	6,7	25/29	103	7,2	25/29	77	7,0	25/29
16.05.2013	n. b.	92,5	59	n. b.	85,2	59	n. b.	85,3	59
02.07.2013	n. b.	n. b.	77	n. b.	n. b.	77	n. b.	n. b.	77
17.07.2013	328	122,8	85/87	355	121,0	85/87	286	123,5	85/87

<sup>1)</sup> n. b. = nicht bestimmt; <sup>2)</sup> Anzahl der Pflanzen je Lysimeter, zur Winterroggenernte Anzahl der ährentragenden Halme je Lysimeter

Die Winterroggenpflanzen wiesen im April 2013 eine starke Bestockung auf, die stichprobenhaft erfasst wurde. Der Bestand der Podsol-Braunerde wies durchschnittlich neun Bestockungstriebe je Pflanze und der Bestand des Bodens Welzow durchschnittlich acht Bestockungstriebe je Pflanze auf. Unterschiede zwischen den Varianten konnten nicht ausgemacht werden. Die Anzahl der ährentragenden Halme im Juli zeigte die hohe Bestockungsleistung des Winterroggens deutlich an. Auf dem Boden Welzow zeigte sich auch eine Differenzierung der Varianten. Es lagen 355 (30 BKS15), 328 (MIN) und 286 (90 BKS15) ährentragende Halme vor (Tabelle 83). Der Bestand der Podsol-Braunerde hatte sich im Frühjahr etwas stärker bestockt als der Bestand des Bodens Welzow. Im Verlauf des Frühsommers wurde ein Teil der Bestockungstriebe wieder reduziert, so dass nur 270 (90 BKS15), 250 (MIN) und 248 (30 BKS15) ährentragende Halme ertragswirksam wurden (Tabelle 84).

Tabelle 84: Bestandsentwicklung der angebauten Kulturpflanzen Mais und Winterroggen im Versuchszeitraum auf den Lysimetern mit dem Braunerde-Podsol

Datum	MIN <sup>1)</sup>			30 BKS15 <sup>1)</sup>			90 BKS15 <sup>1)</sup>		
	Anzahl <sup>2)</sup>	Höhe [cm]	BBCH	Anzahl <sup>2)</sup>	Höhe [cm]	BBCH	Anzahl <sup>2)</sup>	Höhe [cm]	BBCH
Mais									
08.06.2011	10	n. b.	12/16	11	n. b.	13/17	10	n. b.	13/16
29.06.2011	10	73,8	16/34	11	70,8	16/34	10	66,7	15/35
14.07.2011	10	145,7	17/61	11	137,3	16/61	10	141,8	16/63
20.07.2011	10	170,8	18/63	11	155,7	16/63	11	167,2	18/65
27.07.2011	10	192,5	31/71	11	169,7	18/69	11	183,3	31/69
10.08.2011	10	233,2	63/73	11	183,3	35/71	11	224,0	35/73
01.09.2011	10	237,8	51/83	11	186,2	51/83	11	233,7	51/83
Winterroggen									
18.10.2011	n. b.	5,6	10/13	n. b.	4,9	10/13	n. b.	5,4	10/13
09.11.2011	223	6,8	12/21	201	5,8	13/22	170	6,3	11/21
30.11.2011	n. b.	7,8	13/26	n. b.	9,5	13/25	n. b.	9,5	13/24
14.03.2012	163	5,5	21/29	134	6,8	21/28	118	7,0	21/25
03.05.2012	n. b.	62,6	45/51	n. b.	58,8	45/51	n. b.	58,8	45/51
20.06.2012	n. b.	103,8	71/77	n. b.	91,0	71/77	n. b.	92,7	71/77
09.07.2012	139	n. b.	85/87	130	n. b.	85/87	149	n. b.	85/87
Winterroggen									
11.10.2012	109	5,6	21/24	112	6,4	21/26	123	6,2	21/25
21.11.2012	n. b.	17,7	21/29	n. b.	16,7	21/29	n. b.	13,9	21/29
15.04.2013	91	10,0	25/29	100	11,1	25/29	101	8,2	25/29
16.05.2013	n. b.	94,3	59	n. b.	92,2	59	n. b.	89,3	59
02.07.2013	n. b.	n. b.	75/77	n. b.	n. b.	75/77	n. b.	n. b.	75/77
17.07.2013	250	122,3	85/87	248	124,0	85/87	270	111,7	85/87

<sup>1)</sup> n. b. = nicht bestimmt; <sup>2)</sup> Anzahl der Pflanzen je Lysimeter, zur Winterroggenernte Anzahl der ährentragenden Halme je Lysimeter

#### 4.4.2.2 Erträge

Die Ernte der ersten Versuchskultur Mais (*Zea mays* L.) erfolgte als Ganzpflanze. Die Maiserträge sind in der mineralischen Referenzvariante auf beiden Böden am höchsten (Abbildung 83). Die Ertragsdifferenz auf dem Boden Welzow zwischen der Variante MIN und 90 BKS15 bzw. 3x30 BKS15 ist mit 5,0 bzw. 3,9 t/ha deutlich größer als auf dem Braunerde-Podsol mit 1,7 bzw. 1,0 t/ha. Insgesamt sind die Maiserträge auf dem Kippboden Welzow deutlich geringer als auf dem Braunerde-Podsol. Es liegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten vor.

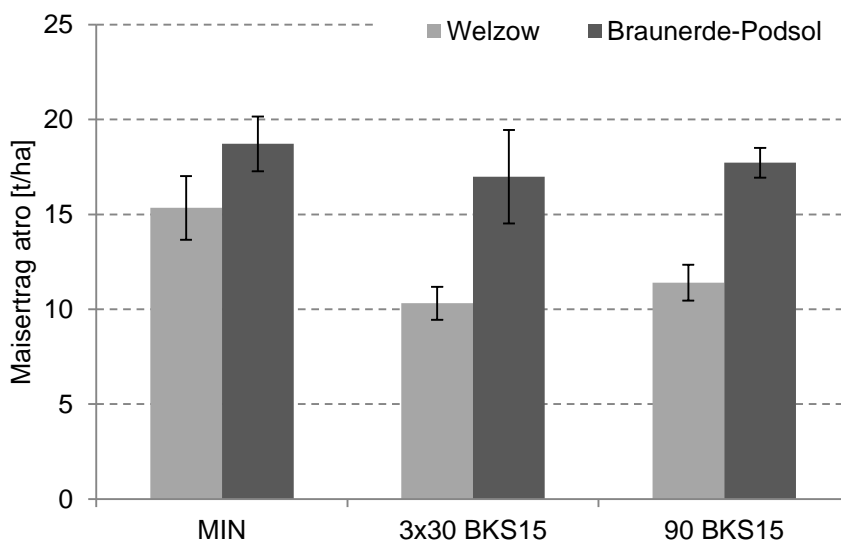


Abbildung 83: Maisertrag (atro) [t/ha] im Jahr 2011 für die Böden Welzow und Braunerde-Podsol (n = 2, arith. Mittel  $\pm$  SD)

Nach einer erneuten BKS-Gabe in Höhe von 30 t/ha BKS15 (3x30 BKS15) zur Winterroggenaussaat im Herbst 2011 verzeichnet diese Variante im Jahr 2012 geringe Mehrerträge an Korn und Stroh gegenüber der mineralischen Referenzvariante (MIN) auf dem Boden Welzow (Abbildung 84). Die Korn- und Stroherträge der Variante 90 BKS15 sind höher als die der Varianten MIN und 3x30 BKS15. Die Korn- und Stroherträge auf dem Braunerde-Podsol sind deutlich geringer. Die Variante MIN und 3x30 BKS15 erzielen vergleichbare Erträge. Der Kornertrag fällt in der Variante 3x30 BKS tendenziell geringer aus als in der Variante MIN. Dafür ist der Strohertrag der Variante MIN tendenziell geringer als der der Variante 3x30 BKS15. Die Variante 90 BKS15 weist deutliche Mindererträge von 11,8 (Korn) bzw. 6,6 (Stroh) dt/ha gegenüber der mineralisch gedüngten Variante auf.

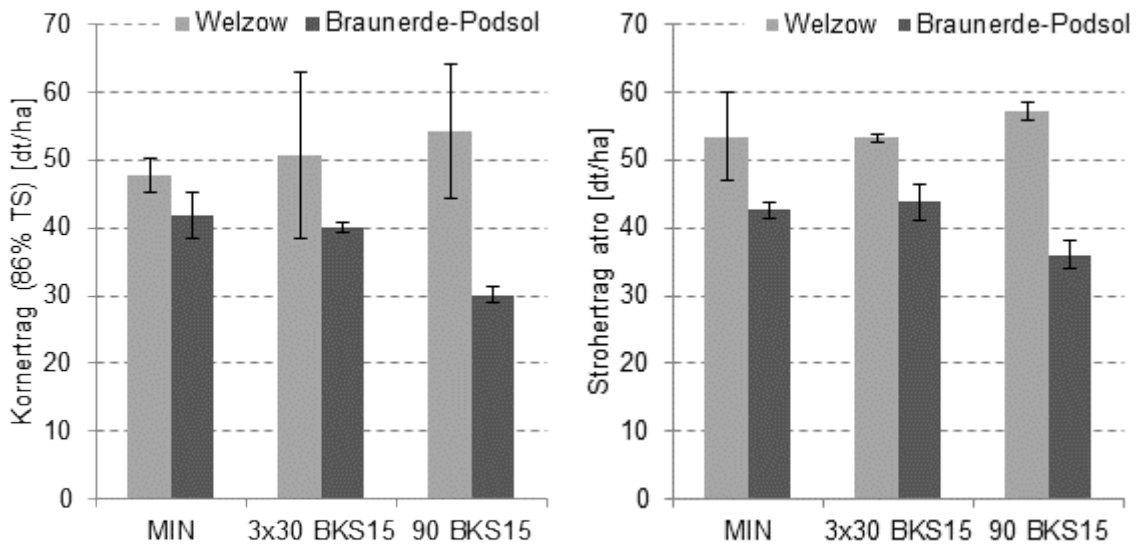


Abbildung 84: Winterroggen-Kornertrag (86 %TS) (links) und Strohertrag (atro) (rechts) [dt/ha] im Jahr 2012 für die Böden Welzow und Braunerde-Podsol (n = 2, arith. Mittel ± SD)

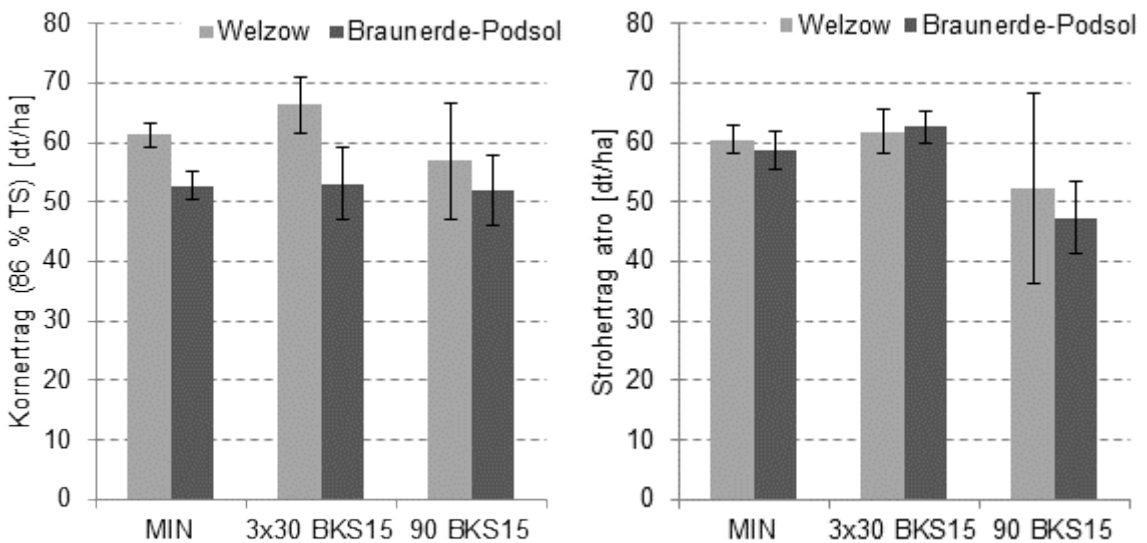


Abbildung 85: Winterroggen-Kornertrag (86 %TS) (links) und Strohertrag (atro) (rechts) [dt/ha] im Jahr 2013 für die Böden Welzow und Braunerde-Podsol (n = 2, arith. Mittel ± SD)

Im Jahr 2013 fallen auch auf dem Boden Welzow die Korn- und Stroherträge um 4,3 bzw. 8,2 dt/ha in der Variante 90 BKS15 gegenüber der mineralisch gedüngten Variante ab (Abbildung 85). Die gestaffelte BKS-Gabe (Variante 3x30 BKS15) hingegen erzielt einen Ertragszuwachs von 5,0 (Korn) bzw. 1,4 (Stroh) dt/ha gegenüber der mineralisch gedüngten Variante (MIN). Die Kornerträge der BKS-Varianten auf dem Braunerde-Podsol gleichen sich der mineralischen Referenzvariante an. So weist die Varien-

te 3x30 BKS15 einen tendenziellen Mehrertrag von 0,4 dt/ha und die Variante 90 BKS15 einen tendenziellen Minderertrag von 0,8 dt/ha gegenüber der mineralisch gedüngten Variante (MIN) auf. Die Unterschiede zwischen den Stroherträgen bleiben auch auf dem Braunerde-Podsol deutlicher. Die Variante 3x30 BKS15 weist einen Mehrertrag von 4,0 dt/ha und die Variante 90 BKS15 einen Minderertrag von 8,2 dt/ha gegenüber der mineralisch gedüngten Variante (MIN) auf.

#### **4.4.2.3 Gehalte und Entzüge**

Die N-Gehalte im Biomasseaufwuchs des Maises und Winterroggens (Korn und Stroh) auf dem Boden Welzow liegen im gesamten Versuchsverlauf auf einem deutlich geringen Niveau als auf dem Braunerde-Podsol (Tabelle 85). Die Variante MIN weist in den Jahren 2011 und 2012 die höchsten N-Gehalte auf. In 2013 sind die N-Gehalte in den BKS-Varianten bei Korn (90 BKS15) und Stroh (3x30 BKS15) höher als in der mineralisch gedüngten Variante (MIN). Die P- und K-Gehalte in dem Maisaufwuchs und Winterroggen-Korn auf dem Boden Welzow weisen in dem Versuchszeitraum folgende Staffelung auf: MIN < 3x30 BKS15 < 90 BKS15. Die Analyse des Winterroggen-Strohs 2013 ergibt die höchsten P-Gehalte in der Variante 3x30BKS15 und die geringsten in der Variante MIN. Die höchsten K-Gehalte im Winterroggen-Stroh liegen in der Variante MIN und die geringsten in der Variante 90 BKS15 vor. Die N- und P-Gehalte des Maises sowie des Winterroggens (Korn und Stroh) unterschreiten die jeweiligen durchschnittlichen N- und P-Gehalte nach Von Wulffen et al. (2008). Lediglich die K-Gehalte in der Variante 90 BKS15 von dem Mais und dem Winterroggen-Korn (Jahre 2012 und 2013) sowie das Winterroggen-Stroh (2013) in allen Varianten erreichen die jeweiligen durchschnittlichen Gehalte nach Von Wulffen et al. (2008).

Die höchsten N-Gehalte im Maisaufwuchs in 2011 auf dem Braunerde-Podsol liegen in der Variante MIN vor. Ab dem Jahr 2012 weisen die BKS-Varianten höhere N-Gehalte auf als die mineralisch gedüngte Variante (MIN < 3x30 BKS15 < 90 BKS15). Die Differenz der N-Gehalte zwischen den BKS-Varianten ist 2013 geringer als 2012. Der P-Gehalt der BKS-Varianten im Maisaufwuchs ist im Jahr 2011 identisch und geringer als in der mineralischen Referenzvariante. Im Folgejahr weist der Kornertrag (Winterroggen) der mineralisch gedüngten Variante die höchsten und die Variante 90 BKS15 die geringsten P-Gehalte auf. Der erneute Anbau von Winterroggen im Jahr 2013 weist die P-Gehalte im Korn in folgender Staffelung auf: Korn 3x30 BKS15 < MIN < 90 BKS15. Im Winterroggen-Stroh ist der P-Gehalt der Variante 90 BKS15 ebenfalls am höchsten. Jedoch ist der P-Gehalt der Variante MIN geringer als in der Variante 3x30 BKS15. Die höchsten K-Gehalte im Maisaufwuchs liegen in der Variante 90 BKS15 und die geringsten in der Variante MIN vor. Im Folgejahr ist der P-Gehalt im Winterroggen-Korn

der Variante MIN am höchsten und in der Variante 90 BKS15 am geringsten. Die K-Gehalte in dem Winterroggen-Korn des Jahres 2013 sind in der Variante 90 BKS15 am höchsten und in der Variante 3x30 BKS15 am geringsten. Der Strohaufwuchs desselben Jahres weist die geringsten K-Gehalte in der mineralisch gedüngten Variante (MIN) und die höchsten in der dreimalig mit BKS gedüngten Variante (3x30 BKS15) auf. Die N-Gehalte des Winterroggen-Korns (2012 und 2013) der Variante 90 BKS15 sowie das Winterroggen-Stroh (2013) aller Varianten erreichen die jeweiligen durchschnittlichen Gehalte nach Von Wulffen et al. (2008). Die P-Gehalte der Erntegüter unterschreiten die jeweiligen durchschnittlichen P-Gehalte nach Von Wulffen et al. (2008). Die K-Gehalte im Maisaufwuchs der Variante 90 BKS15, im Winterroggen-Korn der Variante MIN (2012 und 2013) sowie der Variante 90 BKS15 (2013) und im Winterroggen-Stroh der BKS-Varianten erzielen das Niveau der durchschnittlichen K-Gehalte nach Von Wulffen et al. (2008). Es liegen keine Signifikanzen zwischen den Varianten vor.

Tabelle 85: N-, P- und K-Gehalte im Pflanzenaufwuchs der Lysimeter im Versuchverlauf 2011 - 2013 für die Böden Welzow und Braunerde-Podsol (n = 2, arith. Mittel; SD)

Variante	Welzow						Braunerde-Podsol					
	N		P		K		N		P		K	
	[%]	SD	[g/kg]	SD	[g/kg]	SD	[%]	SD	[g/kg]	SD	[g/kg]	SD
September 2011 - Mais												
MIN	0,85	0,17	1,40	0,03	8,35	0,75	1,25	0,01	1,84	0,11	7,06	0,03
3x30 BKS15	0,65	0,07	1,47	0,27	12,22	0,30	0,98	0,03	1,72	0,10	9,69	1,12
90 BKS15	0,71	0,08	1,84	0,08	14,28	0,97	1,00	0,03	1,72	0,09	13,95	0,57
Juli 2012 - Winterroggen-Korn												
MIN	1,58	0,11	2,91	0,05	4,89	0,03	2,01	0,13	3,56	0,16	6,27	0,05
3x30 BKS15	1,39	0,03	3,28	0,01	5,57	0,20	2,11	0,04	3,41	0,98	5,62	1,12
90 BKS15	1,50	0,03	3,57	0,09	6,28	0,17	2,50	0,07	3,04	0,04	5,03	0,07
Juli 2013 - Winterroggen-Korn												
MIN	1,48	0,03	3,03	0,11	5,47	0,42	1,60	0,03	3,55	0,04	5,83	0,33
3x30 BKS15	1,41	0,05	3,28	0,24	5,74	0,09	1,71	0,11	3,47	0,17	5,59	0,23
90 BKS15	1,54	0,20	3,40	0,18	6,27	0,75	1,78	0,08	3,75	0,13	6,19	0,23
Juli 2013 - Winterroggen-Stroh												
MIN	0,42	0,10	0,48	0,04	16,65	1,48	0,59	0,14	1,12	0,16	11,95	0,07
3x30 BKS15	0,51	0,05	0,78	0,23	16,35	0,78	0,63	0,11	1,21	0,16	16,60	0,42
90 BKS15	0,48	0,00	0,74	0,13	14,75	0,49	0,66	0,07	1,39	0,21	16,10	1,27

Tabelle 86 zeigt die N-, P- und K-Entzüge mit der Biomasse in dem Versuchszeitraum 2011 bis 2013. Insbesondere im ersten Versuchsjahr lagen die N-Entzüge mit der Mais-Biomasse des Braunerde-Podsols um etwa 100 kg N/ha höher als auf dem Boden Welzow. Auch die P- und K-Entzüge sind in diesem Jahr auf dem Braunerde-Podsol deutlich höher als auf dem Boden Welzow. In den Jahren 2012 und 2013 sind die Entzüge zwischen den Varianten und beiden Böden vergleichbar. Im Jahr 2013 fällt die Variante 3x30 BKS15 mit den höchsten N-, P- und K-Entzügen auf dem Boden Welzow auf, da in den Vorjahren die Entzüge dieser Variante am geringsten waren. Auf dem Braunerde-Podsol ist dieser Effekt nicht zu beobachten. Auch sind die K-Entzüge mit dem Winterroggen-Korn (2013) auf dem Boden Welzow höher als auf dem Braunerde-Podsol. Die Nährstoffentzüge (N, P, tendenziell auch K) mit dem Stroh (2013) hingegen sind auf dem Boden Welzow geringer als auf dem Braunerde-Podsol.



Tabelle 86: N-, P- und K-Entzüge mit dem Pflanzenaufwuchs der Lysimeter im Versuchsverlauf 2011 - 2013 für die Böden Welzow und Braunerde-Podsol (n = 2, arith. Mittel; SD)

Variante	Welzow						Braunerde-Podsol					
	N		P		K		N		P		K	
	[kg/ha]	SD	[kg/kg]	SD	[kg/kg]	SD	[kg/ha]	SD	[kg/kg]	SD	[kg/kg]	SD
September 2011 - Mais												
MIN	128,26	12,02	21,39	1,88	127,47	2,55	233,76	19,34	34,58	4,63	132,22	10,70
3x30 BKS15	67,18	12,64	15,32	4,01	125,89	7,44	166,11	29,08	29,27	6,01	163,29	4,96
90 BKS15	80,71	2,82	20,94	0,86	163,28	24,60	177,90	2,02	30,52	2,87	246,94	0,86
Juli 2012 - Winterroggen-Korn												
MIN	66,05	8,30	12,20	0,86	20,44	1,00	73,80	1,13	13,12	1,65	23,07	2,08
3x30 BKS15	62,12	16,42	14,61	3,58	24,89	6,91	74,13	0,11	11,93	3,21	19,69	3,57
90 BKS15	71,26	14,19	17,01	3,52	29,77	4,64	66,02	0,66	8,03	0,40	13,30	0,67
Juli 2013 - Winterroggen-Korn												
MIN	79,79	4,41	16,25	0,07	29,38	1,30	74,14	1,93	16,41	0,54	26,95	0,33
3x30 BKS15	82,15	2,87	19,14	2,72	33,39	2,85	79,18	3,95	16,12	1,09	25,97	1,93
90 BKS15	76,18	3,38	16,93	2,02	31,01	1,60	80,62	5,49	17,03	1,34	28,12	2,15
Juli 2013 - Winterroggen-Stroh												
MIN	25,47	6,93	2,91	0,37	100,47	4,98	34,60	9,88	6,59	1,27	70,05	4,20
3x30 BKS15	31,52	0,95	4,78	1,11	101,25	10,80	39,35	5,13	7,55	0,65	103,83	1,75
90 BKS15	24,96	7,68	3,95	1,89	76,71	21,18	31,26	7,33	6,62	1,82	76,58	15,86

### 4.4.3 Sickerwasser

#### 4.4.3.1 Sickerwasseraufkommen

Abbildung 86 zeigt den monatlichen Niederschlag und den Sickerwasseraustrag der Lysimeter im betrachteten Versuchszeitraum. Die Jahresniederschläge in der Lysimeterstation Grünewalde betragen im Versuchszeitraum 585 mm (2011), 675 mm (2012) und 640 mm (2013) und liegen damit immer über dem langjährigen Mittel von 568 mm (DWD-Station Cottbus, 1981 - 2010). Allerdings zeigt sich in dem Versuchszeitraum die Tendenz zu geringen Niederschlägen im Frühjahr und Vorsommer. In den Sommermonaten treten häufig höhere Niederschläge in Form von plötzlichen Starkregenereignissen auf. Erhöhte Sickerwasserraten treten vor allem in dem ersten Jahresquartal sowie im Dezember des Jahres 2012 auf. Im Jahresverlauf nehmen die Sickerwasserraten tendenziell ab. Im Zeitraum August 2012 bis November 2012 fand kein (Welzow, Abbildung 86 oben) bzw. ein sehr geringer (Braunerde-Podsol, Abbildung 86 unten) Sickerwasseraustrag statt. Der Braunerde-Podsol wies im gesamten Versuchszeitraum tendenziell höhere Sickerwasserraten auf als der Kipprohboden Welzow. Die erhobenen Daten werden entsprechend der Bedeckung mit der jeweiligen Kulturpflanze in drei Perioden (I: 06/2011 - 09/2011, II: 10/2011 - 07/2012, III: 08/2012 - 07/2013) für die statistische Auswertung zusammengefasst und sind in den Abbildungen kenntlich gemacht. Die summierten Sickerwassermengen des Bodens Welzow für den gesamten Versuchszeitraum für die einzelnen Tiefenstufen der Varianten betragen: MIN: 510,83 mm (SD = 18,45 mm), 3x30 BKS15: 480,79 mm (SD = 19,18 mm), 90 BKS15: 495,70 mm (SD = 30,50 mm). Die Sickerwasserausträge des Bodens Welzow in der Variante 3x30 BKS15 sind über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet signifikant geringer als die Sickerwasserausträge der Variante MIN (Anhang 3.1). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 3.2 zu entnehmen.

Die summierten Sickerwassermengen des Braunerde-Podsols für den gesamten Versuchszeitraum für die einzelnen Tiefenstufen der Varianten betragen: MIN: 528,94 mm (SD = 5,04 mm), 3x30 BKS15: 537,90 mm (SD = 8,67 mm), 90 BKS15: 556,39 mm (SD = 11,73 mm). Die Sickerwasserausträge des Braunerde-Podsols in der Variante 3x30 BKS15 sind über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet signifikant geringer als die Sickerwasserausträge der Variante 90 BKS15 (Anhang 3.23). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 3.24 zu entnehmen.

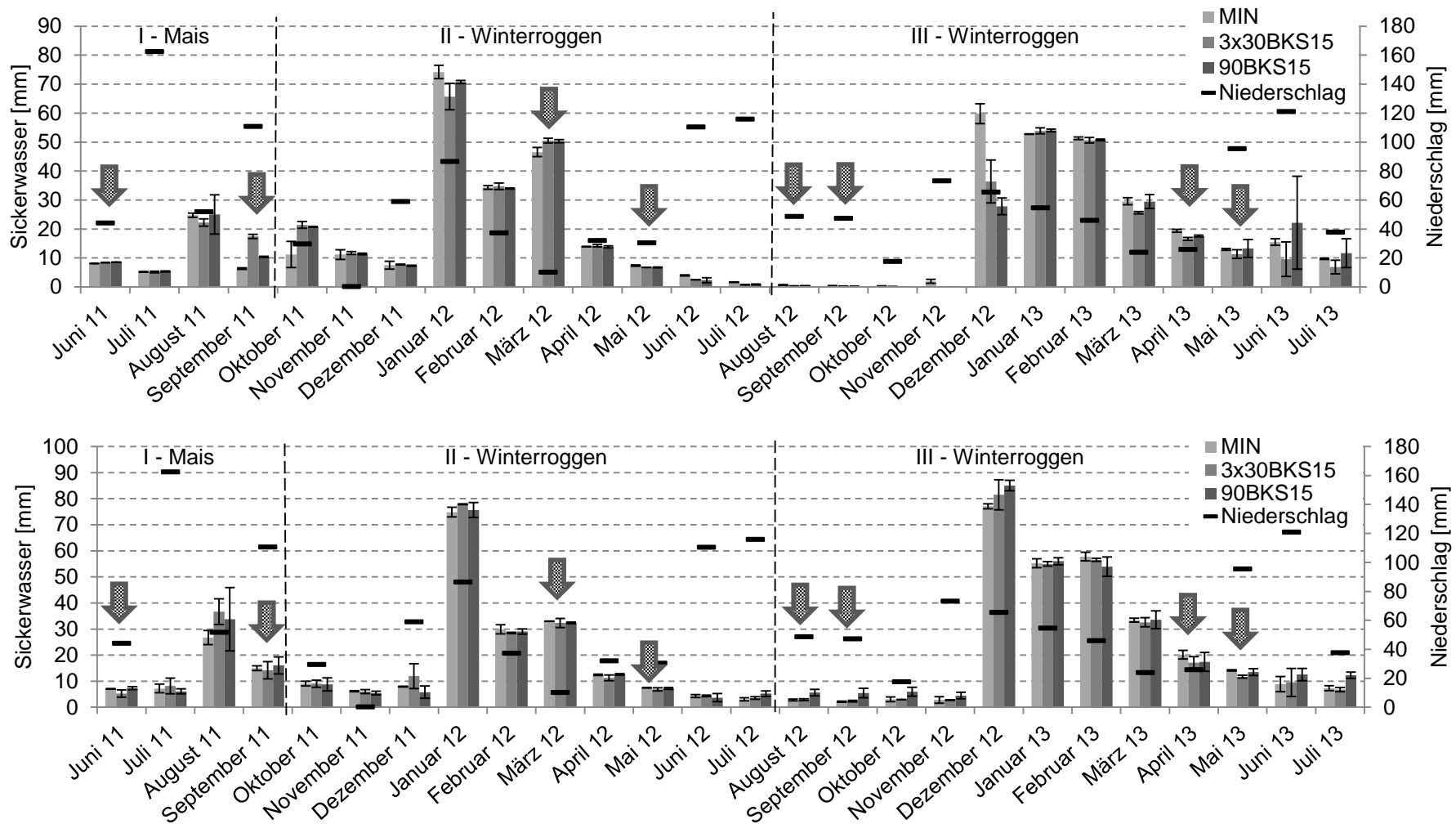


Abbildung 86: Sickerwasseraustrag und erfasster Niederschlag der Lysimeter Welzow (oben) und Braunerde-Podsol (unten) im Versuchszeitraum von 06/2011 bis 07/2013 (n = 2, arith. Mittel mit Standardabweichung, Pfeile markieren Düngergaben)

#### 4.4.3.2 Sickerwasserqualität der Lysimeter Welzow und Braunerde-Podsol

Der **pH-Wert** der Variante MIN im Sickerwasser des Bodens **Welzow** ist in den ersten beiden Perioden mit 4,5 - 7 leicht sauer bis sauer einzuordnen (Abbildung 87, oben). Erst in der Periode III ab dem Januar 2013 steigt der pH-Wert im Sickerwasser der Variante MIN in den neutralen Bereich. Die BKS-Varianten weisen im gesamten Versuchszeitraum einen relativ neutralen pH-Wert (6 - 8,5), der sowohl in den leicht sauren als auch in den leicht basischen Bereich schwankt. Im Oktober und November 2012 war nicht genügend Sickerwasser für eine Analyse der Parameter verfügbar. Über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet weisen die Varianten 3x30 BKS15 und 90 BKS15 signifikant höhere pH-Werte auf als die Variante MIN (Anhang 3.3). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 3.4 zu entnehmen.

Die pH-Werte in dem Sickerwasser des **Braunerde-Podsols** liegen im gesamten Versuchszeitraum im leicht basischen Bereich um 8 (Abbildung 87, unten). Zum Ende der Periode I steigt der pH-Wert der Variante 3x30 BKS15 leicht an, während der pH-Wert der Variante MIN tendenziell abfällt. Im Verlauf der Periode II und der ersten Hälfte der Periode III schwankt der pH-Wert aller Varianten nur geringfügig zwischen 7,5 und 8. Ab März 2013 steigt der pH-Wert auf über 8 an, wobei der Anstieg bei der Variante 90 BKS15 um etwa einen Monat verzögert ist. Über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet treten aufgrund des ähnlichen pH-Niveaus keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten auf (Anhang 3.25). Lediglich in der Periode III liegt ein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten MIN und 90 BKS15 vor (Anhang 3.26).

Die **elektrische Leitfähigkeit** (elektr. LF) des Sickerwassers im Versuchsverlauf für den Boden **Welzow** ist in Abbildung 88 (oben) dargestellt. Die Variante MIN weist im gesamten Versuchszeitraum die höchste elektrische Leitfähigkeit (Ausnahme Juni und Juli 2013) auf. In der Periode I sowie in der Periode II bis zum Dezember 2011 liegt die elektrische Leitfähigkeit der Variante MIN (0,6 mS/cm) deutlich über den Werten der BKS-Varianten (0,35 - 0,4 mS/cm). Im weiteren Verlauf der zweiten Periode pegelt sich die elektrische Leitfähigkeit der Variante MIN bei etwa 0,45 mS/cm ein. Die Variante 90 BKS15 weist eine etwas höhere elektrische Leitfähigkeit auf als die Variante 3x30 BKS15. Zudem verzeichnet die Variante 90 BKS15 zwei kleine Peaks in der Periode II im Oktober 2011 und im Juni 2012. In der Periode III treten im Oktober und November 2012 erhöhte Werte der elektrischen Leitfähigkeit für die Variante MIN auf. Zu diesen Terminen sind allerdings die Sickerwasserraten sehr gering. Im Juni und Juli 2013 sind die Werte der Variante 90 BKS15 erstmals höher als die der Variante MIN. Die elektri-

sche Leitfähigkeit der Variante MIN ist über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet signifikant höher als die elektrische Leitfähigkeit der Variante 3x30 BKS15 (Anhang 3.5). Die Variante 3x30 BKS15 weist zudem eine signifikant geringere elektrische Leitfähigkeit auf als die Variante 90 BKS15 (Anhang 3.5). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 3.6 zu entnehmen.

Die elektrische Leitfähigkeit im Sickerwasser des **Braunerde-Podsols** (Abbildung 88 unten) nimmt in der Periode I und III tendenziell ab und in der Periode II tendenziell zu. In den ersten beiden Perioden weist die Variante 3x30 BKS15 wie auch auf dem Boden Welzow die geringsten elektrischen Leitfähigkeiten auf. Die Varianten MIN und 90 BKS15 verzeichnen in den ersten beiden Perioden die höchsten Werte für die elektrische Leitfähigkeit auf. Zu Beginn der Periode III (bis November 2012) sind die Werte für die elektrische Leitfähigkeit der Variante MIN am höchsten. Sie sinken im Dezember 2012 deutlich ab und liegen im weiteren Vegetationsverlauf bis zum Mai 2013 unter dem Niveau der BKS-Varianten. In der Periode III, insbesondere von Dezember 2012 bis Mai 2013, sind die Werte für die elektrische Leitfähigkeit der Variante 3x30 BKS15 auf dem mittleren bzw. höchsten Niveau, da die Variante MIN und 90 BKS15 tendenziell abnehmende Werte aufweisen. Über den gesamten Versuchszeitraum liegen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten MIN und 90 BKS15 sowie zwischen den Varianten 3x30 BKS15 und 90 BKS15 vor (Anhang 3.27). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 3.28 zu entnehmen.

In dem Sickerwasser des Bodens **Welzow** können im gesamten Versuchszeitraum tendenziell höhere **NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen** in der Mineraldüngervariante als in den BKS-Varianten festgestellt werden (Abbildung 89 oben). Allerdings liegen die Konzentrationen im gesamten Versuchszeitraum bei etwa 5 mg/l und darunter. Eine Ausnahme bildet ein Peak der Mineraldüngervariante im Oktober und November 2012, wo im Mittel NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen von 14 und 9,5 mg/l festgestellt werden. Zu diesen Terminen gibt es allerdings keine nennenswerten Sickerwassermengen (s. Abbildung 86). Die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen unterschreiten im gesamten Versuchszeitraum den NO<sub>3</sub>-N-Grenzwert von 50 mg/l (EG, 1991; TrinkwV, 2001) deutlich. Die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen der Variante MIN sind über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet signifikant höher als die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen der Variante 3x30 BKS15 (Anhang 3.7). Die Variante 3x30 BKS15 weist zudem signifikant geringere NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen auf als die Variante 90 BKS15 (Anhang 3.7). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 3.8 zu entnehmen. Der **Braunerde-Podsol** hingegen weist im gesamten Versuchszeitraum deutlich höhere NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen im Sickerwasser auf (Abbildung 89 unten) als der Boden

Welzow. Die mittleren  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen der Periode I (06/2011 - 09/2011) liegen bei 9,6 mg/l MIN, 12,2 mg/l 3x30 BKS15 und 13,9 mg/l 90 BKS15. Im Januar 2012 in der Periode II steigen die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen aller Varianten auf etwa 20 mg/l an. Im weiteren Verlauf der Vegetationsperiode ist das Niveau der  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen der Variante 90 BKS15 im Mittel um etwa 5 mg/l höher als die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen der Varianten MIN und 3x30 BKS15. Auch in der Periode III weist die Variante 90 BKS15 erhöhte  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen auf. Diese liegen im Mittel um 11,8 mg  $\text{NO}_3\text{-N/l}$  über der Konzentration der Variante MIN bzw. um 6,1 mg  $\text{NO}_3\text{-N/l}$  über der Konzentration der Variante 3x30 BKS15. Im Vergleich zur Periode I haben die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen im Versuchszeitraum um 4,4 mg/l MIN, 7,5 mg/l 3x30 BKS15 und 11,9 mg/l 90 BKS15 zugenommen. Die festgestellten  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen im Sickerwasser aller Varianten liegen im gesamten Versuchszeitraum unterhalb des  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Grenzwertes von 50 mg/l (EG, 1991; TrinkwV, 2001). Alle Varianten unterscheiden sich über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet signifikant voneinander (Anhang 3.29). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 3.30 zu entnehmen.

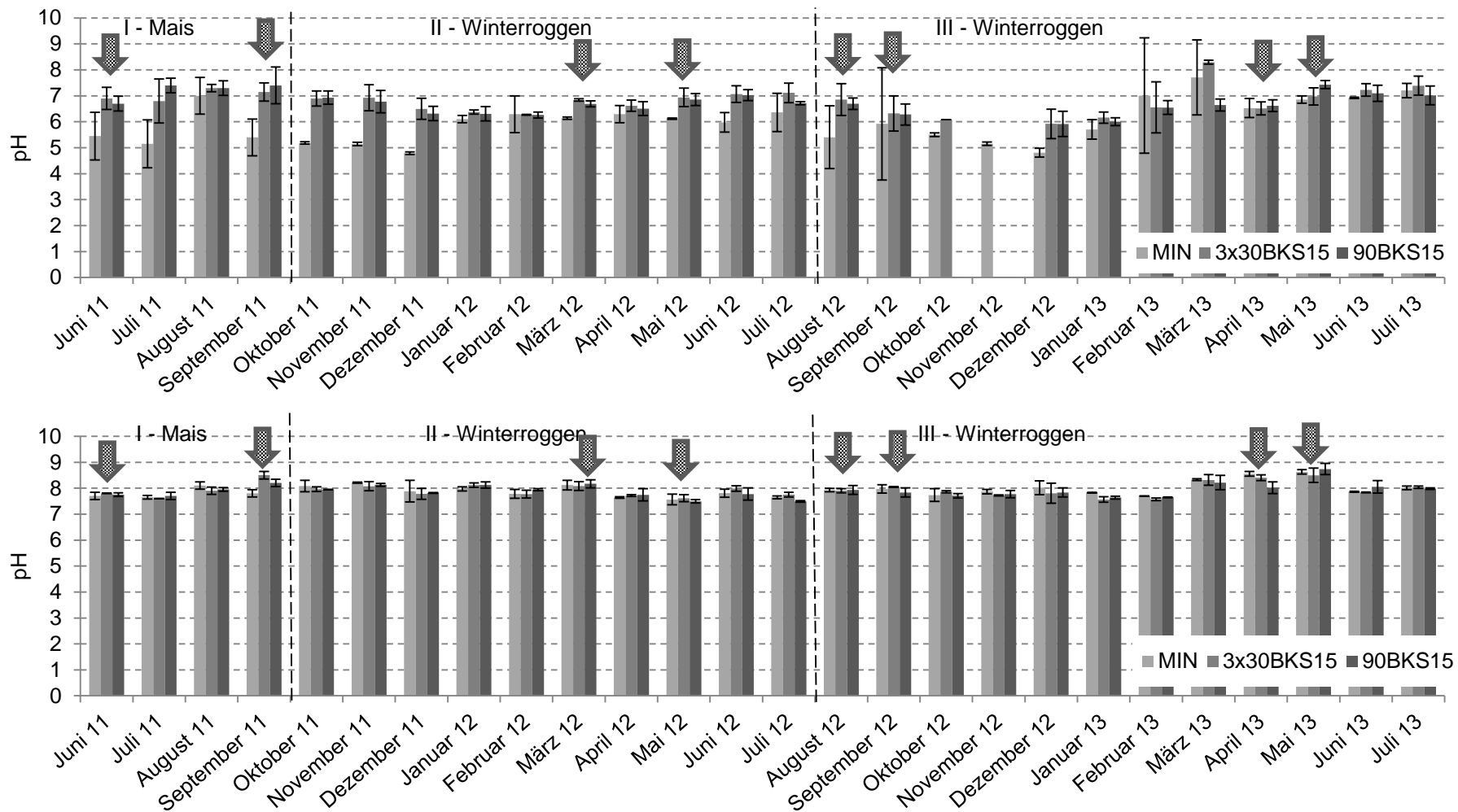


Abbildung 87: pH-Werte im Sickerwasser der Lysimeter Welzow (oben) und Braunerde-Podsol (unten) im Versuchszeitraum von 06/2011 bis 07/2013 (n = 2, arith. Mittel mit Standardabweichung, Pfeile markieren Düngergaben)

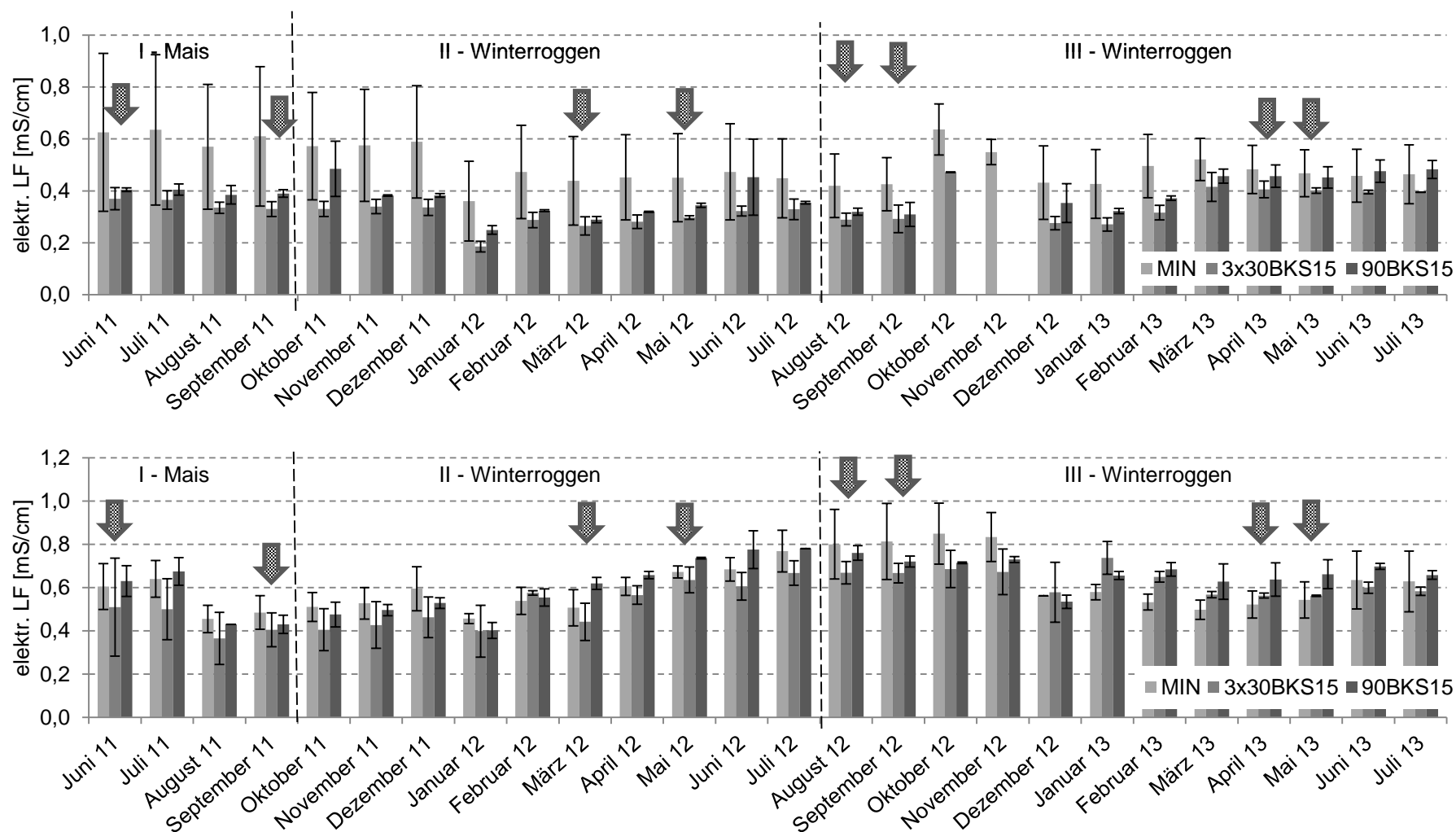


Abbildung 88: Elektrische Leitfähigkeit im Sickerwasser der Lysimeter Welzow (oben) und Braunerde-Podsol (unten) im Versuchszeitraum von 06/2011 bis 07/2013 (n = 2, arith. Mittel mit Standardabweichung, Pfeile markieren Düngergaben)



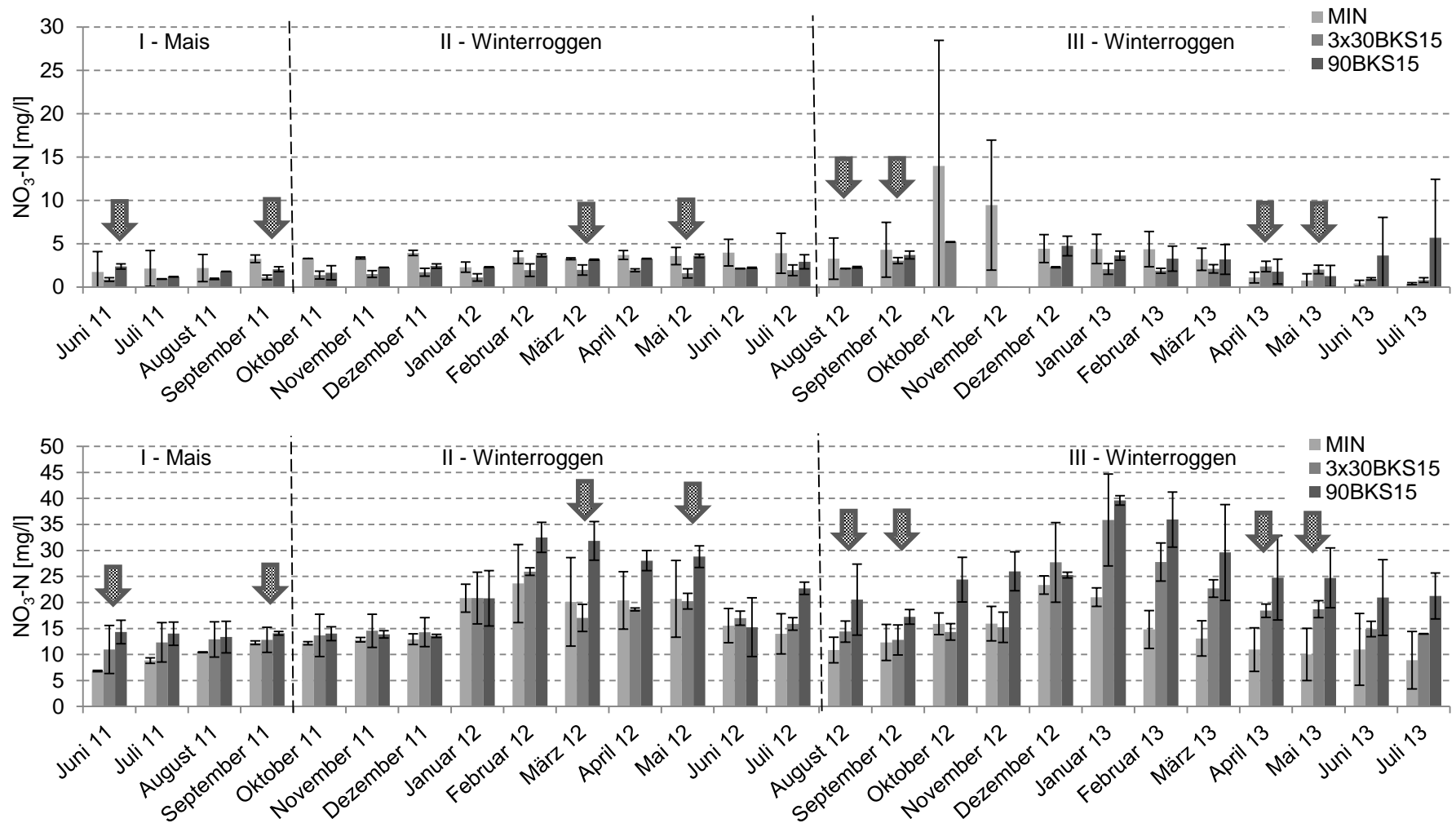


Abbildung 89: NO<sub>3</sub>-N-Konzentration im Sickerwasser der Lysimeter Welzow (oben) und Braunerde-Podsol (unten) im Versuchszeitraum von 06/2011 bis 07/2013 (n = 2, arith. Mittel mit Standardabweichung, Pfeile markieren Düngergaben)

Tabelle 87: Konzentrationen des gesamten und gelösten organischer Kohlenstoffs (TOC/DOC) mit dem Sickerwasser in dem Boden Welzow (n = 2, arith. Mittel; SD)

Termin	Periode	TOC [mg/l] <sup>1)</sup>						DOC [mg/l] <sup>2)</sup>					
		MIN	SD	3x30 BKS15	SD	90 BKS15	SD	MIN	SD	3x30 BKS15	SD	90 BKS15	SD
Juni 2011	I	5,22	1,19	4,76	n. b.	5,38	0,25	4,50	0,69	4,74	n. b.	5,39	0,19
Juli 2011		6,22	1,75	6,46	n. b.	5,73	0,28	4,82	1,04	5,64	n. b.	5,64	0,35
August 2011		4,85	0,78	5,70	n. b.	4,90		4,05	0,07	4,00	n. b.	4,00	n. b.
September 2011		4,90	0,71	5,40	n. b.	5,95	0,64	3,95	0,49	4,60	n. b.	4,60	0,85
Oktober 2011	II	3,50	0,57	3,20	0,85	5,10	1,13	3,60	0,42	3,35	0,78	3,70	0,42
November 2011		3,50	0,42	3,30	0,85	4,25	0,35	3,35	0,35	3,30	0,85	3,90	2,26
Dezember 2011		3,40	0,85	3,40	0,14	4,10	0,85	3,10	0,57	3,45	0,21	3,95	0,49
Januar 2012		1,75	0,07	1,75	0,35	2,75	0,92	1,90	0,14	1,80	0,42	2,70	0,57
Februar 2012		2,90	0,14	2,85	0,49	3,20	0,57	2,75	0,07	2,65	0,49	3,20	0,57
März 202012		2,70	0,14	3,30	0,71	3,60	0,57	2,65	0,07	3,50	0,42	3,90	0,71
April 2012		3,10	n. b.	3,70	n. b.	3,95	1,06	2,25	0,21	2,90	0,85	3,20	0,71
Mai 2012		3,55	0,49	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	2,85	0,49	2,35	0,78	2,65	0,78
Juni 2012		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	3,82	0,09	3,73	0,59	5,13	0,46
Juli 2012		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	5,03	0,31	3,88	0,12	5,53	0,48
August 2012		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	3,92	0,80	4,90	1,25	5,50	0,31
September 2012		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	5,21	1,05	5,30	0,34	6,64	0,38
Oktober 2012		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	8,22	6,05	7,62	n. b.	n. b.	n. b.
November 2012	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	4,76	1,69	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
Dezember 2012	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	2,54	0,07	2,94	0,72	4,04	0,94	
Januar 2013	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	2,11	0,07	2,57	0,39	3,16	0,44	
Februar 2013	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	3,30	0,24	3,26	0,17	3,97	0,42	
März 2013	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	2,87	0,11	2,98	0,95	3,59	0,63	
April 2013	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	2,90	0,10	3,09	0,38	3,53	0,38	
Mai 2013	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	3,05	0,28	3,29	0,35	4,29	0,79	
Juni 2013	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	2,92	0,07	3,39	0,66	3,83	0,75	
Juli 2013	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	4,05	0,48	3,99	0,88	4,36	0,95	

<sup>1)</sup> n. b. = nicht bestimmt; <sup>2)</sup> ab Juni 2012 Bestimmung als NPOC(D)

Tabelle 88: Konzentrationen des gesamten gebundenen Stickstoffs (TN<sub>b</sub>) und nach Mikrofiltration (DN<sub>b</sub>) mit dem Sickerwasser in dem Boden Welzow (n = 2, arith. Mittel; SD)

Termin	Periode	TN <sub>b</sub> [mg/l] <sup>1)</sup>						DN <sub>b</sub> [mg/l]					
		MIN	SD	3x30 BKS15	SD	90 BKS15	SD	MIN	SD	3x30 BKS15	SD	90 BKS15	SD
Juni 2011	I	3,20	n. b.	0,65	0,07	2,15	0,35	1,73	2,09	0,70	0,14	2,30	0,28
Juli 2011		1,85	1,77	0,65	0,07	1,95	0,07	2,00	1,98	0,65	0,07	2,15	0,07
August 2011		1,80	1,41	0,65	0,21	1,65	0,07	1,85	1,48	0,75	0,21	1,75	0,21
September 2011		3,20	0,42	0,90	0,28	2,00	0,00	3,05	0,35	0,95	0,21	2,00	0,14
Oktober 2011	II	3,10	0,00	1,10	0,42	2,50	0,57	3,30	0,00	1,20	0,42	1,70	0,57
November 2011		3,60	0,14	1,60	0,42	2,40	0,42	3,30	0,00	1,35	0,49	3,20	0,28
Dezember 2011		4,00	0,71	1,43	0,53	2,60	0,14	4,00	0,71	1,44	0,51	2,80	0,42
Januar 2012		2,05	0,49	0,85	0,49	2,10	0,00	2,00	0,42	0,68	0,60	2,15	0,07
Februar 2012		3,30	0,57	1,65	0,92	3,80	0,00	3,40	0,57	1,65	0,78	3,90	0,00
März 2012		3,25	0,07	1,70	0,85	3,25	0,07	3,25	0,07	1,70	0,71	3,30	0,00
April 2012		3,65	0,49	2,15	0,07	3,45	0,07	3,65	0,49	2,15	0,07	3,50	0,00
Mai 2012		3,55	0,92	2,30	0,42	3,55	0,07	3,65	0,92	1,80	0,42	3,65	0,07
Juni 2012		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	4,74	1,24	3,23	0,19	2,74	0,79
Juli 2012		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	4,35	3,07	1,82	0,82	3,30	1,27
August 2012		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	6,72	4,40	4,59	0,52	5,44	0,86
September 2012		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	8,24	6,22	5,60	1,08	6,95	1,55
Oktober 2012	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	18,71	19,64	6,30	n. b.	n. b.	n. b.	
November 2012	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	11,92	9,89	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
Dezember 2012	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	5,22	2,03	2,98	0,25	5,47	1,04	
Januar 2013	III	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	5,15	1,89	2,80	0,58	4,24	0,57
Februar 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	5,12	1,66	2,28	0,33	3,94	1,16
März 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	3,37	1,10	2,41	0,42	3,39	1,63
April 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	1,69	1,00	2,72	0,66	2,23	1,63
Mai 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,89	0,90	2,63	0,81	1,82	1,14
Juni 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,73	0,51	1,56	0,16	4,57	5,08
Juli 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,79	0,19	1,32	0,35	7,09	7,77

<sup>1)</sup> n. b. = nicht bestimmt

Die Konzentrationen des gesamten organischen Kohlenstoffs (**TOC**) sowie des gelösten organischen Kohlenstoffs (**DOC bzw. NPOC(D)**) mit dem Sickerwasser in dem Boden **Welzow** zeigt Tabelle 87. Die Analytik des TOC erfolgte bis einschließlich Mai 2012. Um Messungenauigkeiten zu verringern wird ab Juni 2012 die DOC-Konzentration als NPOC(D)-Konzentration bestimmt. Für die Konzentrationen an TOC und DOC bzw. NPOC(D) weist die Variante 90 BKS15 tendenziell die höchsten Werte und die Variante MIN die geringsten Werte sowohl in den einzelnen Perioden als auch im gesamten Versuchszeitraum auf. Die mittleren TOC-Konzentrationen für den Zeitraum Juni 2011 bis Mai 2012 betragen 4,2 mg/l (MIN), 4,3 mg/l (3x30 BKS15) und 4,7 mg/l (90 BKS15). Die mittleren DOC-Konzentrationen bis Mai 2012 betragen 3,3 mg/l (MIN), 3,5 mg/l (3x30 BKS15) und 3,9 mg/l (90 BKS15). Ab Juni 2012 liegen mittlere NPOC(D)-Konzentrationen in Höhe von 3,9 mg/l (MIN), 3,9 mg/l (3x30 BKS15) und 4,5 mg/l (90 BKS15) vor. Entsprechend der Messwerte werden die statistischen Berechnungen für die TOC- und DOC-Konzentrationen bis Mai 2012 durchgeführt. Die Berechnung für die NPOC(D)-Konzentration erfolgt dementsprechend ab Juni 2012. Die TOC- und DOC-Konzentrationen der Varianten MIN und 90 BKS15 sowie der Varianten 3x30 BKS15 und 90 BKS15 unterscheiden sich über den Zeitraum der Periode I und II signifikant voneinander (Anhang 3.9 bzw. 4.11). Die Aufschlüsselung der signifikanten Unterschiede für die einzelnen Perioden ist Anhang 3.10 bzw. 4.12 zu entnehmen. Auch für die NPOC(D)-Konzentration liegen signifikante Unterschiede über den Zeitraum der Periode II und III zwischen den Varianten MIN und 90 BKS15 sowie den Varianten 3x30 BKS15 und 90 BKS15 vor. Die Aufschlüsselung der signifikanten Unterschiede für die einzelnen Perioden erfolgt in Anhang 3.14.

Die Konzentrationen des gesamten gebundenen Stickstoffs (**TN<sub>b</sub>**) und des gesamten gebundenen Stickstoff nach Mikrofiltration (**DN<sub>b</sub>**) mit dem Sickerwasser in dem Boden **Welzow** zeigt Tabelle 88. Die Analytik des TN<sub>b</sub> erfolgte bis einschließlich Mai 2012. In dem Zeitraum Juni 2011 bis Mai 2012 ergeben sich folgende mittlere TN<sub>b</sub>-Konzentrationen: 2,9 mg/l (MIN), 1,2 mg/l (3x30 BKS15) und 2,5 mg/l (90 BKS15). Die höchsten TN<sub>b</sub>-Konzentrationen liegen in der Variante MIN und die geringsten in der Variante 3x30 BKS15 vor. Die DN<sub>b</sub>-Konzentrationen nehmen tendenziell über den Versuchszeitraum in allen Varianten zu. Jedoch weist die Variante MIN im Mittel in allen Perioden die höchsten und die Variante 3x30 BKS15 die geringsten DN<sub>b</sub>-Konzentrationen auf. Insbesondere von September bis November 2012 treten in der Variante MIN hohe DN<sub>b</sub>-Konzentrationen (Spanne 8,2 bis 18,7 mg/l) auf. Die mittleren DN<sub>b</sub>-Konzentrationen über den gesamten Versuchszeitraum liegen bei 3,8 mg/l (MIN), 1,9 mg/l (3x30 BKS15) und 3,2 mg/l (90 BKS15).

Die  $TN_b$ - und  $DN_b$ -Konzentrationen der Varianten MIN und 3x30 BKS15 sowie der Varianten 3x30 BKS15 und 90 BKS15 unterscheiden sich über den Zeitraum der Periode I und II bzw. II und III signifikant voneinander (Anhang 3.15 bzw. 4.17). Die Aufschlüsselung der signifikanten Unterschiede für die einzelnen Perioden ist Anhang 3.16 bzw. 4.18 zu entnehmen.

Die Konzentrationen des gesamten organischen Kohlenstoffs (**NPOC(T)**) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (**NPOC(D)**) mit dem Sickerwasser aus dem **Braunerde-Podsol** zeigt Tabelle 89. Die Analytik des NPOC(T) erfolgte nur bis einschließlich Mai 2012. Sowohl die NPOC(T)- als auch die NPOC(D)-Konzentrationen weisen ein deutlich höheres Niveau auf als die TOC- bzw. DOC/NPOC(D)-Konzentrationen des Sickerwasser aus dem Boden Welzow (vgl. Tabelle 87). Die Variante MIN weist die höchsten mittleren NPOC(T)-Konzentrationen vom Juni 2011 bis Mai 2012 auf: 11,3 (MIN), 9,7 (3x30 BKS15) und 8,7 (90 BKS15) mg/l. Der Unterschied ist in der Periode I mit einer Differenz von 3,7 mg/l zwischen der mittleren NPOC(T)-Konzentration der Variante MIN und der mittleren Konzentration der Variante 90 BKS15. In der Periode II beträgt die Differenz dieser beiden Varianten nur noch 1,3 mg/l. Die NPOC(D)-Konzentration verhält sich in der Periode I und II analog zu der NPOC(T)-Konzentration. Die Variante MIN weist die höchsten und die Variante 3x30 BKS15 die geringsten NPOC(D)-Konzentrationen auf. In der Periode III sind die mittleren NPOC(D)-Konzentrationen der Variante 3x30 BKS15 höher als die der Variante 90 BKS15 bzw. tendenziell höher als die Variante MIN. Über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet ergeben sich mittlere NPOC(D)-Konzentrationen von 10,4 (MIN), 9,5 mg/l (3x30 BKS15) und 8,6 mg/l (90 BKS15). Über den Zeitraum der Perioden I und II weist die Variante MIN signifikant höhere NPOC(T)-Konzentrationen auf als die Varianten 90 BKS15 (Anhang 3.31). Die NPOC(D)-Konzentrationen der Varianten MIN und 90 BKS15 sowie 3x30 BKS15 und 90 BKS15 unterscheiden sich über den gesamten Versuchszeitraum signifikant voneinander (Anhang 3.33). Die Aufschlüsselung der signifikanten Unterschiede für die einzelnen Perioden ist Anhang 3.32 bzw. 4.34 zu entnehmen.

Die Konzentrationen des gesamten gebundenen Stickstoffs (**TN<sub>b</sub>**) und des gesamten gebundenen Stickstoffs nach Mikrofiltration (**DN<sub>b</sub>**) mit dem Sickerwasser in dem **Braunerde-Podsol** zeigt Tabelle 90. Die Analytik des  $TN_b$  erfolgte bis einschließlich Mai 2012. In dem Zeitraum Juni 2011 bis Mai 2012 ergeben sich folgende mittlere  $TN_b$ -Konzentrationen: 16,0 (MIN), 17,2 (3x30 BKS15) und 20,5 (90 BKS15) mg/l. Sie liegen damit deutlich höher als die mittleren  $TN_b$ -Konzentrationen des Sickerwassers aus dem

Boden Welzow (vgl. Tabelle 88). Die Variante 90 BKS15 weist in dem Beprobungszeitraum die höchsten und die Variante MIN die geringsten  $TN_b$ -Konzentrationen auf. Auch die  $DN_b$ -Konzentrationen sind in der Variante 90 BKS15 in allen Perioden am höchsten und in der Variante MIN am geringsten. Bei den BKS-Varianten ist eine kontinuierliche Steigerung der mittleren  $DN_b$ -Konzentrationen von der ersten zur dritten Periode um 9,6 (3x30 BKS15) bzw. 15,5 (90 BKS15) mg/l zu verzeichnen. Die mittleren  $DN_b$ -Konzentrationen über den gesamten Versuchszeitraum liegen bei 16,2 (MIN), 19,3 (3x30 BKS15) und 24,0 (90 BKS15) mg/l. Über den Zeitraum der Perioden I und II liegen signifikante Unterschiede in den  $TN_b$ -Konzentrationen zwischen den Varianten MIN und 90 BKS15 sowie zwischen den Varianten 3x30 BKS15 und 90 BKS15 vor (Anhang 3.35). Die  $DN_b$ -Konzentrationen der Varianten MIN und 90 BKS15 sowie der Varianten 3x30 BKS15 und 90 BKS15 unterscheiden sich über den gesamten Versuchszeitraum signifikant voneinander (Anhang 3.37). Die Aufschlüsselung der signifikanten Unterschiede für die einzelnen Perioden ist Anhang 3.36 bzw. 4.38 zu entnehmen.

Tabelle 89: Konzentrationen des gesamten und gelösten organischer Kohlenstoffs (NPOC (T)/NPOC(D)) mit dem Sickerwasser in dem Braunerde-Podsol (n = 2, arith. Mittel; SD)

Termin	Periode	NPOC(T) [mg/l] <sup>1)</sup>						NPOC(D) [mg/l]					
		MIN	SD	3x30 BKS15	SD	90 BKS15	SD	MIN	SD	3x30 BKS15	SD	90 BKS15	SD
Juni 2011	I	16,85	1,20	14,00	1,41	10,70	1,84	16,15	0,35	11,65	0,78	10,25	1,77
Juli 2011		15,55	0,78	10,95	0,64	11,15	1,20	14,35	0,07	10,25	0,07	11,10	1,70
August 2011		11,95	0,07	10,80	0,99	10,10	1,56	11,10	0,71	10,40	0,57	9,35	1,06
September 2011		11,10	0,57	9,45	0,92	8,75	0,64	10,05	0,07	9,15	0,78	8,25	0,49
Oktober 2011	II	11,50	1,41	9,90	1,13	9,60	0,57	12,20	0,42	10,30	0,57	9,30	1,41
November 2011		11,30	0,00	10,00	0,57	8,85	0,78	9,85	0,07	9,10	1,27	8,45	0,49
Dezember 2011		10,70	0,99	8,40	0,57	7,50	0,14	10,50	0,14	8,80	0,85	8,35	0,07
Januar 2012		8,05	0,07	7,50	0,99	7,50	0,14	8,30	0,14	7,40	0,99	7,60	0,57
Februar 2012		6,00	0,85	6,15	1,48	5,35	0,21	6,30	0,99	6,45	1,06	5,75	0,07
März 2012		6,15	0,35	6,25	1,77	5,55	0,49	6,45	0,07	6,40	2,12	6,00	0,00
April 2012		7,35	0,21	7,55	0,64	6,45	0,92	7,15	0,07	7,70	0,42	6,50	0,14
Mai 2012		8,05	0,49	9,55	1,20	7,70	0,14	8,25	0,64	9,65	0,21	7,75	0,35
Juni 2012		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	8,83	0,32	8,77	0,24	8,36	1,04
Juli 2012		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	9,67	0,81	10,21	0,20	8,52	0,15
August 2012		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	9,27	0,70	8,63	0,20	7,86	0,25
September 2012		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	10,43	0,47	9,63	0,53	8,80	0,49
Oktober 2012	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	10,03	0,50	9,30	1,85	7,21	0,31	
November 2012	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	8,92	0,11	8,96	2,54	7,11	0,61	
Dezember 2012	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	6,55	0,04	6,68	0,93	6,08	0,88	
Januar 2013	III	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	7,14	0,27	8,06	1,00	6,64	0,30	
Februar 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	14,87	0,65	12,50	1,99	8,51	0,61
März 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	9,30	0,23	9,92	0,28	9,44	0,79
April 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	9,05	0,04	9,92	0,59	9,23	0,55
Mai 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	10,26	1,49	10,29	0,17	9,22	0,89
Juni 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	9,55	0,30	10,71	0,16	9,84	0,48
Juli 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	10,11	0,12	11,91	0,07	10,35	0,06

<sup>1)</sup> n. b. = nicht bestimmt

Tabelle 90: Konzentrationen des gesamten gebundenen Stickstoffs (TN<sub>b</sub>) und nach Mikrofiltration (DN<sub>b</sub>) mit dem Sickerwasser in dem Braunerde-Podsol (n = 2, arith. Mittel; SD)

Termin	Periode	TN <sub>b</sub> [mg/l] <sup>1)</sup>						DN <sub>b</sub> [mg/l]					
		MIN	SD	3x30 BKS15	SD	90 BKS15	SD	MIN	SD	3x30 BKS15	SD	90 BKS15	SD
Juni 2011	I	8,65	0,35	12,65	4,60	16,20	1,70	8,40	0,42	12,10	4,24	15,25	1,77
Juli 2011		9,95	0,35	13,20	3,82	14,65	1,48	10,20	0,42	13,75	4,03	15,15	1,63
August 2011		11,45	0,35	13,65	3,04	14,25	3,32	11,90	0,00	14,25	3,46	15,15	3,18
September 2011		13,15	0,78	14,85	3,32	15,75	0,64	13,75	0,78	14,75	4,31	16,00	0,00
Oktober 2011	II	14,10	0,99	15,00	4,38	15,75	0,64	13,90	0,99	15,25	4,88	16,45	0,07
November 2011		16,35	1,34	17,05	4,31	16,30	1,84	14,65	0,49	16,15	3,89	15,45	2,19
Dezember 2011		14,80	0,99	16,20	3,54	15,20	0,28	13,55	0,21	16,80	2,26	14,95	0,21
Januar 2012		23,60	4,38	22,80	5,37	22,90	6,22	22,65	2,90	23,05	5,30	23,25	6,58
Februar 2012		28,50	9,33	29,65	1,34	37,05	3,61	27,95	8,98	30,45	1,48	36,65	3,46
März 2012		23,20	9,19	19,70	2,97	35,40	4,38	22,85	8,70	19,20	2,69	35,70	6,08
April 2012		24,15	7,42	22,30	0,00	31,70	0,99	24,55	7,57	22,65	0,07	30,25	2,47
Mai 2012		24,50	7,78	24,35	0,35	32,00	1,84	24,10	8,20	24,00	0,28	32,25	1,34
Juni 2012		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	21,19	2,18	20,90	0,62	24,19	8,05
Juli 2012		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	19,47	1,37	19,32	1,71	28,94	0,68
August 2012		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	15,21	1,64	16,90	2,81	26,65	2,19
September 2012		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	15,50	3,11	16,63	2,37	26,21	1,66
Oktober 2012	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	18,32	2,32	16,75	1,77	27,30	4,11	
November 2012	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	18,80	3,11	18,40	2,89	29,28	4,48	
Dezember 2012	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	26,29	0,63	30,81	8,06	27,31	0,15	
Januar 2013	III	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	23,87	2,57	41,89	8,81	45,51	1,24
Februar 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	18,42	3,85	31,83	4,14	41,70	6,49
März 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	14,28	4,13	24,24	1,99	30,96	9,75
April 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	14,78	5,78	24,72	1,58	33,04	9,86
Mai 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	13,04	6,53	21,01	1,55	27,20	5,73
Juni 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	13,81	8,15	19,17	0,81	28,79	6,36
Juli 2013		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	12,28	8,10	17,62	0,13	26,07	4,40

<sup>1)</sup> n. b. = nicht bestimmt



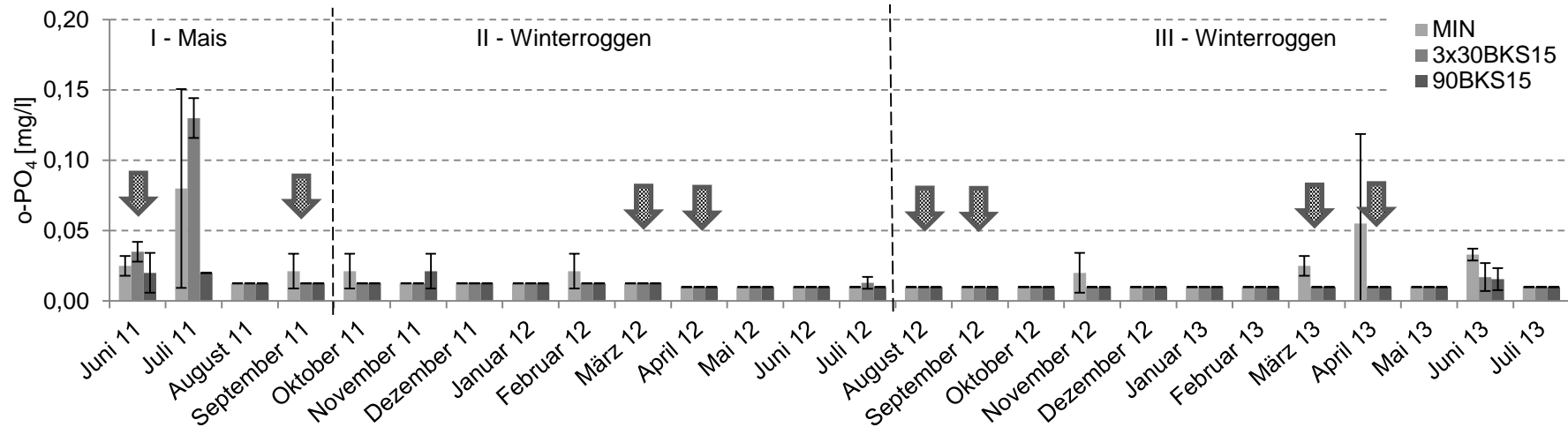
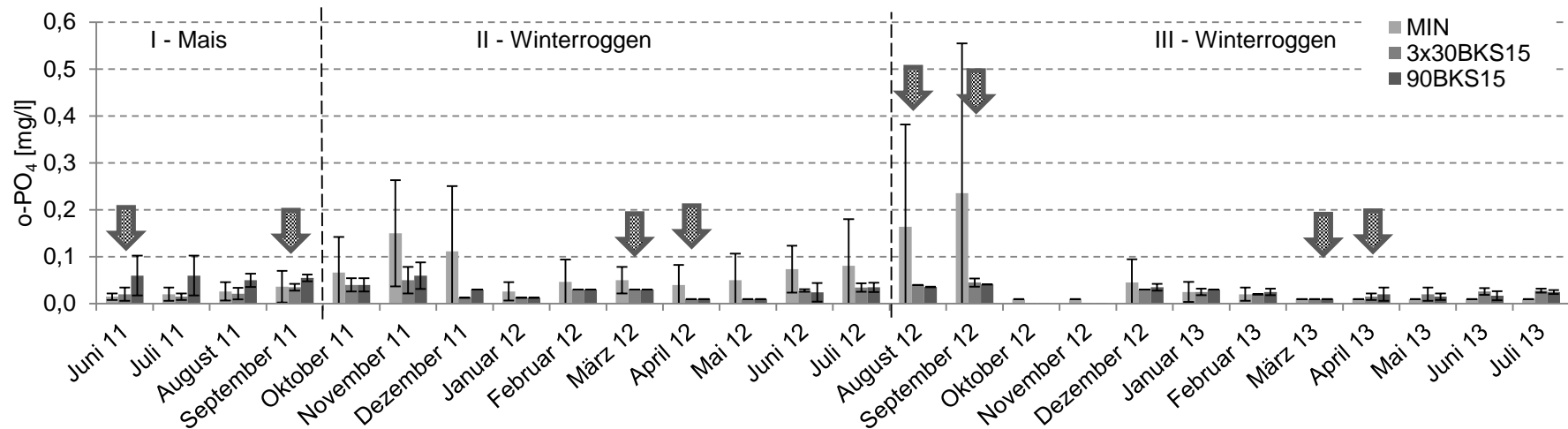


Abbildung 90: o-PO<sub>4</sub>-Konzentration im Sickerwasser der Lysimeter Welzow (oben) und Braunerde-Podsol (unten) im Versuchszeitraum von 06/2011 bis 07/2013 (n = 2, arith. Mittel mit Standardabweichung, Pfeile markieren Düngergaben)

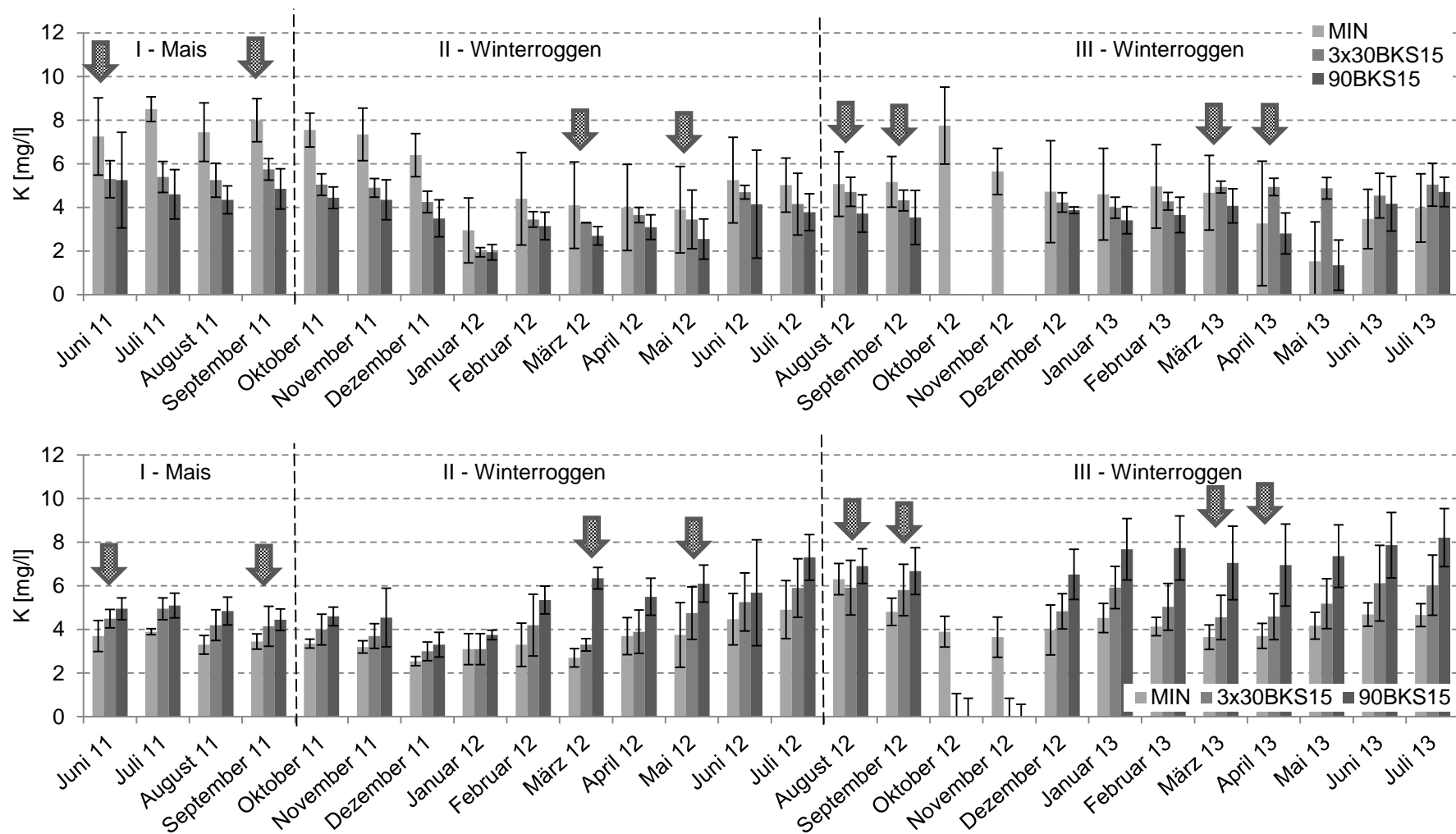


Abbildung 91: K-Konzentration im Sickerwasser der Lysimeter Welzow (oben) und Braunerde-Podsol (unten) im Versuchszeitraum von 06/2011 bis 07/2013 (n = 2, arith. Mittel mit Standardabweichung, Pfeile markieren Düngergaben)

Die Konzentrationen des gelösten Orthophosphats (**o-PO<sub>4</sub>**) im Sickerwasser des Bodens Welzow (Abbildung 90, oben) und des Braunerde-Podsols (Abbildung 90, unten) liegen meist unterhalb des Bestimmungsgrenzwertes von 0,02 mg/l. Die festgestellten o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen in dem Sickerwasser des Bodens **Welzow** sind sehr gering. Über den gesamten Versuchszeitraum sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten festzustellen (Anhang 19). Die Aufschlüsselung der signifikanten Unterschiede für die einzelnen Perioden ist Anhang 3.20 zu entnehmen.

In dem Sickerwasser des **Braunerde-Podsols** treten lediglich in der Periode I sehr geringe o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen auf. Im weiteren Versuchsverlauf liegen die o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen bis auf einzelne Ausnahmen unterhalb des Bestimmungsgrenzwertes. Es liegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten über den gesamten Versuchszeitraum (Anhang 3.39) und für die einzelnen Perioden (Anhang 3.40) vor.

Die **K-Konzentrationen** in dem Sickerwasser des Bodens **Welzow** liegen in allen Varianten unter 10 mg/l (Abbildung 91, oben). In den Perioden I und II weist die Variante MIN die höchsten K-Konzentrationen in dem Sickerwasser des Bodens Welzow auf. In der Periode III steigen die K-Konzentrationen der Variante 3x30 BKS15 über das Niveau der Variante MIN an. Die Variante 90 BKS15 weist im gesamten Versuchsverlauf die geringsten K-Konzentrationen auf. Im Oktober und November 2012 stand nicht genügend Material für die Analyse der K-Konzentrationen in den BKS-Varianten zur Verfügung. Über den gesamten Versuchszeitraum ist die K-Konzentration der Variante MIN und der Variante 3x30 BKS15 signifikant höher als die K-Konzentration der Variante 90 BKS15 (Anhang 3.21). Die Aufschlüsselung der signifikanten Unterschiede für die einzelnen Perioden ist Anhang 3.22 zu entnehmen.

Auch die K-Konzentrationen in dem Sickerwasser des **Braunerde-Podsols** liegen in allen Varianten deutlich unter 10 mg/l (Abbildung 91, unten). Anders als in dem Boden Welzow weist hier die Variante 90 BKS15 im gesamten Versuchsverlauf die höchsten und die Variante MIN die geringsten K-Konzentrationen auf. Im Oktober und November 2012 stand nicht genügend Material für die Analyse der K-Konzentrationen in den BKS-Varianten zur Verfügung. Alle Varianten unterscheiden sich über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet signifikant voneinander (Anhang 3.41). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in den einzelnen Perioden sind Anhang 3.42 zu entnehmen.

#### 4.4.3.2 Nährstoffausträge mit dem Sickerwasser für die Lysimeter Welzow und Braunerde-Podsol

Die  $N_{\min}$ -Austräge mit dem Sickerwasser ergeben sich aus der Summe der  $NO_3$ -N- und  $NH_4$ -N-Austräge. Die  $N_{\min}$ -Austräge mit dem Sickerwasser in dem Boden **Welzow** nehmen im Versuchsverlauf in allen Varianten geringfügig zu (Tabelle 91). Die Variante 3x30 BKS15 weist im gesamten Versuchsverlauf die geringsten  $N_{\min}$ -Austräge auf, während die  $N_{\min}$ -Austräge der Varianten MIN und 90 BKS15 vergleichbar sind. Insgesamt werden in dem gesamten Versuchszeitraum nur 18,2 kg/ha  $N_{\min}$  (MIN), 17,1 kg/ha  $N_{\min}$  (90 BKS15) und 9,3 kg/ha  $N_{\min}$  (3x30 BKS15) ausgetragen. Der  $N_{\min}$ -Austrag der Variante 3x30 BKS15 ist signifikant im gesamten Versuchszeitraum geringer als die  $N_{\min}$ -Austräge der Varianten MIN und 90 BKS15.

Tabelle 91:  $N_{\min}$ -Austräge mit dem Sickerwasser der Lysimeter Welzow im Versuchszeitraum (n = 2, arith. Mittel; SD)

Periode <sup>1)</sup>	MIN <sup>2)</sup>		3x30 BKS15		90 BKS15	
	$N_{\min}$ [kg/ha] <sup>3)</sup>	SD <sup>4)</sup>	$N_{\min}$ [kg/ha] <sup>3)</sup>	SD <sup>4)</sup>	$N_{\min}$ [kg/ha] <sup>3)</sup>	SD <sup>2) 4)</sup>
I	1,15 <sup>a</sup>	0,78	0,60 <sup>a</sup>	0,05	1,06 <sup>a</sup>	0,19
II	7,26 <sup>a</sup>	0,89	3,90 <sup>b</sup>	1,17	6,76 <sup>a</sup>	0,31
III	9,82 <sup>a</sup>	3,20	4,80 <sup>a</sup>	0,41	9,37 <sup>a</sup>	4,88
Gesamt	18,23 <sup>a</sup>	1,53	9,30 <sup>b</sup>	1,63	17,19 <sup>a</sup>	5,38

<sup>1)</sup> Perioden: I: 06/2011 - 09/2011 Mais, II: 10/2011 - 07/2012 Winterroggen, III: 08/2012 - 07/2013 Winterroggen. <sup>2)</sup> n. b. = Nicht bestimmt, <sup>3)</sup> Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede an. <sup>4)</sup> SD = Standardabweichung

Tabelle 92:  $N_{\min}$ -Austräge mit dem Sickerwasser der Lysimeter Braunerde-Podsol im Versuchszeitraum (n = 2, arith. Mittel; SD)

Periode <sup>1)</sup>	MIN <sup>2)</sup>		3x30 BKS15		90 BKS15	
	$N_{\min}$ [kg/ha] <sup>3)</sup>	SD <sup>4)</sup>	$N_{\min}$ [kg/ha] <sup>3)</sup>	SD <sup>4)</sup>	$N_{\min}$ [kg/ha] <sup>3)</sup>	SD <sup>2) 4)</sup>
I	5,77 <sup>a</sup>	0,01	8,06 <sup>b</sup>	1,46	8,91 <sup>b</sup>	2,37
II	37,38 <sup>a</sup>	8,45	37,84 <sup>a</sup>	5,12	46,19 <sup>a</sup>	7,61
III	49,40 <sup>a</sup>	9,57	75,06 <sup>a</sup>	17,62	90,44 <sup>b</sup>	4,76
Gesamt	92,55 <sup>a</sup>	1,11	120,96 <sup>b</sup>	24,20	145,54 <sup>c</sup>	0,49

<sup>1)</sup> Perioden: I: 06/2011 - 09/2011 Mais, II: 10/2011 - 07/2012 Winterroggen, III: 08/2012 - 07/2013 Winterroggen. <sup>2)</sup> n. b. = Nicht bestimmt, <sup>3)</sup> Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede an. <sup>4)</sup> SD = Standardabweichung

Die  $N_{\min}$ -Austräge mit dem Sickerwasser des **Braunerde-Podsols** fallen deutlich höher aus als die  $N_{\min}$ -Austräge des Bodens Welzow (Tabelle 92). Im Versuchsverlauf steigen die  $N_{\min}$ -Austräge aller Varianten, insbesondere aber der BKS-Varianten, deutlich an. In allen Perioden weist die Variante 90 BKS15 die höchsten und die Variante MIN die geringsten  $N_{\min}$ -Austräge auf. Insgesamt werden 92,6 kg/ha  $N_{\min}$  (MIN), 121 kg/ha

$N_{\min}$  (3x30 BKS15) und 145,5 kg/ha  $N_{\min}$  (90 BKS15) ausgetragen. Alle Varianten unterscheiden sich über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet signifikant voneinander.

Die **K-Austräge** mit dem Sickerwasser in dem Boden **Welzow** steigen ebenfalls im Versuchsverlauf in allen Varianten geringfügig an (Tabelle 93). In allen Perioden weist die Variante MIN die höchsten und die Variante 90 BKS15 die geringsten K-Austräge auf. Insgesamt werden über den gesamten Versuchszeitraum 26,0 kg/ha K (MIN), 21,3 kg/ha K (3x30 BKS15) und 18,6 kg/ha K (90 BKS15) ausgetragen. Über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet sind die K-Austräge der Variante 90 BKS15 signifikant geringer als die K-Austräge der Varianten MIN und 3x30 BKS15.

Tabelle 93: K-Austräge mit dem Sickerwasser der Lysimeter Welzow im Versuchszeitraum (n = 2, arith. Mittel; SD)

Periode <sup>1)</sup>	MIN <sup>2)</sup>		3x30 BKS15		90 BKS15	
	K [kg/ha] <sup>3)</sup>	SD <sup>4)</sup>	K [kg/ha] <sup>3)</sup>	SD <sup>4)</sup>	K [kg/ha] <sup>3)</sup>	SD <sup>2) 4)</sup>
I	3,75 <sup>a</sup>	0,61	3,20 <sup>ab</sup>	0,40	2,56 <sup>b</sup>	0,87
II	9,93 <sup>a</sup>	4,72	7,79 <sup>ab</sup>	0,77	6,88 <sup>b</sup>	1,23
III	12,42 <sup>a</sup>	5,59	10,37 <sup>a</sup>	2,08	9,17 <sup>a</sup>	2,97
Gesamt	26,09 <sup>a</sup>	10,92	21,37 <sup>a</sup>	3,25	18,62 <sup>b</sup>	5,06

<sup>1)</sup> Perioden: I: 06/2011 - 09/2011 Mais, II: 10/2011 - 07/2012 Winterroggen, III: 08/2012 - 07/2013 Winterroggen. <sup>2)</sup> n. b. = Nicht bestimmt, <sup>3)</sup> Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede an. <sup>4)</sup> SD = Standardabweichung

Die K-Austräge mit dem Sickerwasser des **Braunerde-Podsols** sind vergleichbar mit den K-Austrägen in dem Boden Welzow (Tabelle 94). Auch hier weist die Variante MIN die geringsten und die Variante 90 BKS15 die höchsten K-Austräge in allen Perioden auf. Insgesamt erfolgte ein Austrag von 32,6 kg/ha K (90 BKS15), 23,4 kg/ha K (3x30 BKS15) und 19,4 kg/ha K (MIN). Die Variante 90 BKS15 weist über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet signifikant höhere K-Austräge auf als die Varianten MIN und 3x30 BKS15.

Tabelle 94: K-Austräge mit dem Sickerwasser der Lysimeter Braunerde-Podsol im Versuchszeitraum (n = 2, arith. Mittel; SD)

Periode <sup>1)</sup>	MIN <sup>2)</sup>		3x30 BKS15		90 BKS15	
	K [kg/ha] <sup>3)</sup>	SD <sup>4)</sup>	K [kg/ha] <sup>3)</sup>	SD <sup>4)</sup>	K [kg/ha] <sup>3)</sup>	SD <sup>2) 4)</sup>
I	1,95 <sup>a</sup>	0,10	2,78 <sup>ab</sup>	0,73	3,06 <sup>b</sup>	0,79
II	5,99 <sup>a</sup>	1,06	6,84 <sup>a</sup>	1,57	9,12 <sup>b</sup>	0,34
III	11,76 <sup>a</sup>	1,86	14,41 <sup>a</sup>	1,99	21,81 <sup>b</sup>	3,19
Gesamt	19,69 <sup>a</sup>	3,02	24,03 <sup>a</sup>	4,29	33,98 <sup>b</sup>	4,31

<sup>1)</sup> Perioden: I: 06/2011 - 09/2011 Mais, II: 10/2011 - 07/2012 Winterroggen, III: 08/2012 - 07/2013 Winterroggen. <sup>2)</sup> n. b. = Nicht bestimmt, <sup>3)</sup> Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede an. <sup>4)</sup> SD = Standardabweichung

Die P-Austräge mit dem Sickerwasser beider Böden sind sehr gering (Abbildung 92). In dem gesamten Versuchszeitraum von 06/2011 bis 07/2013 sind folgende P-Austräge in dem Boden Welzow 0,06 kg/ha (MIN), 0,04 kg/ha (3x30 BKS15) und 0,05 kg/ha (90 BKS15) und in dem Braunerde-Podsol 0,03 kg/ha (MIN), 0,02 kg/ha (3x30 BKS15) und 0,02 kg/ha (90 BKS15) festzustellen. Die Werte sind so gering, dass sie für die landwirtschaftliche Praxis keine Relevanz haben. Die o-PO<sub>4</sub>-Konzentrationen haben häufig den methodischen Bestimmungsgrenzwert unterschritten (vgl. Abbildung 90), so dass von einer statistischen Analyse auf signifikante Unterschiede abgesehen wird.

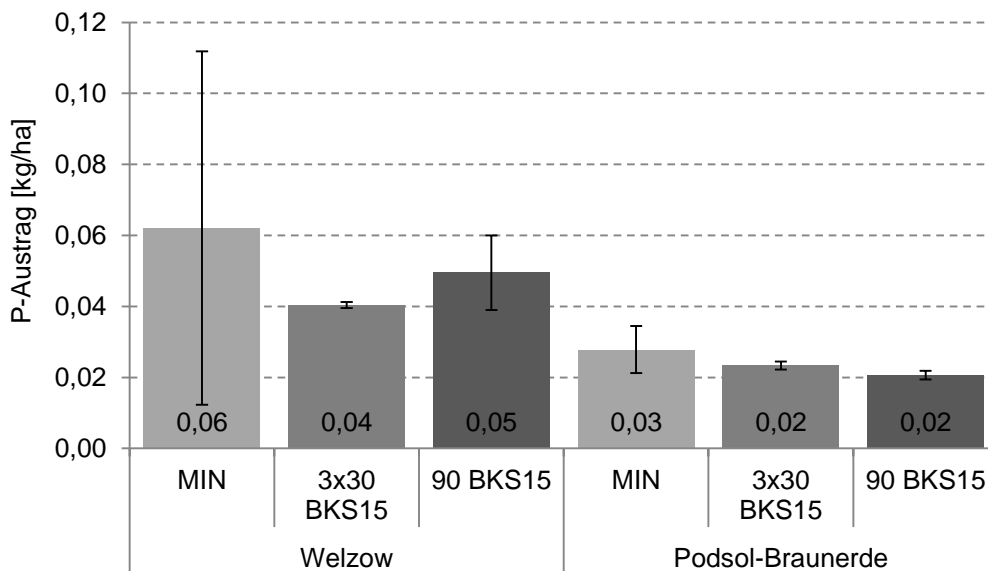


Abbildung 92: P-Austräge mit dem Sickerwasser der Lysimeter Welzow und Braunerde-Podsol im Versuchszeitraum (n = 2, arith. Mittel; SD)

#### 4.4.4 N-, P- und K-Bilanzen des Lysimeterversuches von 2011 - 2013

Tabelle 95 zeigt die N-, P- und K-Bilanzen der Versuchsböden Welzow und Podsol-Braunerde in dem Lysimeterversuch für den Versuchszeitraum 2011 - 2013. In dem Boden Welzow verbleibt ein großer Teil des applizierten Stickstoffs im Bodenkörper und wird nicht über den Ernteentzug und das Sickerwasser ausgetragen. Die BKS-Gaben mit hohen N<sub>i</sub>-Konzentrationen führen nicht zu einer erhöhten Auswaschung mit dem Sickerwasser. Die reduzierte BKS Gabe von 30 t/ha weist tendenziell geringere N-Auswaschungen auf als die Variante MIN.

Tabelle 95: N-, P- und K-Bilanzen des Lysimeterversuches

Bilanz		Welzow			Braunerde-Podsol		
		MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
N [kg/ha]							
Input	BKS	0	180	180	0	180	180
	Düngung	550	430	430	550	430	430
	Deposition	45	45	45	45	45	45
	Summe	595	655	655	595	655	655
Output	Ernteentzug	300	243	253	416	359	356
	Sickerwasser	18	9	17	92	120	143
	Summe	318	252	270	508	479	499
<b>Bilanz</b>		<b>277</b>	<b>403</b>	<b>385</b>	<b>87</b>	<b>176</b>	<b>156</b>
P [kg/ha]							
Input	BKS	0	225	225	0	225	225
	Düngung	490	410	410	490	410	410
	Deposition	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Summe	491,5	636,5	636,5	491,5	636,5	636,5
Output	Ernteentzug	53	54	59	71	65	62
	Sickerwasser	0,06	0,04	0,05	0,03	0,02	0,02
	Summe	53	54	59	71	65	62
<b>Bilanz</b>		<b>439</b>	<b>583</b>	<b>578</b>	<b>421</b>	<b>572</b>	<b>574</b>
K [kg/ha]							
Input	BKS	0	1125	1125	0	1125	1125
	Düngung	670	570	570	670	570	570
	Deposition	0	0	0	0	0	0
	Summe	670	1695	1695	670	1695	1695
Output	Ernteentzug	278	285	301	252	313	365
	Sickerwasser	26	21	19	19	23	33
	Summe	304	307	319	272	336	398
<b>Bilanz</b>		<b>366</b>	<b>1388</b>	<b>1376</b>	<b>398</b>	<b>1359</b>	<b>1297</b>

Die Podsol-Braunerde weist deutlich höhere N-Ernteentzüge und auch N-Auswaschungen als der Boden Welzow auf. Sie nehmen mit Erhöhung der BKS-Düngung im Vergleich zu der Variante MIN zu. Insgesamt verbleibt in dem Bodenkörper der Varianten 3x30 BKS15 und 90 BKS15 ein größerer N-Anteil als in der Variante MIN. Im Vergleich zu dem Boden Welzow wird jedoch deutlich mehr N ausgetragen. Für beide Böden liegen nur geringe P-Ernteentzüge und P-Austräge mit dem Sickerwasser vor. Es ist kein Einfluss der BKS-Gabe feststellbar. Der größte P-Anteil verbleibt im Bodenkörper. In dem Boden Welzow nimmt der K-Ernteentzug mit der Steigerung der BKS-Gabe tendenziell zu. Auch ist eine tendenzielle Abnahme der K-Austräge mit dem Sickerwasser durch die Steigerung der BKS-Gabe zu verzeichnen. In der Podsol-Braunerde nimmt der K-Ernteentzug durch die BKS-Gabe deutlich zu, während die K-Austräge mit Sickerwasser nur tendenziell ansteigen. Insgesamt sind die K-Austräge mit dem Sickerwasser in beiden Böden sehr gering. Der überwiegende Teil des Kaliums wird in dem Bodenkörper gehalten.

Der Einsatz des BKS in unterschiedlichen Gabenhöhen zeigt in dem Boden Welzow keine zusätzlichen N-, P- und K-Auswaschungsverluste. Der Braunerde-Podsol zeigt bei reiner Mineraldüngung und in den Varianten mit BKS-Düngung verstärkte erhöhte N-Auswaschungsverluste. Nach Baumgärtel et al. (2003) können die unvermeidbaren N-Nährstoffverluste dieses Standortes bis zu  $30 \text{ kg/ha} \times a$  betragen. Für die BKS-Varianten muss ein Zuschlag durch die N-Anreicherung mit der BKS-Düngung in Höhe von  $20 \text{ kg N/ha} \times a$  berücksichtigt werden. Unter diesem Aspekt sind die N-Austräge noch in einem vertretbaren Rahmen, sollten aber durch geeignete Bewirtschaftungsmaßnahmen reduziert werden. Die P- und K-Auswaschungen sind auch in diesem Boden sehr gering.



## 5 Diskussion

Im Rahmen des Gefäßversuch I werden Biokohlesubstrate (BKS) eingesetzt, die sich lediglich in ihrem Kohlegehalt (15 und 30 Vol.-%) unterscheiden. Zudem erfolgt eine Steigerung der BKS-Applikationsmenge von 30 t/ha bis 240 t/ha in den Versuchsböden Welzow (Sl2) und Zinnitz (Su3). Die BKS des Gefäßversuches I werden ebenfalls im Bodensäulen- und Lysimeterversuch getestet. Im Bodensäulenversuch werden BKS15-Gaben in Höhe von 30 t/ha und 90 t/ha im Vergleich zu einer ausschließlich mineralisch gedüngten Variante auf den Böden Welzow und Zinnitz geprüft. Im Lysimeterversuch erfolgt eine einmalige Gabe von 90 t/ha und einer zeitlichen gestaffelten Gabe von dreimal 30 t/ha BKS15 auf die Böden Welzow und einen Braunerde-Podsol (mSgs). Im Rahmen des Gefäßversuches II wird eine Vielzahl an Variationsmöglichkeiten in der BKS-Herstellung auf ihre pflanzenbauliche Eignung geprüft. Es kommen BKS zum Einsatz, die sich hinsichtlich ihrer Kohleart (Braun- und Biokohle), ihres Kohlegehaltes (15 und 30 Vol.-%), ihrer Zusammensetzung (FK, GPM RG II bzw. IV, Silage- und Gipszusatz) und ihrer Herstellungs- und Fermentationsparameter unterscheiden.

### 5.1 Auswirkungen der Anwendung von Biokohlesubstraten auf die physikalischen Eigenschaften der Böden

Da es zu BKS bzw. Biokohlekompostgemischen kaum Literatur hinsichtlich bodenphysikalischer Effekte neben der nutzbaren Feldkapazität gibt, wird zur Einordnung der Ergebnisse sowohl auf Applikationen von reinen Biokohlen als auch von reinen Komposten zurückgegriffen.

#### 5.1.1 Trockenrohdichte

In dem **Gefäßversuch I** ist mit steigenden BKS-Gaben eine Reduktion der Trockenrohdichte in dem Boden Welzow zu beobachten. Das BKS30 reduziert die Trockenrohdichte in dem Boden Welzow tendenziell stärker als das BKS15. In dem Boden Zinnitz kommt es ab einer Gabenhöhe von 90 t BKS15 bzw. BKS30/ha zu einer Reduktion der Trockenrohdichte. In dem **Gefäßversuch II** bewirkt die BKS-Gabe eine Reduzierung der Trockenrohdichte in beiden Versuchsböden. Die Effekte verstärken sich bei der Applikation von 90 t/ha BKS im Vergleich zu einer Gabenhöhe von 30 t/ha BKS (Ausnahme: Zinnitz BKS Q1+N). Ein Einfluss des Gipszusatzes auf die Trockenrohdichte ist nicht erkennbar. Die Variation der Herstellungsparameter hinsichtlich Fermentationsdauer und -temperatur zeigt nur in dem Boden Welzow eine tendenzielle Erhöhung der

Trockenrohdichten mit Verlängerung der Fermentationsdauer und Erhöhung der Fermentationstemperatur an. In dem Boden Zinnitz ist kein Effekt feststellbar. Die geringsten Trockenrohdichten liegen in beiden Versuchsböden in den BKS-Varianten mit dem Substitut Gewässerpflegematerial vor. In dem **Bodensäulenversuch** zeigt sich ebenfalls eine tendenzielle Reduzierung der **Trockenrohdichte** in den Oberböden Welzow und Zinnitz mit der Erhöhung der BKS-Gaben. Der Boden Welzow weist in dem **Lysimeterversuch** nur in der Variante 3x30 BKS15 eine tendenziell verringerte Trockenrohdichte gegenüber Varianten MIN und 90 BKS15 auf. Der Braunerde-Podsol wurde in der betrachteten Zeitspanne des Lysimeterversuches nicht bodenphysikalisch untersucht.

Auch in der Literatur zeigt sich, die in den Versuchen festgestellte Reduktion der Trockenrohdichte durch die Zugabe der BKS bzw. organischer Substanz. So beschreiben beispielsweise Haubold-Rosar et al. (2016), dass die Zufuhr von organischer Substanz mit einer geringeren spezifischen Dichte, z. B. Biokohle ca. 1,5 bis 1,7 g/cm<sup>3</sup>; (Abel et al., 2013; Downie et al., 2009) als der mineralischen Bodensubstanz (2,65 g/cm<sup>3</sup>) über die Veränderung der relativen Anteile von Festsubstanz und Poren zwangsläufig die Trockenrohdichte im Boden reduziert. Zahlreiche Versuche bestätigen sowohl für alleinige Biokohlegaben (Abel et al., 2013; Devereux et al., 2012; Karhu et al., 2011; Revell, 2011; Rogovska et al., 2011; Ventura et al., 2013) als auch für alleinige Kompostgaben (Aggelides und Londra, 2000; Aranyos et al., 2016; Celik et al., 2004; Haber et al., 2008; Martins und Kowald, 1988; Stewart et al., 1998; Tenholtern, 1997) abnehmende Trockenrohdichten in verschiedenen Böden. Ullum (2017) stellt geringere Rohdichten in Pflanzsubstraten mit Biokohle im Vergleich zu deren Pendant ohne Biokohle fest. In der Literatur zeigt sich auch, dass der Reduktionsgrad der Trockenrohdichte von den Ausgangsbedingungen der Böden abhängig ist. So stellt Revell (2011) nach der Biokohle-Gabe nur in einem sandigen Lehm eine Reduktion der Trockenrohdichte um 0,13 g/cm<sup>3</sup> fest, während auf dem schluffigen Lehm mit geringerer Ausgangsdichte kein Effekt nachweisbar ist. Auch Asche et al. (1994) und Timmermann et al. (2003) können bei Betrachtungen über längere Zeiträume keine signifikanten Effekte der Kompostgaben auf die Lagerungsdichte feststellen.

### 5.1.2 Gesamtporenvolumen und Luftkapazität

Das Gesamtporenvolumen (GPV) korreliert eng mit der Trockenrohdichte. Abel et al. (2013) zeigen, dass die Verringerung der Trockenrohdichte im Boden durch steigende Hinzugabe von bis zu 5 M.-% Biokohle zu einer Erhöhung des GPV führt. Auch in dem **Gefäßversuch I** steigt das GPV mit zunehmenden BKS-Gaben in dem Boden Welzow und Zinnitz an. Das GPV beider Böden wird durch das BKS30 tendenziell stärker an-

gehoben als durch das BKS15. Dies ist auf den höheren Biokohleanteil in dem BKS zurückzuführen, da Biokohle ein höheres Porenvolumen aufweist als Böden (Downie et al., 2009). Das GPV des Bodens Zinnitz steigt stärker an als das GPV des Bodens Welzow, da auch die Trockenrohddichte in dem Boden Zinnitz entsprechend stärker reduziert wird. Die hohe **Luftkapazität** des Bodens Welzow ist in den Varianten mit BKS15 und BKS30 im Vergleich zu der mineralischen Referenzvariante (30 Vol.-%) um bis zu 6 Vol.-% reduziert. Vermutlich lagern sich Biokohlepartikel in den Grobporen des Bodens Welzow ab und führen so zu einer Verringerung der Luftkapazität. In dem Boden Zinnitz ist die Luftkapazität mit rund 14 Vol.-% deutlich geringer als die des Bodens Welzow. Ab einer Gabenhöhe von 90 t BKS15/ha bzw. 60 t BKS30/ha nimmt die Luftkapazität in dem Boden Zinnitz tendenziell zu.

In dem **Gefäßversuch II** bewirkt die BKS-Gabe eine Erhöhung des GPV und der Luftkapazität in beiden Versuchsböden. Die Effekte verstärken sich bei der Applikation von 90 t/ha BKS im Vergleich zu einer Gabenhöhe von 30 t/ha BKS (Ausnahme: Zinnitz BKS Q1+N). Das **GPV** wird mit Erhöhung des Bio- und Braunkohlegehaltes von 15 auf 30 Vol.-% nur in dem Boden Zinnitz tendenziell erhöht. In dem Boden Welzow ist diesbezüglich kein Effekt festzustellen. Der Gipszusatz in den BKS bewirkt in dem Boden Welzow eine tendenzielle Steigerung des GPV während in dem Boden Zinnitz kein Effekt erkennbar ist. Das GPV des Bodens Welzow nimmt tendenziell mit der Verlängerung der Fermentationsdauer und Erhöhung der Fermentationstemperatur ab. In dem Boden Zinnitz ist kein Effekt feststellbar. Die BKS-Varianten mit dem Substitut Gewässerpflegematerial weisen in beiden Böden, insbesondere aber in dem Boden Zinnitz, die höchsten Gesamtporenvolumina auf. Dies ist wahrscheinlich auf die grobe Ausgangsstruktur des schilfigen GPM zurückzuführen. Die **Luftkapazität** wird in beiden Böden und in allen BKS-Varianten im Vergleich zu der jeweiligen mineralischen Referenzvariante erhöht (Ausnahme BKSQ3+N). Die Erhöhung des Bio- bzw. Braunkohleanteils von 15 auf 30 Vol.-% zeigt in dem Boden Welzow keinen Einfluss auf die Luftkapazität. Allerdings ist in dem Boden Zinnitz eine deutliche Zunahme der Luftkapazität zu verzeichnen. In dem Boden Zinnitz steigt die Luftkapazität weniger an als in dem Boden Welzow, wenn dem BKS Gips zugesetzt wird. Die Luftkapazität in dem Boden Welzow nimmt mit der Verlängerung der Fermentationsdauer und Erhöhung der Fermentationstemperatur tendenziell ab, während in dem Boden Zinnitz eine Zunahme der Luftkapazität zu verzeichnen ist. Die BKS-Varianten mit dem Substitut Gewässerpflegematerial weisen in beiden Böden, insbesondere aber in dem Boden Zinnitz, die höchsten Luftkapazitäten auf.

In dem **Bodensäulenversuch** wird das **GPV** in dem Oberboden Welzow mit beiden BKS-Gaben erhöht, jedoch ist die Erhöhung bei einer Gabenhöhe von 30 t/ha stärker

als mit der Gabe von 90 t/ha. In dem Oberboden Zinnitz ist eine Erhöhung des GPV nur mit einer Gabe von 90 t BKS15/ha zu verzeichnen. Die Gabenhöhe von 30 t BKS15/ha zeigt hier keinen Effekt. Die **Luftkapazität** in dem Oberboden Welzow wird nur durch die Gabe von 30 t/ha BKS15 tendenziell erhöht, während die Gabenhöhe von 90 t/ha BKS15 eine deutliche Verringerung der Luftkapazität bewirkt. In dem Oberboden Zinnitz wird die Luftkapazität mit Erhöhung der BKS-Gabe gesteigert. Allerdings streuen die Werte der Variante 30 BKS15 sehr stark. Der Boden Welzow weist in dem **Lysimeterversuch** nur in der Variante 3x30 BKS15 eine tendenzielle Erhöhung des GPV und der Luftkapazität gegenüber Varianten MIN und 90 BKS15 auf. Der Braunerde-Podsol wurde in der betrachteten Zeitspanne des Lysimeterversuches nicht bodenphysikalisch untersucht.

Die Literatur belegt, dass die hochporöse Struktur der Biokohlen (Downie et al., 2009) das Porenvolumen des Bodens beeinflussen und es vergrößern (Abel et al., 2013; Devereux et al., 2012; Ventura et al., 2013) kann. Allerdings beziehen sich die Quellen für die Wirkung von Biokohlen in Böden in der Regel auf das GPV und nicht explizit auf die Luftkapazität. Es ist aber davon auszugehen, dass Biokohle in Abhängigkeit von ihren Ausgangsstoffen und ihrer Herstellung sowie den vorherrschenden Bodenbedingungen auch die Luftkapazität des Bodens beeinflusst (Abel et al., 2013; Downie et al., 2009; Haubold-Rosar et al., 2016). Zudem sind auch Komposte für ihre positive Wirkung auf das GPV (Aggelides und Londra, 2000; Amlinger et al., 2003; Ebertseder und Gutser, 2003; Timmermann et al., 2003) sowie für eine Verbesserung der Luftkapazität Aranyos et al. (2016); Ebertseder und Gutser (2003), Haber et al. (2008) und Tenholtern (1997) bekannt.

### 5.1.3 Nutzbare Feldkapazität und Feldkapazität

Die Wasserspeicherung der Böden ist für die landwirtschaftliche Nutzung von herausragender Bedeutung. Neben der Wasserhaltekapazität in g H<sub>2</sub>O/g Boden-TS und der Feldkapazität (Vol.-%, Poren < 50 µm), ist die nutzbare Feldkapazität (Vol.-% Poren 0,2 - 50 µm) entscheidend zur Bewertung des Bodenwasserhaushaltes und der Ertragsfähigkeit von Böden (Ad-Hoc-AG Boden, 2005). Letztere gibt den Vorrat an pflanzenverfügbarem Wasser an und ist daher für die Beurteilung der Ertragsfähigkeit von Böden von besonderer Bedeutung.

In dem **Gefäßversuch I** nimmt die nutzbare Feldkapazität (nFK) des Bodens Welzow mit steigenden BKS-Gaben im Vergleich zu der mineralischen Referenzvariante um bis zu 6 Vol.-% (240 BKS15) zu (Rademacher und Haubold-Rosar, 2013). Die nFK des gewachsenen Bodens Zinnitz, der eine deutlich höhere Ausgangs-nFK aufweist, wird durch den Einsatz der BKS nicht beeinflusst bzw. im Fall der Variante 240 BKS15 ten-

denziell verringert. Es sind zudem in beiden Böden keine Unterschiede zwischen dem BKS15 und BKS30 feststellbar.

In dem **Gefäßversuch II** bewirkt die BKS-Applikation von 30 t/ha eine tendenzielle Erhöhung der nFK auf beiden Böden. Der Effekt ist in den BKS mit dem Substitut Braunkohle etwas deutlicher ausgeprägt. Die Steigerung der BKS-Gabenhöhe als auch des Kohleanteils in dem BKS führen zu einer tendenziellen Reduzierung der nFK in beiden Böden. Der Zusatz von Gips zu dem BKS reduziert in dem Boden Welzow die nFK tendenziell. Die Veränderung der Fermentationsparameter, insbesondere in Kombination mit dem Substitut GPM, erhöht die nFK beider Böden tendenziell auf das Niveau der mineralischen Referenzvariante.

In dem **Bodensäulenversuch** liegen die Feldkapazität (FK) und die nFK des Bodens Welzow auf einem deutlich geringeren Niveau als die des Bodens Zinnitz. Im Oberboden (0 - 25 cm) Welzow wird die FK und nFK mit Erhöhung der BKS-Applikation gesteigert. In dem Oberboden Zinnitz kann kein Effekt auf die FK und nFK durch die BKS- Applikation festgestellt werden.

In dem **Lysimeterversuch** kann durch die dreimalige Gabe von 30 t/ha BKS15 die nFK des Oberbodens Welzow tendenziell gegenüber der mineralischen Referenzvariante und der einmaligen Gabe von 90 t/ha BKS15 erhöht werden.

In dem Boden Welzow wird in allen Versuchen durch den BKS-Einsatz die nFK bzw. FK eher erhöht, während in dem Boden Zinnitz eher keine Effekte, aber auch tendenziell reduzierende und erhöhende Einflüsse festzustellen sind. Auch in der Literatur finden sich in Abhängigkeit vom Boden sowohl positive als auch negative Effekte auf die nFK, FK und Wasserhaltekapazität nach dem Einsatz von organischen Stoffen. Eine Verbesserung der Wasserhaltekapazität nach der Gabe von Biokohle wird in der Literatur für verschiedene Gabenhöhen und Böden beschrieben (Abel et al., 2013; Glaser et al., 2015; Jeffery et al., 2011; Karhu et al., 2011; Novak et al., 2009; Tryon, 1948). Gaskin et al. (2007) erzielen erst mit einer Gabenhöhe von 88 t/ha Biokohle eine signifikante Steigerung der Wasserhaltekapazität. Abel et al. (2013) stellen einen deutlich größeren Effekt der Biokohle auf die nFK in dem sandigen Versuchsboden als in dem lehmigen Versuchsboden fest. Sohi et al. (2010) vermuten durch Biokohlegaben langfristig positive Effekte auf die Wasserhaltekapazität in sandigen Böden mit einem hohen Grobporenanteil, neutrale Effekte in Böden die eine mittlere Körnung aufweisen sowie eher negative Auswirkungen in tonreichen Böden.

Die Kompostanwendung ergibt je nach Boden und Gabenhöhe sowohl Anstiege als auch tendenzielle Rückgänge der nutzbaren Feldkapazität (Timmermann et al., 2003). Einen signifikanten Anstieg der Feldkapazität nach der Kompostanwendung können Aggelides und Londra (2000) nur in dem Lehmboden nachweisen. Tenholtern (1997)

findet erst bei einer Gabenhöhe von 360 t Kompost/ha eine signifikante Erhöhung des Mittelporenvolumens (nFK) in einem Kultsol aus Löß, während Ebertseder und Gutser (2003) keine Beeinträchtigung der Mittelporen und Feinporen durch die Kompostgabe feststellen. Auch Haber et al. (2008) bestätigen nach langjähriger Kompostanwendung mit praxisüblichen Mengen von 20 - 30 t/ha eine signifikante Verbesserung der Wasserhaltekapazität und der nFK insbesondere auf mittleren und schweren Böden.

Die Literaturergebnisse lassen auch für die gemeinsame Applikation von Kompost und Biokohle und auch in Form eines Biokohlesubstrates einen Anstieg der Wasserhaltekapazität, der FK und der nFK in Abhängigkeit vom Ausgangsstandzustand des Bodens erwarten. Ullum (2017) finden eine tendenziell erhöhte maximale Wasserhaltekapazität, wenn den verwendeten Substraten Biokohle zugesetzt war. Auch Glaser et al. (2002) beobachten in der Terra Preta do Indio eine um 18 % erhöhte Wasserhaltekapazität im Vergleich zu den umliegenden ärmeren Böden ohne Kohle. Bereits die einfache Vermischung von Biokohle mit Kompost und deren gemeinsame Applikation erzielt positive synergistische Effekte auf die pflanzenverfügbare Wasserhaltekapazität bzw. die nutzbare Feldkapazität in einer schwach lehmigen Braunerde in einem Feldversuch (Liu et al., 2012). Auch Nadeem et al. (2017) beobachten eine verbesserte Toleranz von künstlich erzeugtem Trockenstress für Gurkenpflanzen unter kontrollierten Bedingungen nach der gemeinsamen Applikation von Kompost und Biokohle.

#### **5.1.4 Totwassergehalt**

In dem **Gefäßversuch I** nimmt der Totwassergehalt (TW) mit steigenden BKS-Gaben auf beiden Böden sowohl mit dem BKS15 als auch mit dem BKS30 deutlich zu, wobei die Erhöhung des TW in dem Boden Welzow tendenziell stärker ist als in dem Boden Zinnitz.

Auch in dem **Gefäßversuch II** bewirkt die BKS-Applikation eine Erhöhung des TW in beiden Versuchsböden, die durch die Anhebung der Gabenhöhe von 30 auf 90 t/ha noch verstärkt wird. Der Effekt ist in dem Boden Welzow tendenziell deutlicher als in dem Boden Zinnitz. Die Substitution der Biokohle mit der Braunkohle führt ebenfalls zu einer tendenziellen Erhöhung des TW. Die Erhöhung des Kohleanteils in den BKS bewirkt einen tendenziellen Rückgang des TW in beiden Böden. Der Gipszusatz in den BKS führt sowohl zu Erhöhungen als auch zu Reduktionen des TW in beiden Böden. Die Kombination von Gips mit dem Substitut GPM zeigt eine Erhöhung des TW in beiden Böden. Ein Effekt durch die Variation der Fermentationsparameter ist nicht feststellbar.

In dem **Bodensäulenversuch** ist eine Steigerung des TW mit Erhöhung der BKS-Gabe in dem Oberboden Welzow feststellbar. In dem Oberboden Zinnitz ist eine tendenzielle Reduktion des TW mit Erhöhung der BKS-Gabe feststellbar.

In dem **Lysimeterversuch** ist der TW der Variante 90 BKS15 tendenziell erhöht gegenüber der mineralischen Referenzvariante und der Variante 3x30 BKS15.

Der Einsatz von Biokohle erzeugt in zwei unabhängigen Versuchen von Ventura et al. (2013) und Devereux et al. (2012) eine Erhöhung des GPV zugunsten eines erhöhten TW-Gehaltes im Boden. Allerdings führt die Verwendung von Kompost nach Ebertseder und Gutser (2003) nicht zu einer Beeinträchtigung der Mittel- und Feinporen und damit des TW. Für die Kombination von Biokohle und Kompost liegen nach bisherigem Stand noch keine Untersuchungen zu deren Auswirkungen auf den TW im Boden vor. Es ist aber davon auszugehen, dass die Effekte in Abhängigkeit von dem Boden und der Zusammensetzung der Biokohlesubstrate ähnlich zu dieser Untersuchung sowohl zu Erhöhungen als auch zu Reduzierungen des TW führen.

### **5.1.5 Fazit**

In allen Versuchen wird durch die Verwendung der BKS die Trockenrohdichte tendenziell reduziert. Dies geht mit einer Steigerung des Gesamtporenvolumens um bis zu 16 % (Welzow) bzw. 24 % (Zinnitz) bei einer Gabenhöhe von 240 t/ha BKS15 einher. Der Boden Welzow weist eine hohe Luftkapazität auf, die durch die BKS-Gaben sowohl erhöht (GII) als auch verringert (GI) wird. Der Ausgangswert des Bodens Zinnitz ist hinsichtlich der Luftkapazität geringer, dementsprechend steigern die BKS-Gaben in dem Boden Zinnitz die Luftkapazität (GI, GII, BS). In dem Gefäßversuch II fallen in dem Boden Zinnitz vor allem die BKS mit GPM durch ihre erhöhende Wirkung auf die Luftkapazität auf. Der frisch verkippte Rohboden Welzow, in dem noch keine Bodenentwicklung und kein Humusaufbau erfolgt ist, reagiert in den Versuchen auf die BKS-Gaben mit einer Erhöhung der Feldkapazität und der nutzbaren Feldkapazität (GI, (GII), BS, Lys). Der gewachsene Ackerboden weist hingegen deutlich höhere Ausgangswerte hinsichtlich der nutzbaren Feldkapazität auf, so dass hier keine weitere Steigerung erfolgt (GI, GII, BS). Der TW beider Böden wird in den Gefäßversuchen I und II durch den BKS-Einsatz erhöht, wobei die Steigerung der applizierten BKS-Menge den TW erhöht, während die volumetrische Erhöhung des BK-Anteils eher eine Reduzierung des TW bewirkt. Der Boden Welzow reagiert zudem in dem Bodensäulen- und in dem Lysimeterversuch auf die BKS-Gabe mit einer Erhöhung des TW.

Die Verbesserung des Wasserhaushaltes durch den Einsatz von BKS kann nur für den Kipprohboden Welzow bestätigt werden. In dem Ackerboden Zinnitz ist keine nennenswerte Verbesserung des Wasserhaushaltes zu verzeichnen. In beiden Böden

kommt es teilweise zu unerwünschten Veränderungen wie der Erhöhung des TW. Eine Aussage zur Dauerhaftigkeit der Beeinflussung des Wasserhaushaltes durch die BKS lässt sich aufgrund der kurzen Versuchszeiträume nicht treffen.

## **5.2 Beeinflussung von Bodenreaktionen, Austauschkapazität und Basensättigung der Böden durch den Einsatz von Biokohlesubstraten**

### **5.2.1 Bodenreaktion**

Der Boden Welzow weist mit 7,6 (Tabelle 6) einen sehr schwach alkalischen (Ad-Hoc-AG Boden, 2005) pH-Wert im Ausgangsboden auf. Dieser erfährt in allen Versuchen (**GI, GII, BS, Lys**) keine Beeinträchtigung durch die BKS-Gaben mit der Ausnahme, dass im Gefäßversuch II sich eine tendenzielle Verringerung des pH-Wertes in der BKS-Variante mit 30 Vol.-% Braunkohle (Q4) abzeichnet. Dies begründet sich durch den stark sauren pH-Wert von 4,1 (Tabelle 12) der Braunkohle, der auch geringere pH-Werte in den BKS mit Braunkohle nach sich zieht (Tabelle 43). Zinati et al., 2001 beschreiben eine Reduzierung des hohen pH-Wertes von 8,1 in einem Kalkboden um bis zu 0,4 pH-Einheiten durch Kompostanwendungen.

Der Boden Zinnitz mit einem schwach sauren Ausgangs-pH-Wert von 5,8 wird mit den BKS-Gaben in allen Versuchen (**GI, GII, BS, Lys**) angehoben. Die schrittweise Erhöhung der BKS-Gaben bewirkt auch eine entsprechende Steigerung der pH-Werte (GI, GII, BS). Im Gefäßversuch II zeigt sich in der BKS-Variante mit 30 Vol.-% Braunkohle (Q4) ein gegenüber der Referenzvariante unveränderter pH-Wert. In dem Lysimeterversuch wird deutlich, dass die hohe Anfangsgabe von 90 t/ha den pH-Wert deutlich anhebt als die gestaffelte Gabe (3x30 BKS15). Die schrittweise Applikation des BKS (3x30 BKS15) bewirkt einen kontinuierlichen Anstieg des pH-Wertes im Versuchsverlauf. Auch Ullum (2017) findet eine leichte pH-Steigerung um 0,1 bis 0,6 Einheiten nach der Anwendung von Biokohlesubstraten im Vergleich zu deren Pendant ohne Biokohle. Eine Anhebung des pH-Wertes beschreiben auch Glaser et al. (2001) und Glaser et al. (2002) in der Terra Preta do Indio, die sie auf die Zufuhr von Holzkohle zurückführen. In verschiedenen Versuchen bestätigt sich eine positive Beeinflussung des Boden pH-Wertes durch Biokohlezugabe (Glaser et al., 2015; Schulz und Glaser, 2012). Schulz et al. (2014) führen allerdings den positiven Einfluss auf den pH-Wert in einem Versuch mit Biokohle und Kompost, vornehmlich auf die Kompostapplikation zurück, wobei die Effekte auf dem Sandboden deutlicher waren als auf dem Lehmbo-



den. Auch die alleinige Applikation von Komposten führt zu erhöhten pH-Werten (Haber et al., 2008; Kahle und Belau, 1998; Martins und Kowald, 1988).

### 5.2.2 Austauschkapazität und Basensättigung

Die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität ( $KAK_{pot}$ ) sowie die Berechnung der Basensättigung erfolgt nur in den beiden Gefäßversuchen. In dem **Gefäßversuch I** steigt die  $KAK_{pot}$  mit zunehmender Gabenhöhe der BKS15 und BKS30 in beiden Böden, tendenziell stärker in dem Boden Welzow, an. Die Basensättigung des Bodens Welzow wird durch die BKS-Gabe nicht beeinträchtigt. In dem Boden Zinnitz wird die Basensättigung durch die Applikation der BKS deutlich erhöht. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Höhe der BKS-Gabe und der Basensättigung wird allerdings nicht deutlich.

Auch in dem **Gefäßversuch II** zeigt sich eine Steigerung der  $KAK_{pot}$  mit der Applikation der BKS in beiden Böden. Die Erhöhung der  $KAK_{pot}$  ist in den Varianten mit dem Substitut Braunkohle stärker als in den BKS-Varianten mit Biokohle. Zudem bewirkt die Variation der Fermentationsparameter der BKS zu einer Steigerung der  $KAK_{pot}$ . In dem Boden Zinnitz erhöht sich die  $KAK_{pot}$  durch den Austausch des Laubkompostes gegen das GPMII. Die BKS-Gaben bewirken in einzelnen Varianten in dem Boden Welzow eine leichte Reduzierung der Basensättigung. Insgesamt verbleibt die Basensättigung in den meisten Varianten bei 100 %, so dass keine Beeinflussung durch die BKS-Gaben erkennbar ist. In dem Boden Zinnitz ist eine generelle Erhöhung der Basensättigung festzustellen. Diese ist in den Varianten mit dem Substitut Braunkohle in dem BKS tendenziell stärker.

Die Ergebnisse decken sich mit den bisherigen Versuchsergebnissen, so bescheinigen auch Schulz und Glaser (2012) der Biokohle einen positiven Effekt auf die KAK und die Basensättigung. Glaser et al. (2015) bestätigen eine erhöhte KAK ab einer Gabenhöhe von 10 t Biokohle/ha. N-modifizierte Braunkohle weist ebenfalls einen positiven Effekt auf die KAK und die Basensättigung auf (Katzur et al., 2003). Die Applikation von Kompost kann ebenfalls zur Erhöhung der  $KAK_{pot}$  und der Basensättigung führen (Kahle und Belau, 1998). Auch die Terra Preta do Indio fällt u.a. durch eine gesteigerte Kationenaustauschkapazität ( $KAK_{pot}$ ) auf, die auf die Zufuhr von Holzkohle zurückzuführen ist (Glaser et al., 2001; Glaser et al., 2002).

### 5.2.3 Fazit

Der pH-Wert und die Basensättigung des Bodens Welzow werden durch die BKS-Gabe kaum beeinträchtigt. In einzelnen Varianten tritt eine tendenzielle Reduzierung in beiden Parametern auf. Die  $KAK_{pot}$  erhöht sich durch die BKS-Gabe deutlich. In dem

Boden Zinnitz hebt die BKS-Gabe den pH-Wert, die Basensättigung und auch die  $KAK_{pot}$  an. Die Anhebung der  $KAK_{pot}$  in beiden Böden lässt Rückschlüsse auf eine Verbesserung des Nährstoffhaushaltes zu. Die Zusammensetzung der BKS und deren Parameter spielen neben dem Ausgangszustand des Bodens eine entscheidende Rolle.

### **5.3 Beeinflussung der Humusgehalte und -eigenschaften der Böden durch den Einsatz von Biokohlesubstraten**

Humus bezeichnet die Gesamtheit der toten organischen Substanz eines Bodens. Die Beschreibung der Humusgehalte bzw. -eigenschaften erfolgt maßgeblich über den  $C_{org}$ -Gehalt und das C/N-Verhältnis. Aus dem  $C_{org}$ -Gehalt errechnet sich der Humusgehalt durch Multiplikation mit dem Faktor 2,0 (Blume et al., 2010). Die Umsetzbarkeit der organischen Substanz bzw. des Humus wird durch den heißwasserlöslichen Kohlenstoff beschrieben (Schulz, 1997).

#### **5.3.1 Organische Bodensubstanz**

Die organische Bodensubstanz (OBS) wurde in den Gefäßversuchen I und II direkt über den Glühverlust bestimmt. In dem **Gefäßversuch I** steigt die organische Bodensubstanz in beiden Böden mit Erhöhung der BKS15-Gabe auf 240 t/ha um bis zu 448 % (W) bzw. 300 % (Z) an. Die Steigerung der OBS durch das BKS30 ist in dem Boden Welzow um 0,8 % stärker als mit dem BKS15. In dem Boden Zinnitz erhöhen beide BKS die OBS gleichermaßen.

Auch in dem **Gefäßversuch II** zeigt sich in beiden Böden eine generelle Zunahme der OBS mit der Applikation der BKS. Sowohl die Erhöhung der BKS-Gabe als auch die Erhöhung des Biokohlegehaltes in der BKS bewirken einen Anstieg der OBS in beiden Böden. Die Substitution der Biokohle durch Braunkohle führt in beiden Böden zu einer Steigerung der OBS. Allerdings tritt bei Erhöhung des Braunkohlegehaltes auf 30 Vol.-% in dem Boden Zinnitz eine Reduktion der OBS auf. Der Zusatz von Gips in den BKS hat einen geringen positiven Einfluss auf die OBS in dem Boden Welzow, während in dem Boden Zinnitz kein Effekt feststellbar ist. Die Substitution des Laubkompostes mit GPM, der Zusatz von Silage sowie die Erhöhung der Fermentations-temperatur bzw. Verlängerung der Fermentationsdauer bewirken eine Zunahme der OBS in den Versuchsböden.

Die generelle Steigerung der OBS begründet sich in der Zufuhr zusätzlicher umsetzbarer Substanz mit den BKS, wobei die Wertschwankungen des Gefäßversuches II auf die Variation der BKS-Mischungsverhältnisse in der TS zurückzuführen sind. Die bei-

den Versuchsböden enthalten in geringen Umfang Ton ( $W = 5 \%$ ,  $Z = 4 \%$ ) und der Boden Welzow zudem eine geringe Menge Karbonat ( $0,9 \%$ ). Nach Körschens (2010) und Kuntze et al. (1994) ist eine direkte Bestimmung der OBS nur für ton- und karbonatfreie Böden durch Veraschung möglich. Eine Korrektur des Tongehaltes des Bodens ist durch Abzug von  $0,1 \text{ M.}\%$  je  $1 \text{ M.}\%$  Ton möglich (DIN19684-3, 2000). Die Werte der OBS sind, insbesondere für den Ackerboden Zinnitz, teilweise deutlich höher als die  $C_{\text{org}}$ -Gehalte. Bei der Bestimmung der OBS wird das Edaphon miterfasst und führt damit zu einer Überschätzung der Werte sowie zu einem höheren Bestimmungsfehler (Kuntze et al., 1994).

### 5.3.2 Organischer Kohlenstoff

In beiden Böden des **Gefäßversuches I** sind zunehmende  $C_{\text{org}}$ -Gehalte mit der Steigerung der BKS15-Gaben auf  $240 \text{ t/ha}$  um bis zu  $1340 \%$  ( $W$ ) bzw.  $245 \%$  ( $Z$ ) zu verzeichnen. Der  $C_{\text{org}}$ -Gehalt der Böden wird durch die Verwendung des BKS30 um durchschnittlich etwa  $0,3 \%$   $C_{\text{org}}$  stärker erhöht als mit dem BKS15. Dies ist auf die um  $8,4 \text{ M.}\%$  höheren  $C_{\text{org}}$ -Gehalte in dem BKS30 im Vergleich zu dem BKS15 zurückzuführen.

Der Einsatz der BKS führt auch in dem **Gefäßversuch II** zu einer generellen Erhöhung der  $C_{\text{org}}$ -Gehalte in den Böden. Erhöhend auf den  $C_{\text{org}}$ -Gehalt beider Böden wirken sich insbesondere die Steigerung der BKS-Gabe und die Erhöhung des Biokohleanteils in dem BKS aus. Die Substituierung der Biokohle durch Braunkohle in dem BKS führt zu einer weiteren Steigerung des  $C_{\text{org}}$ -Gehaltes in beiden Böden Welzow. Die anteilige Erhöhung der Braunkohle in dem BKS führt in dem Boden Welzow zu einer weiteren Steigerung des  $C_{\text{org}}$ -Gehaltes, während in dem Boden Zinnitz eine tendenzielle Reduktion des  $C_{\text{org}}$ -Gehaltes festzustellen ist. Die Abmessung der Einzelkomponenten zur Substratherstellung erfolgte volumetrisch. Da die Schüttdichte und die TS der Braunkohle im Vergleich zur Biokohle doppelt so hoch sind, wurde den BKS deutlich mehr Masse an Braunkohle hinzugegeben. Zudem weist die Braunkohle einen um  $9,5 \text{ M.}\%$  geringeren  $C_{\text{org}}$ -Gehalt auf als die Biokohle. Ein Einfluss des Zusatzes Gips auf den  $C_{\text{org}}$ -Gehalt ist nicht feststellbar. Durch die Substitution des Laubkompostes mit GPMII ist in beiden Böden eine Zunahme der  $C_{\text{org}}$ -Gehalte zu verzeichnen. Dies ist vermutlich auf die um  $5,4 \text{ M.}\%$  höheren  $C_{\text{org}}$ -Gehalte des GPMII zurückzuführen, welche auch im fertigen BKS auffindbar sind. In dem Boden Welzow bewirkt die Verwendung des GPMIV im Vergleich zu dem GPMII eine Reduktion des  $C_{\text{org}}$ -Gehaltes, obwohl der  $C_{\text{org}}$ -Gehalt des GPMIV  $2,1 \text{ M.}\%$  höher ist als der des GPMII. In dem Boden Welzow zeigen die BKS mit dem Zusatz Silage keinen Effekt auf den  $C_{\text{org}}$ -Gehalt. Die Variation der Fermentationsparameter hat auf die  $C_{\text{org}}$ -Gehalte der BKS keinen Einfluss. Die so be-

handelten BKS wirken in dem Boden Welzow sowohl reduzierend als auch erhöhend auf den  $C_{org}$ -Gehalt. In dem Boden Zinnitz ist kein Effekt der BKS mit dem Zusatz von Silage, der Substitution von GPMII mit GPMIV und der Erhöhung der Fermentations-temperatur festzustellen. Die Verlängerung der Fermentationsdauer sowie die Veränderung beider Fermentationsparameter bewirken eine Steigerung der  $C_{org}$ -Gehalte in dem Boden Zinnitz.

In dem **Bodensäulenversuch** steigt ebenfalls der  $C_{org}$ -Gehalt im Boden durch die Applikation des BKS15, vor allem in der Variante 90 BKS15. In dem Boden Welzow ist die Steigerung des  $C_{org}$ -Gehaltes in der Variante 90 BKS15 um 0,2 % höher als in dem Boden Zinnitz.

Auch in dem **Lysimeterversuch** zeigt sich eine Zunahme der  $C_{org}$ -Gehalte durch die Applikation des BKS15. In beiden Böden bewirkt die zeitlich gestaffelte dreimalige BKS15-Gabe von 30 t/ha einen kontinuierlichen Anstieg des  $C_{org}$ -Gehaltes. Die einmalige Gabe von 90 t/ha BKS15 bewirkt in dem Boden Welzow einen gleichmäßig erhöhten  $C_{org}$ -Gehalt, während dieser in dem Braunerde-Podsol im Versuchsverlauf tendenziell abnimmt.

Die Erhöhung des  $C_{org}$ -Gehaltes beruht auf der Zufuhr organischer Substanz mit der BKS-Gabe und setzt sich aus den umsetzbaren organischen Bestandteilen des Kompostes als auch aus dem relativ inerten C (Brodowski, 2005) der Biokohle zusammen. Der Anteil des inerten C bzw. des sogenannten „black carbon“ im Boden, der aus früheren Verbrennungsprozessen oder auch durch den gezielten Einsatz von Holz- oder Biokohle stammt, kann mit geeigneten Analysemethoden quantifiziert werden (Brodowski, 2005; Glaser et al., 2000). Sowohl eine Kompostdüngung (Kahle und Belau, 1998) als auch eine Biokohledüngung (Lorenz und Lal, 2014) heben den  $C_{org}$ -Gehalt des Bodens an. Kammann et al. (2016) und Fischer und Glaser (2012) empfehlen die gemeinsame Applikation von Biokohle und nährstoffreichen organischen Bodenverbesserungsmitteln, um Synergieeffekte hinsichtlich der Bodenfruchtbarkeit und Ertragsfähigkeit zu erzielen. Die Kombination von Biokohle und Kompost zeigt eine erhöhende Wirkung auf den  $C_{org}$ -Gehalt (Liu et al., 2012). Zudem belegt die Literatur, dass durch die Holz- bzw. Biokohleeinmischung in Böden auch langfristig der  $C_{org}$ -Gehalt, wie bspw. in ehemaligen Köhlerflächen (Borchard et al., 2014) oder der Terra Preta do Indio (Glaser et al., 2001; Glaser et al., 2002), erhöht wird. Allerdings beschreibt Körschens (2010), dass die Differenz zwischen „ungedüngt“ und „optimal versorgt“ in Sandböden teilweise unter 0,2 %  $C_{org}$  liegt. Selbst nach extremen Bewirtschaftungswechseln zeigt sich im Jahresverlauf teilweise eine Veränderung des  $C_{org}$ -Gehaltes von weniger als 0,01 %. Da der  $C_{org}$ -Gehalt bedingt durch die hohe räumliche und zeitliche Variabilität großen Schwankungen unterliegt, empfiehlt Körschens (2010)

die Annahme einer Fehlergrenze von  $> 0,1\%$  und der langfristigen Beobachtung über Zeiträume von 20 Jahren. Die vorliegenden Untersuchungen können nur eine kurzfristige Erhöhung der  $C_{\text{org}}$ -Gehalte im Boden durch die Verwendung der BKS belegen. Auch muss berücksichtigt werden, dass meist nur eine einfache Wiederholung ( $n = 1$ ) für die Bestimmung des  $C_{\text{org}}$ -Gehaltes vorliegt.

### 5.3.3 Kohlenstofffraktionen

Die Ermittlung der Kohlenstofffraktionen erfolgte in allen Versuchen in einfacher Wiederholung ( $n = 1$ ).

In dem **Gefäßversuch I** ist eine Zunahme der C-Gehalte aller Kohlenstofffraktionen mit Erhöhung der BKS-Gabe zu verzeichnen. Die wasser- und heißwasserlöslichen Fraktionen nehmen mit Steigerung der Gabenhöhe kontinuierlich zu. Dies begründet sich durch die steigende Zufuhr an kompostiertem und fermentiertem Grünschnitt mit dem BKS. Der pyrophosphatlösliche Kohlenstoff ( $C_{\text{pyro}}$ ) stellt mengenmäßig den größten Anteil an den Kohlenstofffraktionen dar. Dessen prozentualer Anteil ist allerdings mit Erhöhung der Applikationsmenge zugunsten des heißwasserlöslichen Kohlenstoffs ( $C_{\text{hwl}}$ ) tendenziell rückläufig. Insbesondere der Anteil des  $C_{\text{hwl}}$  ist für die Einschätzung der Versorgung mit umwandelbaren C relevant. So kann der  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalt des Bodens Welzow mit einer Gabe von 120 t/ha BKS15 bzw. BKS30 in den anzustrebenden Bereich von 250 - 300 mg/kg angehoben werden (SCHULZ, 1997). Der  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalt des Bodens Zinnitz ist bereits in der mineralischen Referenzvariante als hoch einzuordnen (SCHULZ, 1997) und erfährt durch die BKS-Applikation eine weitere Erhöhung.

Auch in dem **Gefäßversuch II** steigen die C-Gehalte aller Kohlenstofffraktionen mit der Applikation der BKS an. Der sehr geringe  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalt des Bodens Welzow kann durch die BKS in höhere Gehaltsstufen nach SCHULZ (1997) angehoben werden. Der  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalt des Bodens Zinnitz ist bereits in der mineralischen Referenzvariante als hoch einzuordnen (SCHULZ, 1997) und erfährt durch die BKS-Applikation eine weitere Erhöhung. Es ist ein Einfluss der BKS-Zusammensetzung auf die  $C_{\text{pyro}}$ - und  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte erkennbar. Die Substitution der Biokohle mit der Braunkohle (Q1 und Q3) und des Laubkompostes mit GPMII und Silage (Q1 und Q13) führen zu einer quantitativen Erhöhung des pyrophosphatlöslichen C.

In dem **Bodensäulenversuch** sind 2,5 Jahre nach der Einmischung der BKS noch höhere  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte in der ersten Tiefenstufe des Bodens Welzow zu verzeichnen. In der zweiten Tiefenstufe nehmen die  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte tendenziell zu. Allerdings tritt keine Verbesserung in der Gehaltsklasse nach SCHULZ (1997) auf. In dem Boden Zinnitz ist ein tendenzieller Rückgang der  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte in den ersten beiden Tiefenstufen in den Varianten 30 BKS15 und 90 BKS15 im Vergleich zu der mineralischen Referenzvarian-

te zu verzeichnen. Die  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte der Variante 90 BKS15 sind tendenziell höher als die der Variante 30 BKS15. Die  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte des Oberbodens Zinnitz sind nach SCHULZ (1997) in den Bereich II (hoch, Variante MIN) und den anzustrebenden Bereich III (mittel, Variante 30 BKS15 und 90 BKS15) einzuordnen. Die Werte der zweiten Tiefenstufe sind nach SCHULZ (1997) in den Bereich V (sehr gering) einzustufen.

In dem **Lysimeterversuch** erfolgt in dem Betrachtungszeitraum keine Bestimmung der Kohlenstofffraktionen.

Steigende  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte finden auch Haber et al. (2008) in langjährigen Feldversuchen mit gestaffelter Kompostdüngung mit bis zu 20 t/ha Kompost. In dem parallelen Feldversuch wurden im Herbst 2011 ebenfalls die Kohlenstofffraktionen an ausgewählten Varianten bestimmt. Die  $C_{\text{wl}}$ - und die  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte, insbesondere aber die  $C_{\text{pyro}}$ -Gehalte, sind in den Gefäßversuchen deutlich höher als die in den parallelen LaTerra-Feldversuchen in der Lausitz (Weiß et al., 2013). Ursache ist hierfür vermutlich, dass der Feldversuch stärker die Heterogenität der Fläche berücksichtigt, da die Parzellen randomisiert auf der gesamten Versuchsfläche angeordnet sind, während der Boden für die Gefäßversuche an einer Stelle auf der jeweiligen Versuchsfläche entnommen wurde. Zudem können durch die Bearbeitung mit Feldgeräten eher Materialverschleppungen zwischen den Parzellen auftreten.

#### 5.3.4 Gesamtstickstoff

In dem **Gefäßversuch I** steigen die  $N_t$ -Gehalte beider Böden mit Steigerung der BKS-Gaben kontinuierlich an. Das Ausgangsniveau des Bodens Welzow ist nur 0,01 %  $N_t$  sehr gering. Dieses wird um bis zu 0,11 %  $N_t$  (240 t/ha BKS15) angehoben. Der  $N_t$ -Gehalt des Bodens Zinnitz wird um bis zu 0,05 %  $N_t$  (120 t/ha BKS15) erhöht auf einen  $N_t$ -Gehalt von 0,13 %. Die  $N_t$ -Gehalte, vor allem des Bodens Welzow, werden in allen Düngungsstufen durch das BKS15 um 0,01 % stärker angehoben als durch das BKS30. Dies ist auf den höheren Anteil der organisch umsetzbaren Biomasse sowie die daraus resultierende höhere N-Fracht in dem BKS15 zurückzuführen.

In dem **Gefäßversuch II** wird ebenfalls deutlich, dass der  $N_t$ -Gehalt des Bodens Welzow ein wesentlich geringeres Niveau aufweist als der Boden Zinnitz. Die Applikation der BKS erhöht in allen geprüften Varianten den  $N_t$ -Gehalt über das Niveau der mineralischen Referenzvariante. Die Erhöhung der BKS-Gabe von 30 auf 90 t/ha bewirkt in beiden Böden eine Steigerung des  $N_t$ -Gehaltes. Trotz der Erhöhung des Bio- und Braunkohleanteils ist in dem Boden Welzow eine weitere Zunahme des  $N_t$ -Gehaltes zu verzeichnen. In dem Boden Zinnitz ist nur bei der Steigerung des Biokohleanteils eine Erhöhung des  $N_t$ -Gehaltes zu beobachten. Bei der Erhöhung des Braunkohleanteils sinkt der  $N_t$ -Gehalt im Boden Zinnitz tendenziell ab. Die Substitution des

Laubkompostes mit GPMII sowie mit GPMIV und dem Zusatz von Silage bewirkt tendenziell höhere  $N_t$ -Gehalte in beiden Böden. Die  $N_t$ -Gehalte des GPM lagen deutlich über dem Laubkompost wie auch Krollig (2013) und Haubold-Rosar et al. (2013) beschreiben. Die hohen  $N_t$ -Gehalte sind sicher auf die zusätzliche mineralische Düngung zur Unterstützung der GPM-Kompostierung zurückzuführen (siehe Kapitel 3.2.2.1). Der Zusatz von Gips und die Variation der Fermentationsparameter zeigen keinen eindeutigen Effekt auf den  $N_t$ -Gehalt im Boden.

Der  $N_t$ -Gehalt im Oberboden Welzow steigt mit der Erhöhung der BKS-Gabe tendenziell an (**Bodensäulenversuch**). Die  $N_t$ -Gehalte des Unterbodens Welzow sind, aufgrund des technogenen Ursprungs, in allen Varianten vergleichbar (Haubold-Rosar und Gunschera, 2009). In dem Oberboden Zinnitz nimmt der  $N_t$ -Gehalt mit der Gabe von 90t/ha BKS15 tendenziell zu. In der Düngungsstufe von 30 t/ha BKS15 weist der Oberboden Zinnitz eine tendenzielle Reduktion des  $N_t$ -Gehaltes auf. Die größte Differenz des  $N_t$ -Gehaltes in dem Oberboden Zinnitz beträgt allerdings nur 0,009 % zwischen den Varianten 30 BKS15 und 90 BKS15, so dass man die  $N_t$ -Gehalte auch als gleichwertig einordnen sollte. Dafür spricht ebenfalls, dass die Werte nur einfach ( $n = 1$ ) bestimmt wurden und keine Aussagen zu Spannweiten getroffen werden können. Vom Oberboden zu den tieferliegenden Schichten nimmt der  $N_t$ -Gehalt im Boden schrittweise ab. Dies ist auf die natürliche Pedogenese und als Folge der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung zurückzuführen (Blume et al., 2010).

In dem **Lysimeterversuch** steigt der  $N_t$ -Gehalt des Bodens Welzow mit der Erhöhung der BKS-Gabe an. Die zeitlich gestaffelte dreimalige BKS15-Gabe von 30 t/ha erreicht bereits nach zwei Gaben im Juli 2012 das Niveau des  $N_t$ -Gehaltes der Variante 90 BKS15. Der  $N_t$ -Gehalt des Braunerde-Podsols ist deutlich höher als der des Bodens Welzow. Nach einer anfänglichen Erhöhung des  $N_t$ -Gehaltes in der Variante 90 BKS15 sinkt dieser im weiteren Versuchsverlauf ab. Die dreimalige Gabe von 30 t/ha BKS15 verzeichnet tendenziell ansteigende und stabile  $N_t$ -Gehalte über den Betrachtungszeitraum.

Insbesondere der Kippboden Welzow zeigt in allen Versuchen teilweise deutliche Verbesserungen der  $N_t$ -Gehalte durch die Applikation der BKS. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Schulz et al. (2014), die ebenfalls einen positiven Effekt auf den Gesamtstickstoffgehalt nach der stufenweisen Applikation gemeinsam kompostierter Biokohlekomposte in Höhe von 10, 50, 100, 150, bis auf 250 t/ha, wobei die Konzentration der Biokohle 0, 3, 5, 10 kg Biokohle/t Kompost betrug, feststellen. Auch Agegnehu et al. (2016) bestätigen erhöhte N-Gehalte in einem Feldversuch (Ferrasol) unter tropischen Bedingungen nach Kompost- und Biokohledüngung sowie deren Mischung und nach deren gemeinsamer Kompostierung im Vergleich zur Mineraldüngung. Sie führen

den erhöhten Gesamtstickstoffgehalt auf die Kompostgabe zurück (Agegnehu et al., 2016; Schulz et al., 2014). Eine Erhöhung des  $N_t$ -Gehaltes in einem Mitscherlichgefäßversuch mit mittel lehmigen Sand unter Verwendung steigender Kompostgaben von 10 bis 100 t/ha FM beschreiben auch Kahle und Belau (1998).

In dem Boden Zinnitz mit deutlich höheren Ausgangs- $N_t$ -Gehalten ist durch die Verwendung der BKS eine Erhöhung des  $N_t$ -Gehaltes im Boden bzw. kein Effekt feststellbar. Die jeweilige Zusammensetzung der BKS führt zu einer stärkeren oder geringen Erhöhung der  $N_t$ -Gehalte im Boden. Vermutlich kommt in diesem Boden aufgrund der höheren  $N_t$ -Gehalte im Boden die von DeLuca et al. (2006) beschriebene immobilisierende Wirkung der Biokohle auf den Stickstoff zum Tragen, die mit einer Reduzierung der N-Verfügbarkeit (Lehmann et al., 2003b; Lehmann und Rondon, 2006; Yao et al., 2012) einhergehen kann. Leider erfolgte die Bestimmung der  $N_t$ -Gehalte in allen Versuchen (Ausnahme GI) mit nur einer Wiederholung, so dass eine statistische Absicherung nicht möglich ist.

### 5.3.5 Stickstofffraktionen

In dem **Gefäßversuch I** sind die  $N_{hwf}$ - und  $N_{pyro}$ -Gehalte des Bodens Welzow auf einem deutlich geringeren Niveau als in dem Boden Zinnitz. Steigende BKS15- und BKS30-Gaben bewirken in dem Boden Welzow eine Erhöhung der  $N_{hwf}$ - und  $N_{pyro}$ -Gehalte. Die geringste BKS15-Gabe von 30 t/ha weist in dem Boden Welzow einen tendenziell geringeren  $N_{hwf}$ - und  $N_{pyro}$ -Gehalt auf als die mineralischen Vergleichsvarianten, während das BKS30 in dieser Düngungsstufe die  $N_{hwf}$ - und  $N_{pyro}$ -Gehalte tendenziell steigert. Den größten Anteil hat der  $N_{pyro}$ -Gehalt, der in allen BKS-Varianten (Ausnahmen: 30 BKS15 und 120 BKS15) stabil bei etwa 80 % liegt. In dem Boden Zinnitz nehmen die  $N_{hwf}$ - und  $N_{pyro}$ -Gehalte mit steigenden BKS15-Gaben zu, wobei der prozentuale Anteil des  $N_{pyro}$  tendenziell zurückgeht. Mit der Erhöhung der BKS30-Gabe nehmen in dem Boden Zinnitz die  $N_{pyro}$ -Gehalte ab, während die  $N_{hwf}$ -Gehalte ansteigen. Auch prozentual geht der  $N_{pyro}$ -Gehalt zugunsten des  $N_{hwf}$ -Gehaltes zurück.

In dem **Gefäßversuch II** weist der Boden Welzow ebenfalls deutlich geringere  $N_{wl}$ -,  $N_{hwf}$ - und  $N_{pyro}$ -Gehalte auf als der Boden Zinnitz. Die Applikation des BKS erhöht in beiden Böden die  $N_{wl}$ -,  $N_{hwf}$ - und  $N_{pyro}$ -Gehalte im Vergleich zur mineralischen Referenzvariante. Die Substitution des Laubkompostes mit GPMII und dem Zusatz von Silage (Q13) bewirkt in beiden Böden tendenziell höhere  $N_{wl}$ -,  $N_{hwf}$ - und  $N_{pyro}$ -Gehalte. Die Substitution der Biokohle mit der Braunkohle (Q3) führt in dem Boden Zinnitz zu erhöhten  $N_{pyro}$ -Gehalten, die auf die höhere Schüttdichte der Braunkohle zurückzuführen sind. In dem Boden Welzow hingegen weist die Variante mit der Biokohle (Q1) höhere  $N_{pyro}$ -Gehalte auf als die Variante mit der Braunkohle (Q3).



In dem **Bodensäulenversuch** erfolgt lediglich die Bestimmung der umsetzbaren  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte für die oberen beiden Tiefenstufen. Der Oberboden Welzow verzeichnet eine deutliche Steigerung der  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte mit Erhöhung der BKS15-Gabe. In der zweiten Tiefenstufe ist nur eine tendenzielle Steigerung der  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte erkennbar. In dem Boden Zinnitz ist die Wirkung der BKS15-Gabe auf die  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte diffus. In der Variante 30 BKS15 des Oberbodens Zinnitz tritt eine tendenzielle Reduktion der  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte auf, während eine weitere Steigerung des BKS15 auf 90 t/ha die  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte im Vergleich zur mineralischen Referenzvariante tendenziell erhöht. In der zweiten Tiefenstufe tritt in der Variante 30 BKS15 eine tendenzielle Erhöhung des  $N_{\text{hwl}}$ -Gehaltes auf. Die  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte der Varianten MIN und 90 BKS15 sind hingegen vergleichbar.

Nach jeder Ernte erfolgt in dem **Lysimeterversuch** die Bestimmung der  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte. Die sehr geringen  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte steigen in allen Varianten des Bodens Welzow im Versuchsverlauf an. Durch die BKS15-Gaben werden die  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte gegenüber der reinen Mineraldüngung um bis zu 6,1 mg/kg angehoben. Der Braunerde-Podsol weist deutlich höhere  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte auf als der Boden Welzow. Die BKS-Düngung erhöht die  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte, während die  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte der mineralischen Variante im Versuchsverlauf um etwa 2 mg/kg  $\times$  a abnehmen. Allerdings weist die Variante 90 BKS15 nach einem Anstieg um 15,5 mg/kg (2011 zu 2012) einen Rückgang um 21,3 mg/kg (2012 zu 2013) des  $N_{\text{hwl}}$ -Gehaltes auf. Die Schwankungen in der Variante 3x30 BKS15 sind etwas verhaltener.

Die  $N_{\text{wl}}$ -,  $N_{\text{hwl}}$ - und  $N_{\text{pyro}}$ -Gehalte des Bodens Welzow sind, aufgrund der bisher fehlenden Pedogenese (Haubold-Rosar und Gunschera, 2009), generell geringer als die des Bodens Zinnitz bzw. des Braunerde-Podsols. Letztere weisen insbesondere durch die landwirtschaftliche Nutzung einen höheren  $N_{\text{t}}$ -Gehalt auf, der sich auch auf die untersuchten N-Fractionen auswirkt. Der Anstieg der  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte insbesondere in dem Boden Welzow bedingt durch die BKS-Düngung wird auch in der Literatur bestätigt. So zeigen Schulz (1997) und Haber et al. (2008), dass die Zufuhr organischer Stoffe wie Stallmist und Kompost den  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte erhöht. In einem Stallmiststeigerungsversuch mit bis zu 20 t/ha  $\times$  a auf einer Löß-Schwarzerde (Bad Lauchstädt) beobachtet Schulz (1997) zunehmende  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte um bis zu 118 kg/ha. In den Feldversuchen von Haber et al. (2008) steigt der  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalt um bis zu 45 kg/ha nach einer Kompostgabe von 20 t/ha an. Landgraf et al. (2006) sehen in der heißwasserlöslichen N-Fraktion einen besseren Richtwert für die Umsetzbarkeit des organischen Materials als in der wasserlöslichen Fraktion. Schulz (1997) weist darauf hin, dass der  $N_{\text{hwl}}$  stärkeren jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt als der  $C_{\text{hwl}}$ , da mit dem  $N_{\text{hwl}}$  auch die mineralischen Stickstoffformen (Ammonium und Nitrat) erfasst werden. Diese werden durch die Jah-

resdynamik und die Aufnahme durch Pflanzen beeinflusst. Die Beprobung unserer Versuche erfolgte daher jeweils im Anschluss an die Ernte des Aufwuchses.

### 5.3.6 C/N-Verhältnisse

Nach Blume et al. (2010) liegt das C/N-Verhältnis ertragreicher Acker- und Grünlandböden in Mitteleuropa bei  $< 10 - 15$ . Lediglich das C/N-Verhältnis des Ackerbodens Zinnitz ist in diesem Bereich angesiedelt. Der Boden Welzow und der Braunerde-Podsol weisen weitere C/N-Verhältnisse auf. Durch die BKS-Düngung werden die C/N-Verhältnisse der Versuchsböden in der Regel weiter. Bilitewski und Härdtle (2013) geben für Komposte ein optimales C/N-Verhältnis entsprechend der Nährstoffzusammensetzung der Kulturböden von 15 bis 20 an, da bei höheren Werten mit einem Stickstoffentzug aus dem Boden und bei geringeren Werten mit einem Stickstoffüberschuss zu rechnen ist.

In dem **Gefäßversuch I** werden die C/N-Verhältnisse mit Erhöhung der BKS-Gaben in beiden Böden weiter. Die mineralisch gedüngte Variante weist ein C/N-Verhältnis von 15,4 (W) bzw. 11,6 (Z) auf. Dieses wird durch die schrittweise Erhöhung bis 240t BKS15/ha e auf 20,7 (W) bzw. 14,4 (Z) vergrößert. Die Varianten mit BKS30 weisen deutlich weitere C/N-Verhältnisse auf als die Varianten mit BKS15, was auf den höheren Kohleanteil in dem Substrat zurückzuführen ist. In dem Boden Welzow ist von der Verwendung des BKS30 abzuraten, da es das C/N-Verhältnis des Bodens auf 29,6 anhebt. In dem Boden Zinnitz beträgt das C/N-Verhältnis nach dem Einsatz des BKS30 20,7, so dass eine landwirtschaftliche Verwendung vertretbar ist.

In dem **Gefäßversuch II** wird das C/N-Verhältnis des Bodens Welzow durch Applikation der BKS erweitert. Die C/N-Verhältnisse bewegen sich im Bereich von 14,5 bis 31,2. Im Vergleich zu dem Boden Welzow sind die C/N-Verhältnisse in dem Boden Zinnitz enger. Sie werden durch die BKS-Gabe erweitert und liegen zwischen 13,3 und 18,1. In beiden Böden bewirkt die Steigerung des Kohleanteils und die Substitution der Biokohle mit der Braunkohle weitere C/N-Verhältnisse. Die Substitution des Laubkompostes durch GPMII bewirkt eine Erweiterung der C/N-Verhältnisse. Der Zusatz von Silage (Q13) sowie eine Verlängerung der gemeinsamen Vorrotte von GPMIV mit Silage (Q14) führen zu einer Verengung der C/N-Verhältnisse. Die Variation der Fermentationsparameter kann sowohl eine Erweiterung als auch eine Verengung der C/N-Verhältnisse bewirken. Lediglich in dem Boden Welzow sind die Varianten mit erhöhtem Kohleanteil (Q2 und Q4) kritisch zu betrachten, da das C/N-Verhältnis hier deutlich über den anzustrebenden Bereich von 15 bis 20 (Bilitewski und Härdtle, 2013) angehoben wird.

In dem **Bodensäulenversuch** nehmen die C/N-Verhältnisse im Oberboden Welzow mit Erhöhung der BKS15-Gabe von 16,2 auf 19,7 zu. In dem Oberboden Zinnitz ist kein bzw. nur ein marginaler Effekt der BKS-Gaben auf das C/N-Verhältnis zu verzeichnen.

In dem **Lysimeterversuch** erweitern sich die C/N-Verhältnisse mit Erhöhung der BKS-Gaben sowohl in dem Boden Welzow als auch in dem Braunerde-Podsol.

Auch in dem Feldversuch von Agegnehu et al. (2016) werden die C/N-Verhältnisse nach der gemeinsamen Applikation von Biokohle und Kompost weiter, wobei die alleinige Applikation von Biokohle das C/N-Verhältnis stärker erweitert als die Kombination von Biokohle und Kompost. Ebenso bestätigen Fischer und Glaser (2012) und Gutser und Ebertseder (2002), dass das C/N-Verhältnis im Boden in Abhängigkeit von dessen Ausgangszustand und dem C/N-Verhältnis des Kompostes beeinflusst wird. Ebenso variiert das C/N-Verhältnis der Biokohle je nach verwendeten Ausgangsstoffen (Haubold-Rosar et al., 2016).

### 5.3.7 Fazit

Der Boden Welzow weist geringere Ausgangsgehalte bezüglich der OBS, des  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehaltes auf als der Boden Zinnitz. Der Einsatz der BKS erhöht in beiden Böden die OBS. Ebenso nehmen die  $C_{org}$ -Gehalte mit Erhöhung der BKS-Gabe insbesondere in dem Boden Welzow zu. Entsprechend der steigenden  $C_{org}$ -Gehalte zeigt sich auch ein Anstieg aller Kohlenstofffraktionen. Der prozentuale Anteil des pyrophosphatlöslichen Kohlenstoffs ( $C_{pyro}$ ) ist mit Erhöhung der Applikationsmenge zugunsten des heißwasserlöslichen Kohlenstoffs ( $C_{hwl}$ ) tendenziell rückläufig (GI). Die Zusammensetzung der BKS beeinflusst die anteilige Verteilung der Kohlenstofffraktionen (GII). Etwa 2,5 Jahre nach der BKS-Anwendung zeigen sich gleichwertige bis tendenziell erhöhte  $C_{hwl}$ -Gehalte im Oberboden (BS). Die  $N_t$ -Gehalte der Böden steigen mit Erhöhung der BKS-Gabe an (GI). Die Erhöhung des Braunkohleanteils bewirkt tendenziell geringere  $N_t$ -Gehalte, während die Substitution des Laubkompostes mit dem GPM tendenziell höhere  $N_t$ -Gehalte nach sich zieht (GII). Auch etwa 2,5 Jahre nach der BKS-Anwendung ist das Niveau der  $N_t$ -Gehalte mindestens gleichwertig, in der Regel aber höher als das der mineralischen Referenzvariante (BS, Lys). Bei der Erhöhung der BKS-Gaben bleibt der  $N_{pyro}$ -Gehalt in dem Boden Welzow stabil. In dem Boden Zinnitz nimmt er tendenziell ab (GI). Die verwendeten Inputstoffe der BKS haben einen Einfluss auf die Zusammensetzung der Stickstofffraktionen. Heißwasserlöslicher C und N sind nach Körschens et al. (1990) ein wichtiges Kriterium für die N-Mineralisierung des Bodens. Die C/N-Verhältnisse der Böden werden durch die BKS generell weiter. Dieser Effekt

ist in dem Boden Welzow aufgrund des schlechteren Versorgungszustandes mit OBS und  $N_t$  stärker ausgeprägt als in dem Boden Zinnitz.

Insbesondere der Boden Welzow zeigt eine Verbesserung des Kohlenstoff- bzw. Humushaushaltes durch den Einsatz der BKS, die auf die erstmalige Zufuhr organischer Substanz in den jungen Boden zurückzuführen ist. Kurzfristig bzw. 2,5 Jahre nach der Anwendung sind die Effekte der BKS-Gaben in den Versuchsböden nachvollziehbar. Die langfristige und dauerhafte Wirkung der BKS ist durch die kurze Zeitspanne der Versuche nicht abzuschätzen.

## 5.4 Nährstoffgehalte und -verfügbarkeit in Böden

### 5.4.1 Stickstoff

Die Gesamtstickstoffgehalte werden in Kapitel 5.3.4 eingehend diskutiert. Sie nehmen in der Regel mit der Applikation der BKS zu. Dies gilt allerdings nur eingeschränkt für die Verfügbarkeit des Stickstoffs. Die  $N_{min}$ -Gehalte wurden zum Versuchsabschluss der Gefäßversuche und des Bodensäulenversuches erhoben, sodass es sich hierbei um eine Erfassung der im Boden verbliebenen und nicht durch den Bewuchs aufgenommenen  $N_{min}$ -Vorräte handelt. Rückschlüsse auf die tatsächliche  $N_{min}$ -Zufuhr mit dem BKS sind kritisch zu betrachten, da der N-Entzug mit dem Bewuchs variiert.

Zum Versuchsabschluss des **Gefäßversuches I** sind die  $N_{min}$ -Vorräte des Bodens Welzow mit 3 bis 9 kg/ha gering. Die  $N_{min}$ -Gehalte einiger BKS-Varianten liegen tendenziell auf geringerem Niveau als die mineralische Referenzvariante. Die Erhöhung der BKS15-Gaben zeigt eine tendenzielle Steigerung des  $N_{min}$ -Gehaltes. Der gewachsene Boden Zinnitz weist zum Versuchsende noch  $N_{min}$ -Gehalte in der Spanne von 9 bis 16 kg/ha auf. Die BKS-Varianten (Ausnahme: Variante 120 BKS15) weisen höhere  $N_{min}$ -Gehalte auf als die mineralische Referenzvariante. Allerdings ist sowohl mit dem BKS15 als auch mit dem BKS30 eine tendenzielle Reduzierung des verfügbaren N zu verzeichnen. Vermutlich ist der N sehr stark an die Kohle gebunden und lässt sich, wie bereits Kammann et al. (2015) beschreiben, durch klassische Methoden nicht vollständig von der Kohle ablösen.

Zum Abschluss des **Gefäßversuches II** sind die  $N_{min}$ -Gehalte beider Böden, insbesondere des Bodens Welzow, als gering einzustufen. In dem Boden Welzow führt die Erhöhung des Biokohleanteils zu einer tendenziellen Steigerung der  $N_{min}$ -Gehalte während die Erhöhung des Braunkohleanteils eine tendenzielle Reduzierung der  $N_{min}$ -Gehalte bedingt. Aufgrund der volumetrischen Abmessung wurde den BKS eine größere Masse der Braunkohle appliziert, da diese eine höhere Schüttdichte aufweist. Dies führte zu weiteren C/N-Verhältnissen in den BKS, so dass aufgrund der N-

immobilisierenden Wirkung der Kohle (Haubold-Rosar et al., 2016) in den BKS mit Braunkohle eine stärkere Festlegung des Stickstoffs zu erwarten ist als in den BKS mit Biokohle. In dem Boden Zinnitz führt die Erhöhung des Bio- und Braunkohleanteils zu einer tendenziellen Reduzierung der  $N_{\min}$ -Gehalte. Der Zusatz von GPM bewirkt in dem Boden Welzow tendenziell höhere und in dem Boden Zinnitz tendenziell geringere  $N_{\min}$ -Gehalte. Die Bestimmung der  $N_{\min}$ -Gehalte erfolgte in einfacher Wiederholung ( $n = 1$ ).

Zum Abschluss des **Bodensäulenversuches** ist in dem Boden Welzow eine deutliche Verlagerung der  $N_{\min}$ -Gehalte vom Oberboden in den Unterboden (Tiefe 60 - 100 cm) erkennbar. Dies ist vermutlich auf die Verlagerung des  $NO_3$ -N mit dem Sickerwasserstrom in dem sandigen Kippboden zurückzuführen. Die Erhöhung der BKS-Gabe führt zu höheren  $N_{\min}$ -Gehalte und damit auch zu einem erhöhten austragbaren Potenzials. Auch in dem Boden Zinnitz nehmen die  $N_{\min}$ -Gehalte mit Erhöhung der BKS-Gabe zu. Eine Verlagerung in die unteren Bodenschichten ist erkennbar. Die höhere Trockenrohddichte in der Tiefenstufe 60 - 100 cm (Welzow) bzw. 40 - 60 cm (Zinnitz) wirkt vermutlich wie eine Stauschicht und führt zu höheren  $N_{\min}$ -Gehalten in diesen Schichten. Der Boden Zinnitz weist in allen Tiefenstufen deutlich höhere  $N_{\min}$ -Gehalte auf als der Boden Welzow.

In dem **Lysimeterversuch** erfolgt eine Bestimmung der  $N_{\min}$ -Gehalte ( $n = 2$ ) zu Beginn des Frühjahrs und unmittelbar nach der Ernte der Kultur. Erwartungsgemäß sind die  $N_{\min}$ -Gehalte des Bodens Welzow und des Braunerde-Podsols im Frühjahr höher als nach der Ernte, da der Bewuchs den verfügbaren Stickstoff nicht in dem Maße aufnimmt, wie er durch die Mineralisierung frei wird (Blume et al., 2010; Schmalfluss, 1958). Der Boden Welzow weist sehr geringe  $N_{\min}$ -Gehalte auf, die sich im gesamten Versuchszeitraum deutlich unter dem Niveau des Braunerde-Podsols befinden. In beiden Böden nehmen die  $N_{\min}$ -Gehalte mit der Steigerung der BKS-Gabe zu und liegen auf einem höheren Niveau als die  $N_{\min}$ -Gehalte der mineralisch gedüngten Variante. Dies deckt sich mit den Beobachtungen von Haber et al. (2008), die mit ansteigender Kompostdüngung ebenfalls zunehmende  $N_{\min}$ -Gehalte in dem Böden finden.

#### 5.4.2 Phosphor

In dem **Gefäßversuch I** steigt der Gesamtgehalt an Phosphor mit Erhöhung der BKS15- und BKS30-Gaben gleichermaßen in beiden Böden an. Der Boden Zinnitz weist allerdings einen generell höheren P-Gesamtgehalt auf als der Boden Welzow. Die P-Verfügbarkeit nach der DL-Methode ist in dem Boden Zinnitz in allen Varianten höher als in dem Boden Welzow. Mit den steigenden BKS15- und BKS30-Gaben nimmt die P-Verfügbarkeit von der mineralischen Referenzvariante mit einer unzu-

reichenden Versorgung (Versorgungsstufe A (Welzow) und B (Zinnitz)) bis zu einer Überversorgung (Versorgungsstufe D bzw. E) mit den höchsten BKS-Gaben (Von Wulffen et al., 2008) zu. Die Düngung mit dem BKS30 erreicht tendenziell geringere P-Verfügbarkeiten als das BKS15.

In dem **Gefäßversuch II** erfolgt die Bestimmung der P-Gesamtgehalte nur an ausgewählten Varianten. Die P-Gesamtgehalte sind zwischen den Varianten vergleichbar. In beiden Böden fällt der P-Gesamtgehalt nach der BKS-Düngung (Q15 mit GPMII und Silage tendenziell höher aus als in den anderen geprüften Varianten. Der Boden Welzow weist generell geringere P-Gesamtgehalte auf als der Boden Zinnitz. Die Einordnung in die Versorgungsstufen nach Von Wulffen et al. (2008) ergibt ein vergleichbares Niveau zwischen dem Boden Welzow und dem Boden Zinnitz. Die BKS-Gaben bewirken eine Verbesserung der P-Verfügbarkeit bis zur Versorgungsstufe E (Welzow) und C (Zinnitz) (Von Wulffen et al., 2008). Die BKS mit Braunkohle weisen geringere P-Verfügbarkeiten auf als ihre Vergleichspartner mit Biokohle. Dies ist auf die geringeren P-Gesamtgehalte der Braunkohle (Kapitel 3.2 Tabelle 13) sowie die geringeren  $P_{DL}$ -Gehalte im Ausgangssubstrat (Kapitel 4.2 Tabelle 1) zurückzuführen.

In dem **Bodensäulenversuch** ist der Boden Welzow in den Varianten MIN und 90 BKS15 als überversorgt einzuordnen, während diese Varianten in dem Boden Zinnitz optimal versorgt sind. In beiden Versuchsböden liegt in der Variante 30 BKS15 das geringste Versorgungsniveau mit verfügbarem Phosphor vor, was auf einen erhöhten Entzug mit dem Pflanzenaufwuchs zurückzuführen ist.

In dem **Lysimeterversuch** kann der Boden Welzow durch die BKS15-Gabe schrittweise von einem geringen Versorgungsniveau mit P auf eine optimale Versorgungsstufe angehoben werden. Auch in dem Braunerde-Podsol wird durch die BKS-Gaben die P-Versorgung gesteigert. Jedoch lag in dem Braunerde-Podsol bereits in der mineralischen Variante eine Überversorgung an P vor, die durch die BKS-Gaben verstärkt wird.

Auch in der Terra Preta do Indio wird eine bessere P-Versorgung im Vergleich zu umliegenden ärmeren Böden (Glaser et al., 2001; Glaser et al., 2002) erreicht. Glaser et al. (2015) bestätigen ab einer Anwendungsmenge von 10 t Biokohle/ha in Kombination mit Kompost einen positiven Effekt auf die P-Versorgung. Bei geringeren Biokohleapplikationen bis 3 t/ha in Kombination mit Kompost führen Schulz et al. (2014) die verbesserte P-Versorgung auf den Kompost zurück.

### 5.4.3 Kalium

In dem **Gefäßversuch I** liegen in dem Boden Welzow generell höhere K-Gesamtgehalte vor als in dem Boden Zinnitz. Allerdings ist die K-Verfügbarkeit in dem

Boden Zinnitz in allen Varianten höher als in dem Boden Welzow. Mit steigenden BKS15-Gaben nehmen die K-Gesamtgehalte und die K-Verfügbarkeit stärker zu als mit dem BKS30.

In dem **Gefäßversuch II** erfolgt die Bestimmung der K-Gesamtgehalte nur an ausgewählten Varianten mit vergleichbaren Ergebnissen. Der Boden Welzow weist generell höhere K-Gesamtgehalte auf als der Boden Zinnitz. Die K-Verfügbarkeit steigt durch die BKS-Applikation an. Die Substitution der Biokohle durch die Braunkohle hat in beiden Böden einen reduzierenden Effekt auf die K-Verfügbarkeit. Auch die Erhöhung der Bio- und Braunkohleanteile reduziert die K-Verfügbarkeit tendenziell. Ebenso führt der Gipszusatz zu einer tendenziell geringen K-Versorgung. Die Variation der Fermentationsparameter hat einen erhöhenden Einfluss auf die K-Verfügbarkeit. Insgesamt ist das K-Versorgungsniveau zwischen den beiden Böden vergleichbar.

In dem **Bodensäulenversuch** ist die K-Versorgung des Bodens Welzow und in dem Boden Zinnitz in allen Düngevarianten nur unzureichend (Versorgungstufe A bzw. B nach Von Wulffen et al. (2008)). Durch den Pflanzenaufwuchs wurde in dem Versuchszeitraum, insbesondere dem Boden Zinnitz, viel K entzogen, da keine Nachdüngung des K erfolgte.

In dem **Lysimeterversuch** weisen sowohl der Boden Welzow als auch der Braunerde-Podsol nur eine unzureichende K-Versorgung auf. Die BKS15-Gaben erhöhen das Versorgungsniveau in beiden Böden auf eine optimale Versorgungstufe. Die dreimalige BKS15-Gabe von 30 t/ha führt in dem Braunerde-Podsol zu einer deutlichen Überversorgung, die im weiteren Versuchsablauf beobachtet werden muss. Der Terra Preta do Indio wird eine bessere K-Versorgung im Vergleich zu umliegenden ärmeren Böden (Glaser et al., 2001; Glaser et al., 2002) bescheinigt. Glaser et al. (2015) beschreiben ab einer Anwendungsmenge von 10 t Biokohle/ha in Kombination mit Kompost einen positiven Effekt auf die K-Versorgung. Bei geringeren Biokohleapplikationen bis 3 t/ha in Kombination mit Kompost finden Schulz et al. (2014) keine eindeutigen Effekte auf die K-Versorgung auf einem Sand- und Lehmboden.

#### 5.4.4 Weitere Nährstoffe

In dem **Gefäßversuch I** werden die Nährstoffe Mg, Ca, Mn, Na durch die Steigerung der BKS-Gabe gleichermaßen in beiden Böden erhöht. Das verfügbare Mg wird in beiden Böden durch die BKS-Anwendung erhöht. Während der Spurennährstoff Zn ebenfalls durch die BKS-Gaben ansteigt, bleibt der Cu-Gehalt, insbesondere bei der Anwendung des BKS30, in beiden Böden stabil.

Auch in dem **Gefäßversuch II** erhöht sich der Gehalt der Nährstoffe Mg, Ca, Mn, Na durch die Applikation der BKS in beiden Böden. Die Substitution der Biokohle mit der

Braunkohle (Q3) führt zu verringerten Mg- und K-Gehalten in dem Boden Welzow. Das verfügbare Mg wird in beiden Böden durch die BKS-Anwendung erhöht. Die Braunkohle erhöht die Mg-Verfügbarkeit stärker als die Biokohle. Der Zusatz Gips reduziert die Mg-Verfügbarkeit. Die Spurennährstoffe Cu und Zn im Boden variieren in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der BKS. In der Regel kommt es zu einer Steigerung der Cu- und Zn-Gehalte im Boden. Die Steigerung der Gesamtgehalte von Mg, Ca und Na deckt sich mit den Beobachtungen von Schulz et al. (2014), die Steigerungen der Gesamtgehalte und der pflanzenverfügbaren Gehalte von Mg, Ca und Na nach der Düngung von Biokohle-Komposten mit 0 - 10 kg Biokohle/t Kompost und Gesamtapplikationsmengen bis zu 250 t/ha beobachten. Ebenso finden Glaser et al. (2015) erhöhte pflanzenverfügbare Mg-Gehalte ab einer Gabenhöhe von mindestens 10 t Biokohle/ha.

#### 5.4.5 Fazit

Die BKS-Düngung führt in allen Versuchsböden zu einer Erhöhung der Nährstoffvorräte. Auch nimmt die Verfügbarkeit der Nährstoffe (N, P, K und Mg) mit steigenden BKS-Gaben im Vergleich zu der mineralischen Referenzvariante zu. Die Erhöhung des Kohleanteils und die Substitution der Biokohle mit Braunkohle führen zu tendenziell geringeren Verfügbarkeiten an  $N_{min}$ , P, und K. Dies kann unter anderem an einer stärkeren Bindung des Stickstoffs an die Kohle (Kammann et al., 2015) sowie auf geringere P- und K-Gehalte in der Braunkohle zurückgeführt werden. Generell zeigen alle Versuche eine positive Beeinflussung des Nährstoffhaushaltes sowie gegenüber der mineralischen Referenzvariante eine mindestens gleichwertige bzw. in der Regel verbesserte Verfügbarkeit der Makronährstoffe N, P und K.

### 5.5 Pflanzenerträge und Nährstoffgehalte/-entzüge

#### 5.5.1 Pflanzenerträge

In dem **Gefäßversuch I** fallen die Erträge des Knautgrases in den BKS-Varianten des Bodens **Welzow** zum ersten Erntetermin, aufgrund der niedrigen N-Mineraldüngeräquivalente von < 10 %, sehr gering aus. Sie bleiben deutlich hinter der mineralischen Düngung zurück. Zum zweiten Erntetermin stellen sich etwas höhere Erträge ein, die auf eine einheitliche zusätzliche N-Gabe von 100 kg/ha zurückzuführen sind. Die BKS30-Varianten verzeichnen einen stufenweisen Mehrertrag mit der Erhöhung der BKS-Gabe. Dieser Effekt ist für die BKS15 allenfalls nur tendenziell erkennbar. Nur die Variante 240 BKS15 verzeichnet eine deutliche Ertragssteigerung, so dass sie sowohl zum zweiten Erntetermin als auch in Summe über beide Ernten einen Mehrertrag von 194 % bzw. 121 % gegenüber der Referenzvariante 150/90/150 erzielt.



Die Ertragssumme der BKS-Varianten schwankt zwischen 5,8 g TM/Gefäß bzw. 18,5 dt TM/ha (30 BKS30) bis 14,7 g/Gefäß bzw. 46,8 dt TM/ha (240 BKS15). Die BKS-Varianten bleiben mit Ausnahme der Variante 240 BKS15 deutlich unter dem Niveau der Referenzvariante (150/90/150) von 12,1 g TM/Gefäß bzw. 38,5 dt TM/ha. Das Ertragsniveau ist auf dem Boden **Zinnitz** etwas höher als auf dem Boden Welzow. Zum ersten Erntetermin nehmen die Knautgraserträge mit Erhöhung der BKS15- und BKS30-Gaben tendenziell ab, wobei die Erträge der BKS30-Varianten um etwa 50 % geringer ausfallen als die Erträge der BKS15-Varianten. Die Erträge sind geringer als in der mineralischen Referenzvariante. Auch hier ist die Ertragsdepression der BKS-Varianten auf das geringe N-Mineraldüngeräquivalent von < 10 % zurückzuführen. Zum zweiten Erntetermin erzielen die BKS15- und BKS30-Varianten das Ertragsniveau der Referenzvariante, bedingt durch die einheitliche mineralische N-Gabe von 100 kg/ha zu allen Varianten. Die Varianten 240 BKS15 und 60 BKS30 weisen einen tendenziell höheren Ertrag auf als die Referenzvariante. Die Ertragssumme der BKS-Varianten schwankt zwischen 15,3 g TM/Gefäß bzw. 48,8 dt TM/ha (90 BKS30) bis 21,6 g/Gefäß bzw. 68,7 dt TM/ha (30 BKS15). Die BKS-Varianten bleiben damit deutlich unter dem Ertragsniveau der Referenzvariante (150/90/150) von 27,1 g TM/Gefäß bzw. 86,4 dt TM/ha. Auf dem Boden Zinnitz konnten mit einer weiteren Steigerung der mineralischen N-Düngung über 150 kg N/ha keine Ertragszuwächse erreicht werden. Die insgesamt niedrigen Erträge der BKS-Varianten sind durch die geringen N-Mineraldüngeräquivalente der BKS zu erklären (Rademacher und Haubold-Rosar, 2012; Weiß et al., 2014).

In dem **Gefäßversuch II** wird mit der BKS-Düngung auf beiden Böden mindestens ein gleichwertiger Ertrag zu der mineralischen Referenz erzielt. Es liegt eine Verbesserung der Erträge um bis zu 137 % (W) bzw. 132 % (Z) im Vergleich zu der mineralischen Referenz vor. Das Ertragsniveau beider Böden ist vergleichbar. Der Ertrag des Knautgrases ist zum ersten Erntetermin im Jahr 2012 am geringsten. Vermutlich konnte die einheitliche mineralische N-Ergänzungsdüngung (100 kg/ha) durch den Bewuchs nicht mehr umgesetzt werden, da zwischen Düngung und Ernte nur zwei Wochen lagen. Im Versuchsverlauf nehmen die Erträge bis zum Abschluss 2013 im Vergleich zur ersten Ernte zu. Die erste Ernte im Jahr 2013 bringt die höchsten Erträge ein. Dies kann auf einheitliche mineralische Ergänzungsdüngung (100 kg N/ha) im Frühjahr 2013 zurückgeführt werden. Einen positiven Einfluss auf den Ertrag hat die Steigerung der BKS-Gabenhöhe von 30 auf 90 t/ha. Die Erhöhung des Biokohleanteils erzielt einen positiven Ertragseffekt. Für die Braunkohle bestätigt sich dies nicht, was vermutlich auf die höhere Masse an Braunkohle in dem BKS im Vergleich zur Biokohle und eine damit einhergehenden N-Immobilisation (DeLuca et al., 2006) zurückzuführen ist. Auch die

BKS mit dem Substitut GPM sowie mit dem Zusatz Silage erzielen positive Ertragseffekte.

In dem **Bodensäulenversuch** erfolgte der Anbau der Kulturen Knautgras, Senf, Sommergerste und ein weiteres Mal Knautgras. Das Ertragsniveau des Bodens Welzow ist in der Regel geringer als das des Bodens Zinnitz. Der Boden **Welzow** weist in der ersten Anbauperiode des Knautgrases Ertragszuwächse mit Erhöhung der BKS-Gabe auf. In den Perioden mit Senf und Sommergerste erzielt die Variante 30 BKS15 die höchsten Erträge. In der zweiten Anbauperiode des Knautgrases sind die Erträge zwischen der Variante 30 BKS15 und der mineralischen Referenzvariante vergleichbar. Das Ertragsniveau der höheren BKS-Gabe von 90 t/ha nimmt im Versuchsverlauf deutlich ab und liegt letztlich unter dem Niveau der mineralischen Referenzvariante. Die Ertragsfähigkeit des Bodens Welzow nimmt summiert über alle Kulturen und Ernten durch die BKS-Gaben um 26,1 dt/ha (30 BKS15) bzw. 33,1 dt/ha (90 BKS15) gegenüber der mineralischen Düngung zu. Bei einer weiteren Fortführung des Versuches ist davon auszugehen, dass der höhere Gesamtertrag der Variante 90 BKS15 weiter abnimmt. Auf dem Boden **Zinnitz** staffelt sich der Ertrag aller angebauten Kulturen wie folgt: 30 BKS15 > 90 BKS15 ≥ MIN. Die Ertragsfähigkeit des Bodens Zinnitz nimmt durch die BKS-Düngung zu. Mit der Gabe von 30 t/ha BKS15 wird eine Ertragssteigerung von 79,8 dt/ha gegenüber der mineralischen Düngung erreicht. Die erhöhte BKS-Gabe von 90 t/ha BKS15 erzielt einen geringen Ertragszuwachs in Höhe von 10,7 dt/ha im Vergleich zu der mineralischen Referenzdüngung.

In dem **Lysimeterversuch** folgte auf den Mais, als erste Kulturart, der zweimalige Anbau von Winterroggen. Die Maiserträge sind auf dem Boden Welzow geringer als auf dem Braunerde-Podsol. Mit der Steigerung der BKS-Düngung kommt es auf beiden Böden zu einer tendenziellen Erhöhung der Erträge, die allerdings geringer sind als die der mineralischen Referenzvariante. Dies ist auf das, im Gefäßversuch I festgestellte, geringe N-Mineraldüngeräquivalent des BKS zurückzuführen (Rademacher und Haubold-Rosar, 2012; Weiß et al., 2014) und deckt sich mit den Ergebnissen der parallelen Feldversuche (Weiß et al., 2014). Das Ertragsniveau ist in den Jahren 2012 und 2013 auf dem Kippboden Welzow höher als auf dem Braunerde-Podsol. Im Jahr 2012 nehmen die Korn- und Stroherträge auf dem Boden Welzow mit der Erhöhung der BKS-Gabe zu und liegen über dem Niveau der mineralischen Referenzvariante. Die Korn- und Stroherträge des Braunerde-Podsols nehmen mit der Erhöhung der BKS-Gabe ab und liegen unter bzw. gleichwertig zu dem Niveau der mineralischen Referenzvariante. Im Folgejahr 2013 zum erneuten Anbau des Winterroggens weist die Variante 3x30 BKS15 den höchsten Kornertrag gefolgt von den Varianten MIN und 90 BKS15 auf dem Boden Welzow auf. Auf dem Braunerde-Podsol ist der Kornertrag aller

Varianten vergleichbar. Der Strohertrag staffelt sich auf beiden Böden wie folgt: 3x30 BKS15  $\geq$  MIN > 90 BKS15. Allerdings beschreiben Rademacher und Haubold-Rosar (2015a) für eben diesen Versuch einen positiven Ertragseffekt auf beiden Böden mit der Kultur Winterweizen im Jahr 2014.

Die in den Versuchen ermittelten Erträge decken sich mit den Ergebnissen der Literatur. So werden durch die Düngung mit BKS bzw. co-kompostierter Biokohle sowohl Ertragssteigerungen (Glaser et al., 2015; Kammann et al., 2016; Kammann et al., 2015; Schulz et al., 2013; Schulz und Glaser, 2012), Ertragsdepressionen (Rademacher und Haubold-Rosar, 2012; Weiß et al., 2014) als auch keine Effekte (LTZ, 2014; Mokry et al., 2013) beschrieben. Schulz et al. (2014) führen die positiven Effekte des Pflanzenwachstums auf die gesteigerte Kompostapplikation und nicht auf die Biokohle zurück. Allerdings stellen Biederman und Harpole (2013), Spokas et al. (2012) und Jeffery et al. (2011) in ihren Metastudien insgesamt eine positive Ertragswirkung nach der Düngung von Biokohlen fest. Ein Zusammenhang zwischen der Gabenhöhe der Biokohle und dem Ertragseffekt ist nicht feststellbar. Mit der alleinigen Biokohledüngung treten sowohl Ertragssteigerungen (Cornelissen et al., 2013; Steiner et al., 2007), Ertragsminderungen (Karami et al., 2011; Karer et al., 2013) als auch geringe Ertragseffekte (Haider et al., 2017) auf. Positive Ertragseffekte durch die Düngung von BKS bzw. co-kompostierter Biokohle finden sich eher unter ungünstigen Bedingungen bzw. auf ertragsschwächeren und sandigeren Böden (Kammann et al., 2015; Schulz et al., 2013). Haubold-Rosar et al. (2016) erwarten nur eine Förderung des Pflanzenwachstums, wenn die ertragsbegrenzenden Bodeneigenschaften durch die Biokohlegabe verbessert werden.

### 5.6.2 Nährstoffgehalte und -entzüge

In dem **Gefäßversuch I** sind die **N-Gehalte** des Pflanzenaufwuchses auf dem Boden **Welzow** zum ersten Schnitt nach Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008) mit Ausnahme der Variante 400/90/150 unzureichend. Mit Erhöhung der BKS-Gaben ist eine tendenzielle Erhöhung der N-Gehalte im Aufwuchs zu verzeichnen. Zum zweiten Schnitt weist der Aufwuchs der BKS15-Varianten bedingt durch die mineralische N-Ergänzungsdüngung in etwa gleiche N-Gehalte auf. Für die BKS30-Varianten sind mit der Erhöhung der BKS-Gabe abnehmende N-Gehalte im Aufwuchs zu verzeichnen. Dies ist auf das geringere N-Mineraldüngeräquivalent des BKS30 im Vergleich zu dem BKS15 (Rademacher und Haubold-Rosar, 2012) zurückzuführen. Die N-Gehalte der mineralisch gedüngten Varianten mit geringen N-Gaben sind zum zweiten Schnitt sehr hoch, da im Frühjahr 2012 eine einheitliche N-Gabe (100 kg/ha) erfolgte, die von einem kleineren Pflanzenbestand, entsprechend der vorherigen Düngung, aufgenommen

wurde. Nach Bergmann (1983) sind lediglich die Varianten 30 BKS30, 60 BKS30, 50/90/150 und 100/90/150 optimal versorgt. Während nach Von Wulffen et al. (2008) in allen Varianten eine optimale N-Versorgung vorliegt. Die **P-Gehalte** des Aufwuchses in den BKS-Varianten sind zu beiden Ernteterminen, insbesondere zum ersten Erntetermin, höher als die P-Gehalte der mineralisch gedüngten Varianten. Zum ersten Erntetermin sind nach Bergmann (1983) einzelne Varianten und nach Von Wulffen et al. (2008) alle Varianten mit P überversorgt. Zum zweiten Erntetermin liegt in allen Varianten eine Unterversorgung mit P vor (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Die **K-Gehalte** des Pflanzenaufwuchses nehmen zum ersten Erntetermin mit Erhöhung der BKS-Gabe zu. Der Anstieg ist mit dem BKS30 etwas verhaltener als mit dem BKS15. Die Varianten 90, 120 und 240 BKS15 sowie 120 BKS30 sind nach Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008) mit K überversorgt. Zum zweiten Erntetermin erhöht sich der K-Gehalt des Pflanzenaufwuchses in den BKS-Varianten im Vergleich zum vorherigen Erntetermin. Die BKS30-Varianten erzielen in etwa das gleiche Niveau wie die BKS15-Varianten. Mit der Steigerung der BKS15- und BKS30-Gaben ist eine tendenzielle Abnahme der K-Gehalte zu verzeichnen. Für alle BKS-Varianten liegt eine Überversorgung mit K vor (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Zu beiden Ernteterminen ist der K-Gehalt im Aufwuchs der BKS-Varianten höher als in den mineralisch gedüngten Varianten.

Aufgrund des höheren Ertrages zum zweiten Erntetermin sind auch die **N-, P- und K-Entzüge** zum zweiten Erntetermin höher als zum ersten Erntetermin (Ausnahme 400/90/150). Die BKS15-Varianten weisen zu beiden Ernteterminen tendenziell höhere N-, P- und K-Entzüge auf als die BKS30-Varianten. Die N-Entzüge der BKS-Varianten sind aufgrund des geringeren N-Mineraldüngeräquivalents (Rademacher und Haubold-Rosar, 2012) niedriger als bei der mineralischen Referenzvariante (150/90/150). Die P-Entzüge aller BKS-Varianten (außer 30 BKS30) und die K-Entzüge ab 60 t/ha BKS15 bzw. BKS30 sind höher als bei der mineralischen Referenzvariante (150/90/150), was auf die höheren Gehalte durch die verbesserte P- und K-Verfügbarkeit zurückzuführen ist.

Die **Mg-, Mn-, Cu- und Zn-Gesamtgehalte** im Aufwuchs der Böden Welzow und Zinnitz liegen in den Varianten, die eine BKS-Düngung erfahren haben, auf einem höheren Niveau als in den mineralisch gedüngten Varianten. Die Versorgung mit diesen Nährstoffen ist in der Regel in allen Varianten als optimal einzuschätzen (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Die Mn-Gehalte im Aufwuchs des Bodens Welzow sind in den Varianten mit einer geringeren BKS15- und BKS30-Düngung (30 und 60 t/ha) erhöht. Die Mn-Gehalte im Aufwuchs des Bodens Zinnitz weisen bei hohen BKS15-Gaben von 120 und 240 t/ha sowie der Gabe von 90 t/ha BKS30 auf eine unzu-

reichende Mn-Versorgung hin. Der Cu-Gehalt des Aufwuchses ist in den BKS-Varianten tendenziell höher als in den mineralisch gedüngten Varianten. Allerdings wird ein Einfluss der BKS-Gabenhöhe auf den Cu-Gehalt nicht deutlich. Die Zn-Gehalte im Aufwuchs des Bodens Welzow sind zwischen den Varianten vergleichbar. In dem Boden Zinnitz ist zum ersten Erntetermin eine unzureichende Versorgung mit Zn festzustellen.

Auch die **N-Gehalte** im Pflanzenaufwuchs des Bodens **Zinnitz** sind zum ersten Schnitt nach Bergmann (1983) mit Ausnahme der Variante 400/90/150 unzureichend. Nach der Empfehlung von Von Wulffen et al. (2008) ist die Variante 240 BKS15 sowie einige mineralisch gedüngten Varianten optimal versorgt. Die N-Gehalte des Pflanzenaufwuchses nehmen mit Erhöhung der BKS-Gaben zu. Allerdings führt die Erhöhung von 90 t/ha BKS30 auf 120 t/ha BKS30 zu einer Abnahme des N-Gehalts im Pflanzenaufwuchs. Die BKS-Varianten erreichen ab einer Gabenhöhe von etwa 90 t/ha das Niveau der mineralischen Referenzvariante. Aufgrund der einheitlichen N-Gabe von 100 kg N/ha zum Vegetationsbeginn sind die N-Gehalte im Aufwuchs des zweiten Erntetermins aller Varianten vergleichbar. Trotz der höheren N-Gehalte gegenüber dem ersten Schnitt liegt nach Bergmann (1983) in fast allen Varianten nur eine unzureichende N-Versorgung vor. Allerdings ist nach Von Wulffen et al. (2008) die N-Versorgung aller Varianten als ausreichend einzuschätzen. Die **P-Gehalte** des Aufwuchses steigen mit Erhöhung der BKS15-Gaben tendenziell stärker an als mit dem BKS30. Alle BKS-Varianten weisen höhere P-Gehalte auf als die mineralisch gedüngten Varianten. Die P-Versorgung der BKS-Varianten ist nach Bergmann (1983) als in den meisten Fällen als optimal einzuordnen. Lediglich die Gabenhöhe von 30 t/ha BKS15 bzw. BKS30 führt zu einer unzureichenden P-Versorgung, während die höchste Gabe von 240 t/ha BKS 15 eine Überversorgung mit P bewirkt. Nach Von Wulffen et al. (2008) sind alle BKS-Varianten, außer 30 BKS15 und 30 BKS30, als leicht bis deutlich Überversorgt einzustufen. Die mineralisch gedüngten Varianten sind nur unzureichend mit P versorgt (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Zum zweiten Erntetermin sind die P-Gehalte der BKS-Varianten vergleichbar. Sie liegen auf einem höheren Niveau als die mineralisch gedüngten Varianten. Die P-Versorgung ist nach Bergmann (1983) als unzureichend einzuschätzen. Lediglich die Varianten 120 BKS15 und 240 BKS15 sind optimal versorgt. Nach dem Richtwert von Von Wulffen et al. (2008) sind alle BKS-Varianten, außer der Variante 30 BKS15, als optimal versorgt einzustufen. Die Variante 30 BKS15 und alle mineralisch gedüngten Varianten sind nur unzureichend mit P versorgt. Die **K-Gehalte** im Pflanzenaufwuchs nehmen mit Erhöhung der BKS-Gaben zum ersten Schnitt zu. Bereits eine Gabe von 30 t BKS15 bzw. BKS30/ha bewirkt höhere K-Gehalte im Aufwuchs als die mineralische Referenzvarian-

te bzw. das Mittel der mineralisch mit 150 kg K/ha gedüngten Varianten. Die meisten BKS-Varianten sind nach Bergmann (1983) als überversorgt einzustufen. Die Varianten 30 BKS15, 30 BKS30, 60 BKS30 sind optimal mit K versorgt (Bergmann, 1983). Die Einordnung nach Von Wulffen et al. (2008) ist vergleichbar, da ebenfalls alle BKS-Varianten, außer den optimal versorgten Varianten 30 BKS15 und 30 BKS30, als überversorgt einzuordnen sind. Die K-Gehalte des zweiten Aufwuchses sind etwas geringer als zum ersten Schnitt. Nach wie vor nehmen die K-Gehalte mit den gesteigerten BKS-Gaben zu. Die BKS-Varianten weisen zudem höhere K-Gehalte im Aufwuchs auf als die mineralische Referenzvariante. Bis zu einer Gabenhöhe von 90 t/ha BKS30 sowie bei der Variante 30 BKS15 liegt nach Bergmann (1983) eine optimale K-Versorgung vor. Die weiteren BKS-Varianten sind als überversorgt einzuschätzen. Nach Von Wulffen et al. (2008) sind die Varianten 30 BKS15, 30 BKS30 und 60 BKS30 optimal versorgt. Die weiteren BKS-Varianten sind ebenfalls als überversorgt einzuschätzen. Die **N-, P- und K-Entzüge** der BKS-Varianten nehmen vom ersten zum zweiten Schnitt zu. Dies wird durch eine Ertragssteigerung zum zweiten Erntetermin verursacht sowie, im Falle des N-Entzuges durch höhere N-Gehalte im Aufwuchs. Die BKS15-Varianten weisen tendenziell höhere N-, P- und K-Entzüge auf als die BKS30-Varianten. Im Vergleich zu den N-Entzügen der mineralischen Referenzvariante (150/90/150) sind die N-Entzüge der BKS-Varianten geringer. Die BKS15-Varianten weisen höhere P- und K-Entzüge auf als die mineralische Referenzvariante (150/90/150). Die BKS30-Varianten erzielen höhere P- und geringere K-Entzüge als die mineralische Referenzvariante (150/90/150).

Im Mittel der vier Ernten des **Gefäßversuches II** liegt für alle Varianten der Böden Welzow und Zinnitz nach Bergmann (1983) eine unzureichende **N-Versorgung** bzw. nach Von Wulffen et al. (2008) eine optimale N-Versorgung vor. Die mineralische Referenzvariante (150/90/150) weist im Mittel einen etwas höheren N-Gehalt auf als die BKS-Varianten. Die Erhöhung der BKS-Gabe von 30 auf 90 t/ha führt zu tendenziell geringeren N-Gehalten im Aufwuchs. Die **P- und K-Versorgung** der mineralischen Variante ist hingegen im Mittel der vier Ernten und für beide Böden unzureichend (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008) und zudem geringer als bei den BKS-Varianten. Die mittlere P-Versorgung der BKS-Varianten des Bodens Welzow ist als unzureichend und die des Bodens Zinnitz als unzureichend bis optimal einzuschätzen (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Die Erhöhung der BKS-Gabe von 30 auf 90 t/ha führt zu tendenziell höheren P- und K-Gehalten im Aufwuchs. Die K-Versorgung der BKS-Varianten in den Böden Welzow und Zinnitz ist nach Bergmann (1983) optimal bzw. nach Von Wulffen et al. (2008) optimal bis teilweise überversorgt.

Im Gegensatz zur mineralischen Referenzvariante nehmen die P-Gehalte im Versuchsverlauf zu. Die K-Gehalte sinken leicht ab, aber verbleiben auf einem höheren Niveau als die K-Gehalte der mineralischen Referenzvariante. Es ist daher anzunehmen, dass P und K aus den BKS nachgeliefert werden.

Die **N-Entzüge** der BKS-Varianten nehmen auf beiden Böden im Vergleich zur mineralischen Referenzvariante ab, wenn die Biokohle mit Braunkohle substituiert wird und bei der Variation der Fermentationsparameter (Verlängerung und/oder Temperaturerhöhung während der Fermentation). Die Erhöhung des Biokohleanteils von 15 auf 30 Vol.-% sowie die Substitution des Laubkompostes durch GPM führen zu einer Steigerung des N-Entzuges. Durch die BKS-Düngung wird der **P-Entzug** mit dem Aufwuchs auf dem Boden Welzow im Vergleich zur mineralischen Referenzvariante teilweise mehr als verdoppelt. Der P-Entzug der mineralischen Referenzvariante ist auf dem Boden Zinnitz höher als auf dem Boden Welzow. Dementsprechend erfolgt die Steigerung des P-Entzuges durch die BKS-Düngung in geringerem Maße. Auf beiden Böden wird eine Zunahme des P-Entzuges mit der Steigerung der Gabenhöhe von 30 t/ha auf 90 t/ha BKS deutlich. Die Erhöhung des Biokohleanteils von 15 auf 30 Vol.-% sowie die Substitution des Laubkompostes durch GPM führen zu einer Steigerung des P-Entzuges. Die Variation der Fermentationsparameter hat auf dem Boden Welzow einen negativen und auf dem Boden Zinnitz einen positiven Effekt auf den P-Entzug. Die BKS-Düngung verdoppelt auf beiden Böden den **K-Entzug** mit dem Aufwuchs im Vergleich zu der mineralischen Referenzvariante. Der K-Entzug des Aufwuchses steigt mit Erhöhung der BKS-Gabe von 30t/ha auf 90t/ha sowie durch die Erhöhung des Biokohleanteils von 15 auf 30 Vol.-% in dem BKS an. Die Substitution von 15 Vol.-% Biokohle mit 15 Vol.-% Braunkohle ergibt einen höheren K-Entzug im Pflanzenaufwuchs auf beiden Böden. Bei der Steigerung des Braunkohlegehaltes auf 30 Vol.-% geht der K-Entzug zurück. Die Substitution des Laubkompostes mit GPM sowie der Zusatz von Silage bewirken eine Steigerung des K-Entzuges auf beiden Böden und in Kombination mit beiden Kohlearten gegenüber den jeweiligen Vergleichspartnern. Die Variation der Fermentationsparameter reduziert die K-Entzüge mit dem Pflanzenaufwuchs.

Die **Mg-, Mn-, Cu- und Zn-Gesamtgehalte** im Knautgrasaufwuchs des Kippbodens Welzow liegen auf einem tendenziell geringeren Niveau als die entsprechenden Gehalte im Aufwuchs des gewachsenen Ackerbodens Zinnitz. Die Versorgung mit den Nährstoffen Mg, Mn, Cu und Zn ist nach Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008) als optimal einzuschätzen. Für Mn zeigt sich wie bereits im Gefäßversuch I vornehmlich in dem Boden Zinnitz eine leicht unzureichende Versorgung im Vergleich zur mineralischen Düngung.

Der Pflanzenaufwuchs aller Kulturen tendierte in dem **Bodensäulenversuch** zu einem etiolierten Wuchsverhalten, dadurch wurden häufig nicht die optimalen BBCH-Stadien zur Einordnung der Nährstoffgehalte nach Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008) erreicht. Die mittleren N-Gehalte des Knautgrasaufwuchs der ersten Anbauphase von 2011 - 2012 lassen auf beiden Böden Rückschlüsse auf eine optimale bis leicht unzureichende Versorgung zu (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Der Pflanzenaufwuchs des Bodens Zinnitz weist tendenziell höhere N-Gehalte auf als der Pflanzenaufwuchs des Bodens Welzow. Die P-Gehalte des Pflanzenaufwuchses sind als optimal bis überversorgt einzustufen (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Für die K-Gehalte des Pflanzenaufwuchses gilt auf beiden Böden eine deutliche Überversorgung (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008).

Der Senfaufwuchs musste aufgrund des etiolierten Wuchses vorzeitig geerntet werden, so dass eine Einordnung der Nährstoffgehalte nicht möglich ist. Die N-Gehalte sind in der Variante 30 BKS15 (W) und MIN (Z) am höchsten. Insbesondere die Variante 90 BKS15 fällt auf beiden Böden mit hohen P- und K-Gehalten in den Senfpflanzen auf.

Die N- und P-Gehalte im Sommergerstenaufwuchs aller Varianten beider Böden lassen nach Bergmann (1983) und Von Wulffen et al. (2008) auf eine optimale Versorgung schließen. Für K liegt in allen Varianten und auf beiden Böden eine Überversorgung vor (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008).

Die N- und P-Gehalte des Knautgrasaufwuchses der Anbauphase 2013 - 2014 auf dem Boden Welzow weisen auf eine optimale bis leichte Überversorgung hin (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Die K-Gehalte des Aufwuchses der Variante 30 BKS15 zeigen eine unzureichende (Bergmann, 1983) bis optimale Versorgung (Von Wulffen et al., 2008) an. Die K-Gehalte im Aufwuchs der Varianten MIN und 90 BKS15 des Bodens Welzow sind als überversorgt einzuschätzen (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Für den Boden Zinnitz zeigen die N-Gehalte im Aufwuchs in allen Varianten eine N-Überversorgung an (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Der Aufwuchs der Varianten MIN und 90 BKS15 ist mit P und K als überversorgt einzuschätzen (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008). Für die Variante 30 BKS15 liegt eine optimale bis leichte P-Überversorgung sowie eine optimale K-Versorgung vor (Bergmann, 1983; Von Wulffen et al., 2008).

Dem Ertragsniveau entsprechend sind die **N-, P- und K-Entzüge** auf dem Boden Zinnitz höher als auf dem Boden Welzow. In den BKS-Varianten werden beiden Böden höhere Nährstoffmengen entzogen als in der mineralisch gedüngten Variante. Auf dem Boden **Welzow** zeigt die Erhöhung der BKS-Gabe von 30 t/ha auf 90 t/ha lediglich in der ersten Anbauperiode mit Knautgras eine weitere Steigerung der N-, P- und K-Entzüge. In den nachfolgenden Anbauperioden weist die Variante 30 BKS15 höhere



N-, P- und K-Entzüge auf als die Variante 90 BKS15, so dass in Summe vergleichbare Entzüge zwischen den beiden BKS-Varianten vorliegen. Im Versuchsverlauf ist ein Absinken der K-Entzüge in den BKS-Varianten unter das Niveau der mineralischen Referenzvariante zu verzeichnen. Dem Ertragsniveau entsprechend sind die N-, P- und K-Entzüge des Bodens **Zinnitz** im gesamten Versuchsverlauf in der Variante 30 BKS15 am höchsten. Eine Steigerung der BKS-Gabe von 30 t/ha auf 90 t/ha ergibt keine weitere Erhöhung der Entzüge.

In dem **Lysimeterversuch** sind die **N-Gehalte** im Biomasseaufwuchs des Maises und Winterroggens (Korn und Stroh) des Bodens Welzow im gesamten Versuchsverlauf auf einem deutlich geringen Niveau als die N-Gehalte im Biomasseaufwuchs des Braunerde-Podsols. Insbesondere im ersten Versuchsjahr sind die N-Gehalte der BKS-Varianten auf beiden Böden geringer als die N-Gehalte der mineralischen Referenzvariante bedingt durch das geringe N-Mineraldüngeräquivalents des BKS (Rademacher und Haubold-Rosar, 2012). Zu den Folgekulturen erfolgt daher auch in den BKS-Varianten eine mineralische Ergänzungsdüngung, so dass sich die N-Gehalte im Aufwuchs des Bodens Welzow im Versuchsverlauf langsam angleichen. Die N-Gehalte im Aufwuchs der BKS-Varianten des Braunerde-Podsols liegen ab dem Folgejahr höher als die N-Gehalte der mineralischen Referenzvariante. Die N-Gehalte des Erntegutes unterschreiten auf dem Boden Welzow die jeweils empfohlenen N-Gehalte (Von Wulffen et al., 2008), während auf dem Braunerde-Podsol zumindest die Variante 90 BKS15 diese Gehalte für das Winterroggen-Korn und allen Varianten für das Winterroggen-Stroh erreichen.

Die **P- und K-Gehalte** des Maises und des Winterroggen-Korns nehmen auf dem Boden **Welzow** mit der BKS-Gabe zu, wobei die dreimalige BKS-Gabe in Höhe von 30 t/ha tendenziell geringere P- und K-Gehalte aufweist als die einmalige Gabe von 90 t/ha. Im Winterroggen-Stroh weisen die BKS-Varianten vergleichbare P-Gehalte über dem Niveau der mineralischen Referenzvariante auf. Allerdings sind die K-Gehalte in der Variante 90 BKS15 geringer als in der Variante 3x30 BKS15 und der mineralischen Referenzvariante. Auf dem **Braunerde-Podsol** lässt sich anhand der P- und K-Gehalte des Maises und des Winterroggen-Korns sowie des -Strohs keine eindeutige Tendenz hinsichtlich der Vorzüglichkeit einer Düngungsvariante ablesen. Die P-Versorgung erscheint im Mittel zwischen den Düngungsvarianten gleichwertig zu sein. Die K-Versorgung ist im Mittel in den BKS-Varianten besser als in der mineralischen Referenzvariante. Die P-Gehalte im Erntegut sind auf beiden Böden und in allen Varianten geringer als die jeweils empfohlenen P-Gehalte (Von Wulffen et al., 2008). Die K-Gehalte des Maisaufwuchses und des Winterroggen-Korns der Variante 90 BKS15

(Welzow 2012 und 2013; Braunerde-Podsol: 2013) und der Variante MIN (Braunerde-Podsol: 2013 und 2013) sowie des Winterroggen-Strohs aller Varianten erreichen die jeweils durchschnittlichen P-Gehalte nach Von Wulffen et al. (2008).

Im ersten Versuchsjahr lagen die **N-Entzüge** der Mais-Biomasse auf dem Braunerde-Podsol um etwa 100 kg N/ha höher als auf dem Boden Welzow. Auch die **P- und K-Entzüge** sind in diesem Jahr auf dem Braunerde-Podsol deutlich höher als auf dem Boden Welzow. In den Jahren 2012 und 2013 sind die N- und P-Entzüge zwischen den Varianten und beiden Böden vergleichbar. Die K-Entzüge sind auf dem Boden Welzow in allen Varianten tendenziell höher als auf dem Boden Zinnitz.

Auch in der Literatur ergibt die Düngung (u. a. Kompost) in Kombination mit Biokohle im Mais eine verbesserte P-, K- und Zn-Aufnahme, vergleichbare N-, Mg-, Ca-, Mn-, Co-, Cr- und Pb-Gehalte sowie geringere Na-, Cu-, Ni- und Cd-Gehalte (Glaser et al., 2015). Fischer (unveröffentlicht) beobachtet eine schlechtere N-Ernährung und tendenziell geringere Maiserträge, wenn die Biokohle mit dem Kompost nur gemischt wird. Eine tendenzielle Verbesserung des Ertrages und der N-Ernährung treten bei der gemeinsamen Kompostierung auf (Glaser und Kammann, 2013; Kammann et al., 2016). Die Kombination von Biokohle und mineralischer Düngung ergibt auf einem Oxisol unter tropischen Bedingungen höhere Erträge von Reis und Sorghum, die einen gesteigerten Nährstoffentzug (N, P, K, Ca, Mg) bewirken (Steiner et al., 2007). Die Kombination von Kompost und Biokohle führt zu den höchsten N-Gehalten im Blatt, allerdings auch zu signifikant geringeren Erträgen (Steiner et al., 2007).

### 5.6.3 Fazit

Die BKS-Düngung führt teilweise zu einer Verbesserung der Flächenproduktivität. In dem Gefäßversuch I kann auf den Böden Welzow und Zinnitz keine Verbesserung der Ertragsfähigkeit festgestellt werden. Dies ist auf die geringen N-Mineraldüngeräquivalente der BKS von < 10 % zurückzuführen. Die Prüfung einer Vielzahl an BKS-Varianten im Gefäßversuch II ergibt eine positive Ertragswirkung der eingesetzten BKS mit einer Gabenhöhe von 90 t/ha auf den Böden Welzow und Zinnitz. Die Biokohle zeigt eine bessere Ertragswirksamkeit als die Braunkohle. Unter dem Gesichtspunkt der Ertragsfähigkeit zeichnet sich das Substitut GPM als ein interessanter Inputstoff für die Herstellung von BKS ab. Im Bodensäulenversuch sind durch die BKS ebenfalls positive Ertragseffekte auf den Böden Welzow und Zinnitz durch die BKS-Düngung zu verzeichnen, wobei eine Gabenhöhe von 30 t/ha vorteilig erscheint. In dem Lysimeterversuch zeigt sich durch die BKS-Düngung, abgesehen vom ersten Versuchsjahr, eine positive Ertragswirkung vor allem auf dem Kippboden Welzow. Der bereits gut mit N und P versorgte Braunerde-Podsol reagiert nicht eindeutig ertrags-

steigernd auf die BKS-Gaben.

Die Verwendung der BKS zeigt im Mittel eine geringere N-Versorgung im Vergleich zur mineralischen Düngung. Die P- und K-Versorgung durch die BKS ist im Vergleich zur mineralischen Düngung in der Regel verbessert, mindestens aber gleichwertig. Im Gefäßversuch I weist der Aufwuchs der BKS30-Varianten geringere Nährstoffgehalte auf als der Aufwuchs der BKS15-Varianten. Im Gefäßversuch II erzielte die Verwendung von GPM in den BKS und die Erhöhung des Biokohleanteils von 15 auf 30 Vol.-% positive Effekte in Hinblick auf die N-, P- und K-Versorgung des Pflanzenaufwuchses. Die Steigerung der Gabenhöhe von 30 auf 90 t/ha ist nur hinsichtlich der P- und K-Versorgung vorteilhaft. Die Braunkohle als Biokohlesubstitut führt zu einer tendenziell geringeren N-Versorgung, während die Effekte auf die P- und K-Versorgung nicht eindeutig sind. Die Variation der Fermentationsparameter verringert die N- und K-Versorgung des Aufwuchses, im Hinblick auf die P-Versorgung sind positive und negative Effekte feststellbar. Im Bodensäulenversuch bleibt fraglich, welchen Einfluss die Fehlfunktionen der automatischen Bewässerung, von der hauptsächlich die Variante 90 BKS15 des Bodens Welzow betroffen war, auf den Ertrag und die Nährstoffgehalte haben. In den Gefäßversuchen I und II zeigt sich zudem eine optimale Versorgung mit Mg, Mn, Cu und Zn durch die BKS-Düngung, die mit der mineralischen Düngung vergleichbar ist. Die tendenziell unzureichende Mn-Versorgung bei höheren BKS-Gaben muss weiter geprüft werden.

## 5.6 Schwermetallgehalte in Böden und Pflanzenaufwüchsen

### 5.6.1 Schwermetallgehalte in Böden

Der **Boden Welzow** und der **Boden Zinnitz** weisen in den Gefäßversuchen I und II vergleichbare Schwermetallgehalte auf. Die Cd-Gehalte liegen in beiden Versuchen unterhalb der Nachweisgrenze von 0,1 mg/kg. Die ermittelten Schwermetallgehalte halten die Vorsorgewerte der BBodSchV (1999) und die Hintergrundwerte der LABO (2017) ein.

In dem **Gefäßversuch I** nimmt der Zn-Gehalt kontinuierlich mit Erhöhung der BKS-Gaben zu. Die nicht praxistaugliche Aufwandmenge von 240 t/ha BKS15 führt zu einem erhöhten Ni-Gehalt in dem Boden Welzow. Ein Einfluss der gesteigerten BKS-Gaben auf die Pb- und Cd-Gehalte der beiden Böden kann nicht festgestellt werden.

Auch in dem **Gefäßversuch II** steigt in beiden Böden der Zn-Gehalt durch die BKS-Düngung im Vergleich zu der mineralisch gedüngten Variante an. Die Ni-Gehalte des Bodens Welzow sind sowohl in der mineralisch gedüngten Variante als auch in den BKS-Varianten erhöht.

## 5.6.2 Schwermetallgehalte in den Pflanzenaufwüchsen

Ausgehend von den geringen Schwermetallgehalten in Böden sind auch die Schwermetallgehalte der Knaulgrasaufwüchse in den Gefäßversuchen I und II sehr gering. Die Grenzwerte der FuttMV (1981) für Pb und Cd werden eingehalten. Für die Elemente Ni und Cr gibt es aktuell keine Grenzwerte in Grünfutter. Eine Einordnung nach der BioAbfV (2012) weist auf ebenfalls sehr geringe Gehalte hin. Die Schwermetalle Cu und Zn werden als Spurennährstoffe erfasst.

## 5.6.3 Fazit

Die unbedenklichen Schwermetallgehalte der geprüften BKS führen nicht zu einer stärkeren Anreicherung von Schwermetallen in Böden im Vergleich zu der mineralischen Düngung. Insbesondere der Gefäßversuch I belegt dies auch für hohe und praxisunübliche Düngermengen von bis zu 240 t/ha BKS15. Für die Herstellung von BKS sollten vorhandene Gesetze und Verordnungen zu Schadstoffgrenzwerten wie beispielsweise die BioAbfV (2012) eingehalten werden. Auch speziell für die Produktion der Biokohle gibt es entsprechende Richtlinien (Schmidt et al., 2012).

## 5.7 Stoffausträge mit dem Sickerwasser

### 5.7.1 Stickstoff

In dem **Bodensäulenversuch** ergeben sich für den Boden **Welzow** (W) und den Boden **Zinnitz** (Z) über den gesamten Versuchszeitraum von 30 Monaten die höchsten  $N_{\min}$ -Austräge in der Variante MIN (W: 409 kg/ha; Z: 507 kg/ha) und die geringsten  $N_{\min}$ -Austräge in der Variante 30 BKS15 (W: 245 kg/ha; Z: 159 kg/ha). Mit Erhöhung der BKS-Gabe auf 90 t/ha steigen die  $N_{\min}$ -Austräge (W: 373 kg/ha; Z: 376 kg/ha) an, unterschreiten jedoch das Niveau der Variante MIN. Die BKS-Gabe in Höhe von 30 t/ha reduziert unter diesen Versuchsbedingungen die  $N_{\min}$ -Austräge um 40,1 % (W) bzw. 68,6 % (Z) bezogen auf die Variante MIN. Die höhere BKS-Gabe von 90 t/ha reduziert die  $N_{\min}$ -Austräge um 8,8 % (W) bzw. 25,8 % (Z) bezogen auf die Variante MIN. Die geringen  $N_{\min}$ -Austräge der Variante 30 BKS15 sind auf das gute Wuchsverhalten des Pflanzenbestandes auf dem Boden Zinnitz uneingeschränkt und auf dem Boden Welzow ab der Periode II zurückzuführen, der das verfügbare  $N_{\min}$  besser aufgenommen hat.

In dem **Lysimeterversuch** liegen für den Boden **Welzow** über den gesamten Versuchszeitraum von 26 Monaten sehr geringe  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen und damit auch sehr geringe  $N_{\min}$ -Austräge in Höhe von 18,2 kg/ha (MIN), 9,3 kg/ha (3x30 BKS15) und 17,1 kg/ha (90 BKS15) vor. Analog zu dem Bodensäulenversuch zeigt sich eine Re-

duktion der  $N_{\min}$ -Austräge mit der Applikation der BKS um 48,9 % (3x30 BKS15) bzw. 6,0 % (90 BKS15) bezogen auf die Variante MIN. Weder die einmalige hohe Applikation von 90 t BKS noch die zeitlich gestaffelte Gabe von dreimal 30 t BKS/ha führen somit nicht zu einer verstärkten N-Auswaschung (Rademacher und Haubold-Rosar, 2015a). Die reduzierten  $N_{\min}$ -Austräge nach organischer Düngung im Vergleich zur mineralischen Düngung des Bodens Welzow (BS, Lys) und des Bodens Zinnitz (BS) decken sich mit den Ergebnissen in der Literatur. Die Verringerung der N-Auswaschung mit dem Sickerwasser nach der Applikation von unbehandelter Biokohle beschreiben verschiedene Autoren, u.a. Clough et al. (2013), Yao et al. (2012) und Zheng et al. (2013a). Bradley et al. (2015) stellen auf einem mit Biokohle und Kuhmist gedüngten Sandboden reduzierte N-Austräge ( $N_{\text{tot}}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) mit steigendem Biokohleanteil fest. Ebenso stellen Lehmann et al. (2003a) in einem Lysimeterversuch mit Terra Preta geringere kumulative Nährstoffausträge (N, K, Ca und Mg) im Vergleich zu einem ungedüngten Ferrasol fest. Auch die nur geringe Reduzierung der N-Auswaschung im Vergleich zur mineralischen Referenzvariante bzw. der Anstieg der N-Auswaschung mit Erhöhung der BKS-Gabe in beiden Versuchen deckt sich mit den Literaturergebnissen. Schulz und Glaser (2012) beobachten nach der Applikation von Biokohle und Kompost keine Reduzierung der  $\text{NO}_3^-$ - und  $\text{NH}_4^+$ -Austräge mit dem Sickerwasser. Iqbal et al. (2015) können in einem Säulentest keine Reduzierung der N-Austräge im Sickerwasser durch die Biokohle bzw. Biokohle-Kompost-Mischungen feststellen. Sie identifizieren diesbezüglich keinen Unterschied zwischen unbehandelter und co-kompostierter Biokohle. Lehmann et al. (2003a) bestätigen sogar eine Steigerung der Nährstoffausträge nach der Düngung einer Terra Preta im Lysimeterversuch im Vergleich zu einem gedüngten und zusätzlich mit Holzkohle behandelten Ferrasol. Der **Braunerde-Podsol** im **Lysimeterversuch** zeigt im Versuchsverlauf deutlich höhere  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen, die letztlich auch zu höheren  $N_{\min}$ -Austrägen führen. Als Ursachen dafür kann die höhere Wasserleitfähigkeit und eine insgesamt stärkere Umsetzung und Mineralisierung der mit dem BKS zugeführten organischen Primärsubstanzen in dem Ackerboden angesehen werden (Rademacher und Haubold-Rosar, 2015a). Die  $N_{\min}$ -Austräge nehmen mit der BKS-Gabe im Vergleich zu der Variante MIN zu: 92,6 kg/ha (MIN), 121 kg/ha (3x30 BKS15) und 145,5 kg/ha (90 BKS15). Dies kann auf die geringeren Erträge der BKS-Varianten und den damit einhergehenden höheren Sickerwassermengen bei geringeren Nährstoffentzügen zurückgeführt werden (Rademacher und Haubold-Rosar, 2015a). Rademacher und Haubold-Rosar (2015b) beschreiben die Fortführung des Lysimeterversuches um ein weiteres Jahr ( $\Sigma$  38 Monate) mit der Kultur Winterweizen. Für den Kippboden Welzow sind weiterhin sehr geringe  $N_{\min}$ -Austräge unter 30 kg/ha zu verzeichnen. Der Braunerde-Podsol aus Sand

weist hohe  $N_{\min}$ -Austräge von 150 kg/ha (MIN) 184 kg/ha (3x30 BKS15) und 193 kg/ha (90 BKS15) auf. Die ansteigende N-Auswaschung mit der BKS-Düngung des Braunerde-Podsols ist auf ein N-Überangebot aus der BKS-Düngung zurückzuführen, welches in Kombination mit der erhöhten Wasserleitfähigkeit eine verstärkten  $N_{\min}$ -Ausstrag mit Sickerwasser nach sich zieht. In einer gedüngten Terra Preta beobachten Lehmann et al. (2003a) ebenfalls erhöhte Nährstoffausträge im Vergleich zu einem gedüngten und zusätzlich mit Holzkohle behandelten Ferrasol.

### 5.7.2 Phosphor

In dem **Bodensäulen- und Lysimeterversuch** treten in den Böden **Welzow**, **Zinnitz** und dem **Braunerde-Podsol** keine relevanten  $o\text{-PO}_4$ -Konzentrationen in dem Sickerwasser auf. Die summierten P-Austräge über die Versuchszeiträume von 30 (BS) bzw. 26 (Lys) Monaten liegen deutlich unter 1 kg/ha. Die  $o\text{-PO}_4$ -Konzentrationen liegen zudem häufig unter dem Bestimmungsgrenzwert, so dass keine Aussage zu einem reduzierenden oder erhöhenden Einfluss auf den P-Austrag anhand dieser Daten getroffen werden kann. Auch Iqbal et al. (2015) und Schulz und Glaser (2012) finden keinen reduzierenden Effekt auf die P-Austräge nach gemeinsamer Applikation von Biokohle und Kompost. Nach Yao et al. (2012) hat der Ausgangsstoff der Biokohle einen Einfluss auf die P-Austräge. Eine Biokohle aus Brasilianischem Pfefferbaum reduziert die die P-Austräge während eine Biokohle aus Erdnussschalen zusätzliche P-Austräge verursacht.

### 5.7.3 Kalium

Die summierten K-Austräge ( $\Sigma$  30 Monate) aller Varianten der Böden Welzow und Zinnitz sind in dem **Bodensäulenversuch** gering. In dem Boden **Welzow** liegen zwischen den Varianten MIN und 30 BKS15 mit 11,7 und 11,6 kg/ha vergleichbare K-Austräge vor. Diese werden mit der Steigerung der BKS-Gabe auf 90 t/ha geringfügig um 2,1 bzw. 2,2 kg/ha erhöht. In dem Boden **Zinnitz** steigen die K-Austräge ab einer Gabenhöhe von 90 t/ha BKS von 4,4, kg/ha (MIN) auf 15,6 kg/ha (30 BKS15) an. Die weitere Steigerung der BKS-Gabe auf 90 t/ha bewirkt einen Anstieg des K-Austrages auf 20,5 kg/ha (90 BKS15).

In dem **Lysimeterversuch** sind die summierten K-Austräge des Bodens Welzow mit 26,1 kg/ha (MIN), 21,4 kg/ha (3x30 BKS15) und 18,6 kg/ha (90 BKS15) über den Versuchszeitraum von 26 Monaten sehr gering. Die K-Austräge nehmen mit der BKS-Gabe ab (Rademacher und Haubold-Rosar, 2015a). Der **Braunerde-Podsol** weist mit 19,7 kg/ha (MIN), 24 kg/ha (3x30 BKS15) und 34 kg/ha (90 BKS15) höhere summierte K-Austräge auf als der Boden Welzow. Die K-Austräge steigen nach der BKS-Gabe im

Vergleich zur reinen mineralischen Düngung an. Dies ist durch höhere Sickerwassermengen und erhöhte K-Konzentrationen in den Sickerwässern der BKS-Varianten bedingt (Rademacher und Haubold-Rosar, 2015a). Bei der Verlängerung dieses Versuches um 12 Monate mit der Kultur Winterweizen sind für den Boden Welzow weiterhin abnehmende und für den Braunerde-Podsol zunehmende K-Austräge mit den Sickerwässern zu verzeichnen (Rademacher und Haubold-Rosar, 2015b).

#### **5.7.4 Fazit**

Die Versuche zeigen, dass die BKS in Abhängigkeit von dem Boden die N- und K-Austräge reduzieren, aber auch erhöhen können. In dem Braunerde-Podsol entstand durch die BKS-Düngung ein Nährstoffüberangebot und verstärkte die N- und K-Auswaschung. In dem Ackerboden Zinnitz reduziert die BKS-Düngung die N-Auswaschung und verstärkt die K-Auswaschung. In dem humus- und nährstoffarmen Kippboden Welzow zeigt sich eine Reduzierung der N-Austräge sowie reduzierte (Lys) bis leicht steigende (BS) K-Austräge. Die P-Austräge der Böden Welzow, Zinnitz und des Braunerde-Podsols sind in allen Varianten sehr gering, so dass keine Effekte der BKS feststellbar sind. Die Verwendung von BKS ist daher vor allem für die Rekultivierung von Kippböden eine vielversprechende Option.

### **5.8 Fehlerbetrachtung**

Die Etablierung des Bewuchses unter Freilandbedingungen war insbesondere zum **Gefäßversuch I** schwierig. Im Mai 2011 lag der erfasste Niederschlag 49 mm unter dem langjährigen Mittel (1981 - 2010) der Station Cottbus. Auch im Juni lag der Niederschlag 26 mm unter dem langjährigen Mittel (1981 - 2010) der Station Cottbus. Zusätzlich war der Juni 2011 um 1,2 °C wärmer als das langjährige Mittel (1981 - 2010) der Station Doberlug-Kirchhain (vgl. Abbildung 3). Die Keimlinge und Jungpflanzen zeigten trotz intensiver Bewässerung Trockenschäden. Vermutlich erwärmten sich die Gefäße und damit der Bodenkörper aufgrund der fehlenden Beschattung und der exponierten Lage auf Tischen stärker als der Erdboden. Bei vereinzelt Starkniederschlägen im Juli 2011 kam es in nicht quantifizierbarem Umfang zu Nährstoffverlusten durch Auswaschung aber auch zu Bodenverlusten durch Abspülen bzw. Spritzverlusten von Bodenmaterial. Das Sickerwasser wurde mittels Auffangschalen abgefangen und dem jeweiligen Gefäß wieder zugeführt. Vereinzelt waren allerdings die Kapazitäten der Auffangschalen nicht ausreichend, so dass in solchen Fällen keine vollständige Rückführung gewährleistet war. Die Integration jeweils einer alleinigen Kompost- und Biokohlevariante in den Gefäßversuch I hätte einen wichtigen Beitrag zur Bestimmung des Biokohle- und Komposteffektes liefern können.

Zur Herstellung der BKS für den **Gefäßversuch II** erfolgte die Abmessung der Ausgangsstoffe volumetrisch. Aufgrund der heterogenen Struktur des Laubkompostes und des Gewässerpflegematerials (GPM) traten teils erhebliche Schwankungen der eingesetzten Trockenmassen auf. Zudem ist die unterschiedliche Schüttdichte zwischen der Biokohle und der Braunkohle problematisch für die Vergleichbarkeit dieser BKS. Die volumetrische Abmessung ist vor allem für größere Mengen vorteilig. Für diese geringen Mengen wäre eine Abmessung bezogen auf die Masse genauer gewesen, da vermutlich die anfänglichen Schwankungen der BKS die Effekte in dem Gefäßversuch überlagern. Das GPM hat sich in dem Gefäßversuch II als interessanter Inputpartner für BKS gezeigt. Allerdings kann durch diesen Versuch nicht geklärt werden, welchen Einfluss der zur Kompostierung hinzugegebene Kompostbeschleuniger hat, da es keine Variante mit GPM ohne Kompostbeschleuniger gab. Insbesondere in dem Gefäßversuch II wurden aus Kostengründen häufig nur Einfachbestimmungen ( $n = 1$ ) durchgeführt, so dass keine statistische Auswertung durchgeführt werden kann. Die Einflüsse der Ausgangsstoffe und der Herstellungsparameter auf die BKS, den Boden und die Pflanzen sind daher nur bedingt auf andere Versuche übertragbar. Dieser Versuch liefert allerdings wichtige Anhaltspunkte für zukünftige Untersuchungen. Aufgrund der oben genannten Punkte ist eine allgemeingültige Aussage zur Eignung eines bestimmten Ausgangsstoffes nur eingeschränkt vertretbar.

In dem **Bodensäulenversuch** haben sich die automatische Bewässerung und die damit zusammenhängende Erfassung des Bewässerungswassers als problematisch erwiesen. Zudem kam es zu einem Totalausfall der Feuchtesensoren. Für jede Variante gab es nur eine Wiederholung, so dass keine Möglichkeit zur Gegenüberstellung der Werte innerhalb des Versuches besteht. Für zukünftige Säulenversuche dieser Art sollte von Beginn an auf ein manuelles Bewässerungsmanagement zurückgegriffen werden. Wenn es im Rahmen der finanziellen Möglichkeiten ist, sind mindestens zwei oder besser drei Wiederholungen für eine belastbare Auswertung von Vorteil.

In dem **Lysimeterversuch** wurde ein geringfügig von dem Ackerboden Zinnitz abweichender Braunerde-Podsol verwendet. Dieser hat sich, anders als erwartet, im Versuchsverlauf als nicht vergleichbar mit dem sonst eingesetzten Ackerboden Zinnitz erwiesen. In dem Lysimeterversuch wurde die Gabe von 30 t/ha BKS zeitlich gestaffelt dreimal ausgeführt, so dass sie leider nicht mit den anderen Versuchen vergleichbar ist.



## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die in der Lausitz durchgeführten Versuche belegen, dass der Einsatz von Biokohle-substraten (BKS) auf landwirtschaftlichen Nutzflächen, insbesondere auf Grenzertragsstandorten, zu Verbesserungen der Bodenfunktionen und der Flächenproduktivität führen kann. Die Dauerhaftigkeit dieser Beobachtung kann, aufgrund der recht kurzen Versuchsspannen von maximal 2,5 Jahren, nicht abschließend beurteilt werden.

### 6.1 Wasserhaushalt der Böden

Der Einsatz der BKS führt in dem Kippboden Welzow (W) und in dem Ackerboden Zinnitz (Z) zu einer tendenziellen Reduzierung der Trockenrohddichte, die mit einer Steigerung des Gesamtporenvolumens auf bis zu 116 % (W) bzw. 124 % (Z) bei einer Gabenhöhe von 240 t/ha BKS15 einhergeht. Die entscheidende Wasserhaushaltsgröße für eine pflanzenbauliche Bewirtschaftung ist die nutzbare Feldkapazität. Diese ist in dem Kippboden Welzow mit 8 Vol.-% gering und kann mit einer Aufwandmenge von 240 t/ha BKS15 auf 172 % gesteigert werden. In dem Ackerboden Zinnitz, der bereits eine hohe nutzbare Feldkapazität von etwa 25 Vol.-% aufweist, ist durch die BKS kein eindeutiger Effekt feststellbar. Im Lysimeterversuch zeigt sich, dass die dreimalige Gabe von 30 t/ha BKS15 einen stärkeren erhöhenden Einfluss auf die nutzbare Feldkapazität hat als die einmalige Gabe von 90 t/ha. Das nicht pflanzenverfügbare Totwasser wird in beiden Böden in geringem Maße durch den BKS-Einsatz angehoben.

In dem Kippboden Welzow ist in allen Versuchen durch die BKS-Gaben ein positiver Effekt auf die nutzbare Feldkapazität festzustellen. Der Ackerboden Zinnitz weist deutlich höhere Ausgangswerte hinsichtlich der nutzbaren Feldkapazität auf. Diese werden durch die BKS-Gaben kaum beeinflusst.

### 6.2 C-Haushalt und Humusgehalt

Ausschlaggebende Kriterien für den C-Haushalt und den Humusgehalt sind die organische Bodensubstanz und das C/N-Verhältnis aus  $C_{org}$ - und  $N_t$ -gehalten. Der junge Kippboden Welzow weist deutlich geringere Ausgangsgehalte an organischer Bodensubstanz,  $C_{org}$  und  $N_t$  auf als der langjährig bewirtschaftete Ackerboden Zinnitz bzw. der Braunerde-Podsol. Die Verwendung der BKS mit einer Aufwandmenge von bis zu 240 t/ha BKS15 führt zu einer Anhebung der organischen Bodensubstanz auf bis zu 448 % (W) bzw. 300 % (Z). Der  $C_{org}$ -Gehalt von 0,2 % in dem Kippboden Welzow kann durch den BKS15-Einsatz von bis zu 240 t/ha auf bis zu 1340 % erhöht werden. Die Fraktionierung des Kohlenstoffs zeigt, dass der fest gebundene C (pyrophosphatlöslich), der umsetzbare Kohlenstoff (heißwasserlöslich) und auch der verfügbare Kohlen-

stoff (wasserlöslich) mit Erhöhung der BKS-Menge kontinuierlich ansteigen. Die geringen Gehalte an  $C_{\text{hwI}}$  können durch die BKS-Düngung deutlich verbessert werden. Ebenso nimmt der  $N_t$ -Gehalt in dem Kippboden durch die BKS-Düngung deutlich um bis zu 1000 % von 0,01 % auf 0,12 % zu. Auch hier steigen der fest gebundene, der umsetzbare und der verfügbare Stickstoff mit der Erhöhung der BKS-Gabe kontinuierlich an. In dem Ackerboden Zinnitz ist die Zunahme um 245 % auf ein Niveau von 2,3 %  $C_{\text{org}}$  geringer als in dem Kippboden Welzow. Die Fraktionierung des Kohlenstoffs ergibt, dass der Kohlenstoff größtenteils fest gebunden vorliegt. Allerdings ist anders als in dem Kippboden keine kontinuierliche Steigerung der einzelnen Fraktionen im Zuge der Erhöhung der BKS-Gaben zu verzeichnen. Der  $N_t$ -Gehalt nimmt ausgehend von 0,08 % mit der Erhöhung der BKS-Gabe auf 240 t/ha um bis zu 0,05 %  $N_t$  zu. Es sind keine kontinuierlichen Steigerungen der einzelnen Stickstofffraktionen mit Erhöhung der BKS-Gabe auszumachen.

Die Prüfung des Braunerde-Podsols in dem Lysimeterversuch zeigt, dass die  $C_{\text{org}}$ - und  $N_t$ -Gehalte bei der dreimaligen Gabe von 30 t/ha BKS15 kontinuierlich ansteigen, während die einmalige Gabe von 90 t/ha BKS15 nach einer anfänglichen Erhöhung zu einer tendenziellen Reduzierung der  $C_{\text{org}}$ - und  $N_t$ -Gehalte im Versuchsverlauf führt.

In den Böden werden die C/N-Verhältnisse durch die Anwendung der BKS weiter. Der Gehalt von 30 Vol.-% Biokohle bzw. Braunkohle in dem BKS erhöht die C/N-Verhältnisse des Kippbodens Welzow deutlich über den angestrebten Bereich von 15 - 20. Von einer Anwendung dieser hohen Biokohle- bzw. Braunkohlegehalte in den BKS ist daher auf diesen gering entwickelten Böden abzuraten. Die Versuchsböden zeigen durch den BKS-Einsatz eine Verbesserung des C-Haushaltes und des Humusgehaltes. Insbesondere für den jungen Kippboden Welzow ist die Zufuhr organischer Substanz durch die BKS bedeutsam, da so ein Initial für eine weitere nachhaltige Bodenentwicklung gegeben wird.

### **6.3 Nährstoffspeicherung und -verfügbarkeit insbesondere der Makronährstoffe Stickstoff und Phosphor**

Die BKS-Düngung führt in allen Versuchsböden zu einer Erhöhung der  $KAK_{\text{pot}}$  und der Gesamtgehalte an N, P, K, Ca, Na, Mg und Mn. Die Gehalte der Spurennährstoffe Cu und Zn in den Böden nehmen in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der BKS zu bzw. sind gleichbleibend.

Die Erfassung der Nährstoffgehalte in Böden der Gefäßversuche und des Bodensäulenversuches erfolgte jeweils zum Versuchsabschluss, so dass die Werte aufgrund des Entzuges durch den Pflanzenaufwuchs geringer ausfallen. Dementsprechend sind die

$N_{\min}$ -Gehalte in dem Kippboden Welzow mit 3 - 9 kg/ha sehr gering und in dem Ackerboden Zinnitz mit 9 - 16 kg/ha gering. Die  $N_{\min}$ -Gehalte nehmen in dem Kippboden Welzow tendenziell mit den steigenden BKS-Gaben zu, während sie in dem Ackerboden Zinnitz tendenziell abnehmen.

In dem Lysimeterversuch konnten vor dem Vegetationsbeginn, aufgrund des fehlenden Pflanzenentzuges, höhere  $N_{\min}$ -Gehalte festgestellt werden als im Anschluss an die Ernte. Auch hier lagen in dem Kippboden Welzow äußerst geringe  $N_{\min}$ -Gehalte von 1 - 9 kg/ha vor. Die  $N_{\min}$ -Gehalte des Braunerde-Podsols weisen mit einer Spanne von 7 - 34 kg/ha etwas höhere Werte auf.

Die P-Versorgung der Böden Welzow und Zinnitz wird durch die BKS-Düngung deutlich verbessert. Ausgehend von den Versorgungsstufen A (W) bzw. B (Z) wird in beiden Böden mit der BKS-Düngung je nach Pflanzenentzug die Versorgungstufe C bis E erreicht (Von Wulffen et al., 2008).

Die Erhöhung des Kohleanteils von 15 Vol.-% auf 30 Vol.-% und die Substitution der Biokohle mit Braunkohle führen zu tendenziell geringeren Verfügbarkeiten an  $N_{\min}$ , P und K. Dies kann unter anderem an einer stärkeren Bindung des Stickstoffs an die Kohle (Kammann et al., 2015) sowie auf geringere P- und K-Gehalte in der Braunkohle zurückgeführt werden.

Generell zeigt sich in allen Versuchen eine positive Beeinflussung des Nährstoffhaushaltes durch die BKS. Im Vergleich zu der mineralischen Referenzvariante ist eine mindestens gleichwertige bzw. in der Regel verbesserte Verfügbarkeit der Makronährstoffe N, P und K zu verzeichnen.

## **6.4 Flächenproduktivität und Ertragseffekte**

In den Versuchen können sowohl Ertragssteigerungen als auch Ertragsdepressionen durch den Einsatz der BKS beobachtet werden. Im ersten Gefäßversuch sind die geringen N-Mineraldüngeräquivalente der BKS von < 10 % maßgeblich verantwortlich für die Mindererträge der BKS-Varianten im Vergleich zu der mineralischen Referenzvariante. Als Konsequenz daraus erfolgten mineralische Ergänzungsdüngungen zu den BKS-Varianten. Der Aufwuchs der BKS30-Varianten weist geringere N-, P- und K-Nährstoffgehalte auf als der Aufwuchs der BKS15-Varianten.

Die Prüfung einer Vielzahl an BKS-Varianten im Gefäßversuch II ergibt eine positive Ertragswirkung der eingesetzten BKS mit einer Gabenhöhe von 90 t/ha auf den Böden Welzow und Zinnitz. Die Ertragsteigerungen betragen im Mittel 112 % auf dem Kippboden Welzow und 115 % auf dem Ackerboden Zinnitz. Die maximale Ertragssteigerung liegt bei 137 % (W) bzw. 132 % (Z). Die Braunkohle als Substitut der Biokohle zeigt eine geringere Ertragswirksamkeit und eine tendenziell geringere N-Versorgung

in dem Pflanzenaufwuchs als die BKS mit Biokohle. Unter dem Gesichtspunkt der Ertragsfähigkeit und hinsichtlich der N-, P- und K-Versorgung des Pflanzenaufwuchses zeichnet sich das Substitut Gewässerpflegematerial als ein interessanter Inputstoff für die Herstellung von BKS ab. Die Erhöhung des Biokohleanteils von 15 auf 30 Vol.-% erzielt positive Effekte in Hinblick auf die N-, P- und K-Versorgung des Pflanzenaufwuchses. Hinsichtlich der P- und K- Versorgung ist auch eine Steigerung der Gabenhöhe von 30 t/ha auf 90 t/ha vorteilig. Die Variation der Fermentationsparameter verringert die N- und K-Versorgung des Aufwuchses. In Hinblick auf die P-Versorgung sind keine eindeutigen Effekte feststellbar. In den Gefäßversuchen zeigt sich zudem durch die BKS-Düngung eine optimale Versorgung mit Mg, Mn, Cu und Zn, die mit der mineralischen Düngung vergleichbar ist.

In dem Bodensäulenversuch sind durch die BKS15-Düngung ebenfalls positive Ertragseffekte festzustellen. In der Ertragssumme über alle Ernten wird mit einer Gabenhöhe von 30 t/ha BKS15 in dem Kippboden Welzow ein Zuwachs von 168 % und in dem Ackerboden Zinnitz von 210 % im Vergleich zu der mineralischen Referenzvariante erfasst. Die Erhöhung der BKS15-Düngung auf 90 t/ha ergibt auf dem Kippboden Welzow eine Ertragssteigerung von 187 %, während auf dem Ackerboden Zinnitz lediglich ein Zuwachs von 114 % gegenüber der mineralischen Düngung zu verzeichnen ist.

In dem Lysimeterversuch zeigt sich, abgesehen vom ersten Versuchsjahr, vor allem auf dem Kippboden Welzow eine positive Ertragswirkung durch die BKS-Düngung. Der Braunerde-Podsol reagiert nicht eindeutig ertragssteigernd auf die BKS-Gaben.

In Hinblick auf die Nährstoffgehalte in den Pflanzenaufwüchsen zeigt sich im Mittel eine unzureichende N-Versorgung der BKS-Varianten im Vergleich zu der mineralischen Düngung. Die P- und K-Versorgung des Pflanzenaufwuchses ist in der Regel in den BKS-Varianten gegenüber der mineralischen Düngung verbessert, mindestens aber gleichwertig.

## **6.5 Sickerwasserqualität**

Entscheidend für die Akzeptanz organischer Düngemittel bzw. Bodenverbesserungsmittel ist ein mindestens neutraler Effekt auf die Sickerwasserqualität in Hinblick auf die Nitrat- und Phosphatgehalte. Mit dem Bodensäulen- und Lysimeterversuch kann für den Kippboden Welzow und den Ackerboden Zinnitz eine Reduktion der  $N_{\min}$ -Austräge in dem Sickerwasser im Vergleich zur mineralischen Düngung durch die BKS belegt werden.

Die  $N_{\min}$ -Austräge mit dem Sickerwasser nehmen in dem Bodensäulenversuch (BS) bei einer Aufwandmenge von 30 t/ha BKS15 um 40 % (W) bzw. 69 % (Z) und bei 90 t/ha

BKS15 um 9 % (W) bzw. 26 % (Z) im Vergleich zur mineralischen Düngung ab. In dem Lysimeterversuch (Lys) können die  $N_{\min}$ -Austräge in dem Sickerwasser des Kippbodens Welzow im Vergleich zur mineralischen Düngung mit einer zeitlich gestaffelten Gabe von 3x30 t/ha BKS15 um 49 % und bei einer einmaligen Applikation von 90 t/ha BKS15 um 6 % reduziert werden. Die geringen K-Austräge werden durch die BKS-Düngung in dem Kippboden Welzow reduziert (Lys) bzw. steigen tendenziell an (BS). In dem Ackerboden Zinnitz nehmen die K-Austräge auf geringem Niveau durch die BKS-Düngung zu.

Der in dem Lysimeterversuch getestete sandige Braunerde-Podsol reagierte auf die BKS-Düngung mit steigenden  $N_{\min}$ -Austrägen auf 131 % (3x30 t/ha BKS15) bzw. 157 % (90 t/ha BKS15) sowie verstärkten K-Austrägen in dem Sickerwasser im Vergleich zu der mineralischen Düngung.

Die P-Austräge der Böden Welzow, Zinnitz und des Braunerde-Podsols sind in allen Varianten sehr gering, so dass keine Effekte der BKS feststellbar sind.

## **6.6 Eignung von Inputstoffe für die Herstellung von Biokohle-substraten aus pflanzenbaulicher Sicht**

Die geprüften BKS mit 15 Vol.-% und 30 Vol.-% der Firma Areal wurden unter anderem mit einem vorgerotteten Grünschnitt erzeugt. Diese zeigen im Rahmen des Gefäßversuches I, des Bodensäulenversuches und des Lysimeterversuche positive Effekte auf bodenphysikalische und -chemische Parameter. In Hinblick auf die Ertragsfähigkeit sind die geringen N-Mineraldüngeräquivalente ungünstig. Dem wurde durch eine mineralische N-Ergänzungsdüngung begegnet. Eine verbesserte N-Nachlieferung aus den BKS ist aus pflanzenbaulicher Sicht daher wünschenswert.

Mit dem Gefäßversuch II können Anhaltspunkte zur Eignung der Inputstoffe als Grundlage für weiterführende Untersuchungen gegeben werden. Eine Vielzahl an BKS-Varianten, die auf unterschiedlichen Inputstoffen und Mischungsverhältnissen basieren (s. K. 3.2.2.2), wurde pflanzenbaulich geprüft. Die Vergleichsvarianten enthielten in der Standardmischung einen vorgerotteten Laubkompost, der in einigen Varianten durch schilfartiges Gewässerpflegematerial substituiert und zum Teil durch einen Zusatz von Maissilage ergänzt wurde. Unter dem Gesichtspunkt der Verbesserung der Ertragsfähigkeit, der N-, P- und K-Versorgung des Pflanzenaufwuchses und der positiven Effekte auf Bodenparameter zeichnet sich das Substitut Gewässerpflegematerial als ein interessanter Inputstoff für die Herstellung von BKS ab. Die Verlängerung der Vorrotte des Gewässerpflegematerials reduziert die positiven Effekte tendenziell. In Folgeuntersuchungen sollte der Einfluss des Kompostbeschleunigers auf die Ertragswirksam-

keit der BKS mit Gewässerpflegematerial überprüft werden. Auch der Zusatzstoff Silage weist in Kombination mit dem Gewässerpflegematerial einen positiven Ertragseffekt auf. Der Zusatzstoff Gips hat lediglich einen erhöhenden Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit.

Zudem wurde die Biokohle und deren Substitut Braunkohle sowohl mit 15 Vol.-% als auch mit 30 Vol.-% in den BKS geprüft. Die BKS mit dem Substitut Braunkohle zeigen eine tendenziell geringere Ertragswirksamkeit und N-Versorgung in dem Pflanzenaufwuchs als die BKS mit Biokohle. Die Anhebung des pH-Wertes im Boden ist mit dem Substitut Braunkohle in dem BKS geringer als mit den vergleichbaren BKS mit Biokohle. Die Erhöhung des Biokohleanteils von 15 Vol.-% auf 30 Vol.-% erzielt positive Effekte in Hinblick auf die N-, P- und K-Versorgung des Pflanzenaufwuchses.

Die Variation der Fermentationsparameter, wie Verlängerung der Fermentationsdauer oder bzw. und Erhöhung der Temperatur, verringert die N- und K-Versorgung des Pflanzenaufwuchses tendenziell.

Aufgrund der Heterogenität der einzelnen Substratansätze und der geringen Anzahl an Wiederholungen (s. K. 5.8) kann keine belastbare Empfehlung für einen Inputstoff gegeben werden. Eine pflanzenbauliche Vorteilswirkung der BKS in Hinblick auf den Ertrag konnte mit einer Gabenhöhe von 90 t/ha für alle Inputstoffe festgestellt werden. Neben der pflanzenbaulichen Wirkung ist für die Auswahl von Inputstoffen zur Herstellung von BKS die regionale Verfügbarkeit entscheidend. Das Gewässerpflegematerial hat sich als sehr interessant erwiesen, da es positive Effekte auf die Bodenparameter und den Ertrag hat und zudem in der Lausitz in großen Mengen verfügbar ist (Fleisch et al., 2013).

## **6.7 Empfehlungen für die praktische Anwendung von BKS**

Die Versuche belegen eine Verbesserung der bodenphysikalischen und -chemischen Bodenparameter durch die BKS-Düngung. Eine positive Ertragswirkung der BKS ist vor allem dann zu erwarten, wenn die ertragsbegrenzenden Faktoren verbessert werden. Die BKS sind daher für eine Anwendung auf landwirtschaftlichen Grenzertragsstandorten prädestiniert. Zudem ist für die anfängliche Stabilisierung der Ertragsfähigkeit eine N-Ergänzungsdüngung zu empfehlen, um das geringe N-Mineraldüngeräquivalent auszugleichen.

Die Erhöhung des Biokohlegehaltes von 15 Vol.-% auf 30 Vol.-% erbrachte keine zusätzlichen Vorteilswirkungen. Zudem ist das BKS30 für den Kippboden Welzow als ungünstig einzuschätzen, da es das C/N-Verhältnis über den optimalen Bereich hinaus erhöht. Die Biokohle ist bei der Herstellung der BKS der größte Kostenfaktor. Zundel et al. (2017) beobachten im deutschsprachigen Raum Preisspannen von 0,26 - 11,90 €/l

Biokohle und beziffern die eigentlichen Herstellungskosten mit 600 €/t bzw. 0,27 €/l. Bei einer Gabenhöhe von 30 t/ha BKS15 fallen allein für die Biokohle (4,5 t/ha) 2700 €/ha an. Zusätzliche Kosten entstehen je nach Region und betrieblichen Gegebenheiten für die weiteren Komponenten zur Herstellung des BKS sowie dessen Ausbringung und Einarbeitung.

Die optimale Gabenhöhe der BKS muss sich an dem Versorgungszustand des Bodens orientieren. Für die Anwendung empfiehlt sich eine zeitlich gestaffelte Gabe von max. 30 t/ha. Auf diese Weise kann der Böden schrittweise verbessert und das Risiko von Nährstoffverlusten aufgrund eines Überangebotes minimiert werden. In Hinblick auf eine kontinuierliche Herstellung der BKS, beispielsweise in einer betriebseigenen Anlage, sind sicherlich an die anfallenden Stoffströme angepasste Aufwandmengen ökonomisch sinnvoll.

## **6.8 Ausblick**

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von BKS Grenzertragsböden hinsichtlich ihrer Bodenfunktionen und Flächenproduktivität aufwerten kann. Die weitere Bearbeitung der Biokohlesubstrate hinsichtlich verbesserter N-Mineraldüngeräquivalente durch beispielsweise nährstoffreiche Zusatzstoffe im Kompostierungsprozess ist aus pflanzenbaulicher Sicht wünschenswert.

Einer Überführung der theoretischen und praktischen Kenntnisse in einem größeren Maßstab in die landwirtschaftliche Praxis stehen aktuell die hohen Herstellungskosten für die Biokohle entgegen. Diese sind für einen landwirtschaftlichen Marktfruchtbetrieb nicht durch Ertragszuwächse und auch nicht durch eine theoretische Vergütung des CO<sub>2</sub>-Sequestrierungspotential mit 15 €/t zu decken (Zundel et al., 2017).

Die Kaskadennutzung der Biokohle kann für viehhaltende Betriebe eine attraktive Alternative sein. Die Alterung und Aufladung der Biokohle mit Nährstoffen wird in die Tierhaltung integriert, so dass eine mehrfache Nutzung der positiven Eigenschaften der Biokohle erfolgt (Schmidt, 2013).

In dem speziellen Fall der Rekultivierung könnte ein zusätzlicher monetärer Vorteil entstehen, wenn es durch den Einsatz der BKS zu einer Verkürzung der Rekultivierungszeit kommt. Dieser kann gegebenenfalls die Kosten für die BKS-Anwendung ausgleichen. Die Verwendung von BKS ist daher vor allem für die Rekultivierung von Kippböden eine vielversprechende Option.

## 7 Zusammenfassende Bewertung

Unsere agrarisch genutzten Böden bilden die Grundlage für die menschliche und tierische Ernährung. Unter dem Gesichtspunkt eines wachsenden Bedarfs an agrarischen Produkten und der zunehmenden Bodendegradation ist die Erhaltung und Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit essentiell. Potenziale für eine ertragswirksame Verbesserung der Bodeneigenschaften bieten insbesondere die marginalen Agrarstandorte, bei denen es sich häufig um leichte Sandböden handelt. Eine Aufwertung dieser Grenzertragsstandorte hinsichtlich ihrer Bodenfruchtbarkeit und Ertragsfähigkeit ist nach dem Prinzip der Terra Preta do Indio denkbar.

Die Terra Preta do Indio bezeichnet anthropogen erzeugte schwarzerdeartige Böden im Amazonasgebiet, die durch die Zufuhr von diversen organischen Abfällen und Holzkohlen entstanden sind (Glaser und Birk, 2012). Im Vergleich zu den für die Tropen typischen nährstoffarmen Oxisolen führte sie zu einer Aufwertung der dortigen Böden in Hinblick auf die organische Bodensubstanz und den Nährstoffhaushalt (Glaser, 2007). Basierend auf dem Prinzip der Terra Preta werden Biokohlesubstrate mit einer neuentwickelten Technologie hergestellt. Die pyrolytisch aus Biomasse erzeugte abbaustabile Biokohle (Schimmelpfennig und Glaser, 2012) wird gemeinsam mit leicht umsetzbarer organischer Substanz, wie Grünschnitt, zu den Biokohlesubstraten kompostiert und gegebenenfalls fermentiert (Glaser und Kammann, 2013; Terytze et al., 2016b).

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wird die Verwendung von Biokohlesubstraten in Gefäß-, Bodensäulen- und Lysimeterversuchen in ertragsschwachen Böden der Niederlausitz (Nordostdeutschland) auf Boden-, Pflanzen- und Sickerwasserparameter untersucht.

In einem ersten Gefäßversuch (Mai 2011 - Mai 2012) erfolgte die pflanzenbauliche Prüfung von Biokohlesubstrate mit Biokohleanteilen von 15 Vol.-% und 30 Vol.-% (BKS15 und BKS30) mit unterschiedlich hohen Aufwandmengen von 30 t/ha bis 240 t/ha (n = 4) in Hinblick auf die Düngewirkung und den Einfluss auf die Bodeneigenschaften. Parallel wurden stufenweise erhöhte Mineraldüngersteigerungsreihen für die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor angelegt (n = 4).

In einem darauf aufbauenden Gefäßversuch (Mai 2012 - Oktober 2013) wurden die bodenverbessernden und pflanzenbaulichen Wirkungen von 15 verschiedenen Biokohlesubstraten aus regionalen Inputstoffen, wie beispielsweise Gewässerpflegematerial und Braunkohle, und variierten Produktionsparametern mit Aufwandmengen von 30 t/ha und 90 t/ha im Vergleich zur mineralischen Düngung (n = 4) getestet. Beide



Versuche wurden mit einem Kippboden und einem Ackerboden, auf welchen Knautgras (*Dactylis glomerata* L.) angebaut wird, durchgeführt.

In einem Bodensäulenversuch wurde das Biokohlesubstrat mit 15 Vol.-% Biokohle (BKS15) über drei Vegetationsperioden in den Jahren 2011 bis 2013 mit den Aufwandmengen 30 t/ha und 90 t/ha im Vergleich zur mineralischen Düngung hinsichtlich des Stofffreisetzungsverhaltens und zur Stoffverlagerung mit dem Sickerwasserstrom in dem Kippboden und dem Ackerboden untersucht. Für jede Düngevariante ( $n = 1$ ) wurden die Erträge und Entzüge der angebauten Kulturen Knautgras (*Dactylis glomerata* L.), Senf (*Sinapis alba* L.) und Sommergerste (*Hordeum distichum* L.) ermittelt sowie eine umfangreiche Bodenanalytik zum Versuchsende durchgeführt.

In einem Lysimeterversuch wurde ebenfalls das Biokohlesubstrat mit 15 Vol.-% Biokohle (BKS15) über drei Vegetationsperioden (2011 - 2013) geprüft. Im Vergleich zur mineralischen Düngung wurde sowohl die Aufwandmenge 90 t/ha als auch die gestaffelte dreimalige Gabe 30 t/ha BKS15 ( $n = 2$ ) untersucht. Neben der Sickerwassermenge und -qualität des Kippbodens und eines Braunerde-Podsol als natürlichem Ackerboden wurden die Erträge und Entzüge der angebauten Kulturen Mais (*Zea mays* L.) und Winterroggen (*Secale cereale* L.) erfasst.

Die Biokohlesubstrate beeinflussen die bodenphysikalischen und -chemischen Parameter der Böden in Abhängigkeit von deren Ausgangszustand. Die Düngung mit Biokohlesubstraten kann das Gesamtporenvolumen um bis zu 116 % (Kippboden) beziehungsweise um bis zu 124 % (Ackerboden) erhöhen. In dem langjährigen Ackerboden erreicht die Luftkapazität dadurch eine Verbesserung von bis zu 181 %. Die nutzbare Feldkapazität in dem Kippboden wird durch die Biokohlesubstrat-Düngung auf bis zu 172 % erhöht. Die Biokohlesubstrat-Düngung beeinflusst die generell höhere nutzbare Feldkapazität des Ackerbodens kaum. Das Totwasser wird in beiden Böden leicht angehoben.

Der pH-Wert wird nur bei einem sauren Ausgangs-pH-Wert durch die Biokohlesubstrate angehoben. Der schwach alkalische pH-Wert des Kippbodens wird durch die Biokohlesubstrat-Düngung nicht beeinträchtigt. In allen Versuchsböden geht die Biokohlesubstrat-Düngung mit einer Verbesserung des Humushaushaltes, der Erhöhung der  $KAK_{pot}$  und der Nährstoffvorräte einher. In der Regel ist durch die Biokohlesubstrat-Düngung die Verfügbarkeit der Nährstoffe P, K und Mg verbessert. Die organische Bodensubstanz wird durch die Aufwandmenge von bis zu 240 t/ha BKS15 um bis zu 448 % (Kippboden) beziehungsweise 300 % (Ackerboden) angehoben. Auch der geringe  $C_{org}$ -Gehalt von 0,2 % in dem Kippboden kann um bis zu 1340 % auf einen  $C_{org}$ -Gehalt von 2,5 % (240 t/ha BKS15) erhöht werden. Dies geht mit einer Verbesserung

der  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte einher. Auch der  $N_{\text{t}}$ -Gehalt des Kippbodens kann durch die Biokohlesubstrat-Düngung um bis zu 1000 % deutlich von 0,012 % auf 0,12 % gesteigert werden. Auch in dem Ackerboden kann der  $C_{\text{org}}$ -Gehalt durch die Biokohlesubstrat-Düngung auf bis zu 245 % angehoben werden. Der  $N_{\text{t}}$ -Gehalt nimmt ausgehend von 0,08 % mit der Erhöhung der Biokohlesubstrat-Düngung auf 240 t/ha um bis zu 0,05 % zu.

Im Gefäßversuch I wird ein geringes N-Mineraldüngeräquivalent der Biokohlesubstrate von < 10 % festgestellt, welches N-Ergänzungsdüngungen erforderlich macht. Eine Verbesserung der Ertragsfähigkeit durch die Biokohlesubstrate kann in diesem Versuch nicht festgestellt werden. In den weiteren Versuchen, die das geringe N-Mineraldüngeräquivalent der Biokohlesubstrate berücksichtigen, sind positive Ertrags-effekte durch die Biokohlesubstrat-Düngung um beispielsweise bis zu 137 % im Gefäßversuch II zu verzeichnen. Die P- und K-Versorgung der Pflanzen wird durch die Biokohlesubstrat-Düngung in der Regel erhöht.

Der Bodensäulenversuch belegt für den Kippboden und den Ackerboden eine Reduktion der  $N_{\text{min}}$ -Austräge mit dem Sickerwasser im Vergleich zur mineralischen Düngung um 40 % (Kippboden) beziehungsweise 69 % (Ackerboden) durch eine Gabe von 30 t/ha BKS15. In dem Lysimeterversuch können die  $N_{\text{min}}$ -Austräge in dem Sickerwasser des Kippbodens im Vergleich zur mineralischen Düngung mit gestaffelten Gaben von 3x30 t/ha BKS15 um 49 % und bei einer einmaligen Applikation von 90 t/ha BKS15 um 6 % reduziert werden. Ein sandiger Braunerde-Podsol hingegen reagiert mit einem verstärkten  $N_{\text{min}}$ -Austrag von 131 % (3x30 t/ha BKS15) bzw. 157 % (90 t/ha BKS15), der auf ein Nährstoff-Überangebot und eine erhöhte Wasserleitfähigkeit zurückzuführen sind. Die K- und P-Austräge sind in allen geprüften Böden gering bzw. sehr gering. Die Prüfung verschiedener verfügbarer Inputstoffe der Lausitz für die Biokohlesubstrat-Herstellung zeigt, dass unter anderem das Gewässerpflegematerial positive Effekte auf die Bodenparameter und den Ertrag erzielt.

Die Anwendung von Biokohlesubstraten verbessert die ökologischen Bodenfunktionen sowie die Flächenproduktivität auf ertragsschwachen sandigen Böden und stellt eine vielversprechende Option für Grenzertragsstandorte und für die landwirtschaftliche Rekultivierung von Kippböden dar.

## 8 Literaturverzeichnis

- Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M. und Wessolek, G. (2013): Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. In: *Geoderma* 202, 183-191.
- Ad-Hoc-AG Boden (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover.
- Agegnehu, G., Bass, A. M., Nelson, P. N. und Bird, M. I. (2016): Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. In: *Science of The Total Environment* 543, Part A, 295-306.
- Aggelides, S. M. und Londra, P. A. (2000): Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil. In: *Bioresource Technology* 71, 253-259.
- Amlinger, F. und Götz, B. (1999): *Stickstoff in Bioabfall- und Grünschnittkompost*, Umweltbundesamt, Wien.
- Amlinger, F., Nortcliff, S., Weinfurter, K. und Dreher, P. (2003): Applying Compost – Benefits and Needs. Proc. of a seminar 22 - 23 November 2001. BMLFUW, European Commission, Vienna and Brussels. Zugriff 04.07.2017,
- Antal, M. J. und Gronli, M. (2003): The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. In: *Industrial and Engineering Chemistry Research* 42, 1619–1640.
- Aranyos, J. T., Tomócsik, A., Makádi, M., Mészáros, J. und Blaskó, L. (2016): Changes in physical properties of sandy soil after long-term compost treatment. In *International Agrophysics*, 30, 269.
- Asche, E., Steffens, D. und Mengel, K. (1994): Düngewirkung und Bodenstruktureffekte durch den Einsatz von Bioabfallkompost auf landwirtschaftlichen Kulturflächen. In: *VDLUFA-Schriftreihe* 38, 321-324.
- Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D. und Hipps, N. A. (2010): Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. In: *Plant and Soil* 337, 1-18.
- Bagreev, A., Bandosz, T. J. und Locke, D. C. (2001): Pore structure and surface chemistry of adsorbents obtained by pyrolysis of sewage sludge-derived fertilizer. In: *Carbon* 39, 1971-1979.
- Baumgärtel, G., Ebertseder, R., Gutser, R., Hege, U., Hüther, J., Lorenz, F., Orlovius, K., Pollehn, J., Pradt, D. und Rex, M. (2003): Nährstoffverluste aus landwirtschaftlichen Betrieben mit einer Bewirtschaftung nach guter fachlicher Praxis, Bundesarbeitskreis Düngung. Frankfurt/Main.
- Beck, T. (1983): Die N-Mineralisierung von Böden im Laborbrutversuch. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 146, 243-252.
- Bergmann, W. (1983): *Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen - Entstehung und Diagnose*, VEB Gustav Fischer Verlag, Jena.
- Bernal, M. P., Alburquerque, J. A. und Moral, R. (2009): Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. In: *Bioresource Technology* 100, 5444-5453.
- Biederman, L. A. und Harpole, W. S. (2013): Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. In: *GCB Bioenergy*.

- Bilitewski, B. und Härdtle, G. (2013): Abfallwirtschaft: Handbuch für Praxis und Lehre, Springer-Verlag.
- Blume, H., Brummer, G., Horn, R., Kandeler, E., Kogel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K. und Wilke, B. (2010): Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde (Text book of soil science). Ferdinand Enke, Stuttgart, Germany.
- BMU (1994): Ökologischer Aufbau. Braunkohlesanierung Ost, Bonn.
- Böhmer, J., Eidner, F. und Flesch, F. (2013): Arbeitspapier zum Querschnittsprojekt 1, Der Einsatz von Terra Preta in ausgewählten Regionen – Analysen, Bewertungen und Empfehlungen für ein regionales Stoffstrommanagement (I. f. a. S. Hochschule Lausitz, ed.).
- Borchard, N., Ladd, B., Eschemann, S., Hegenberg, D., Mösel, B. M. und Amelung, W. (2014): Black carbon and soil properties at historical charcoal production sites in Germany. In: *Geoderma* 232–234, 236-242.
- Borchard, N., Prost, K., Kautz, T., Moeller, A. und Siemens, J. (2012): Sorption of copper (II) and sulphate to different biochars before and after composting with farmyard manure. In: *European Journal of Soil Science* 63, 399-409.
- Böttcher, J. (2009): Ecotechnical installation and method for the production of cultivation substrates, soil amendments, and organic fertilizers having properties of anthropogenic terra preta soil. Google Patents.
- Bradley, A., Larson, R. A. und Runge, T. (2015): Effect of Wood Biochar in Manure-Applied Sand Columns on Leachate Quality. In: *Journal of Environmental Quality* 44, 1720-1728.
- Bridle, T. R., Hammerton, I. und Hertle, C. K. (1990): Control of heavy metals and organochlorines using the oil from sludge process. In: *Water Science & Technology* 22, 249-258.
- Bridle, T. R. und Pritchard, D. (2004): Energy and nutrient recovery from sewage sludge via pyrolysis. In: *Water Science and Technology* 50, 169-175.
- Bringezu, S., Schütz, H., Schepelmann, P., Lange, U., von Geibler, J., Bienge, K., Kristof, K., Arnold, K., Merten, F. und Ramesohl, S. (2009): Nachhaltige Flächennutzung und nachwachsende Rohstoffe. In: *Optionen einer nachhaltigen Flächennutzung und Ressourcenschutzstrategien unter besonderer Berücksichtigung der nachhaltigen Versorgung mit nachwachsenden Rohstoffen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte* 34.
- Brodowski, S. B. (2005): Origin, function, and reactivity of black carbon in the arable soil environment. Dissertation, Universität Bayreuth.
- Brunner, P. (2013): Stoffstromanalyse - regionaler Ansatz. In: *Das Management von Stoffströmen: Geteilte Verantwortung-Nutzen für alle* (H. Friege, C. Engelhardt und K. O. Henseling, eds.). Springer-Verlag.
- Cantrell, K. B., Hunt, P. G., Uchimiya, M., Novak, J. M. und Ro, K. S. (2012): Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. In: *Bioresource Technology* 107, 419-428.
- Celik, I., Ortas, I. und Kilic, S. (2004): Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil. In: *Soil and Tillage Research* 78, 59-67.
- Chan, K. Y. und Xu, Z. (2009): Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement. In: *Biochar for Environmental Management - Science and Technology*, 67-84. Lehmann, J.

- Chen, Y.-X., Huang, X.-D., Han, Z.-Y., Huang, X., Hu, B., Shi, D.-Z. und Wu, W.-X. (2010): Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar on nitrogen conservation and heavy metals immobility during pig manure composting. In: *Chemosphere* 78, 1177-1181.
- Cheng, C. H., Lehmann, J. und Engelhard, M. (2008a): Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72, 1598-1610.
- Cheng, C. H., Lehmann, J., Thies, J. E. und Burton, S. (2008b): Stability of black carbon in soils across a climatic gradient. In: *Journal of Geophysical Research* 113.
- Cheng, C. H., Lehmann, J., Thies, J. E., Burton, S. D. und Engelhard, M. H. (2006): Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. In: *Organic Geochemistry* 37, 1477-1488.
- Christen, O. (2008): Langfristige Trends und Anpassung der Anbausysteme an den Klimawandel. In: *Pflanzenproduktion im Wandel - Wandel im Pflanzenschutz* (A. v. Tiedemann, Heitefuss R. und Feldmann F., eds.), 57-64. DPG Selbstverlag, Braunschweig, Germany.
- Clough, T. J., Condon, L. M., Kammann, C. und Müller, C. (2013): A Review of Biochar and Soil Nitrogen Dynamics. In: *Agronomy* 3, 275-293.
- Cornelissen, G., Martinsen, V., Shitumbanuma, V., Alling, V., Breedveld, G. D., Rutherford, D. W., Sparrevik, M., Hale, S. E., Obia, A. und Mulder, J. (2013): Biochar effect on maize yield and soil characteristics in five conservation farming sites in Zambia. In: *Agronomy* 3, 256-274.
- Daum, A. und Böttcher, J. (2011): 1. Quartalsbericht LaTerra. Areal GmbH, Hengstbacherhof.
- DeLuca, T. H., MacKenzie, M. D., Gundale, M. J. und Holben, W. E. (2006): Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in ponderosa pine forests. In: *Soil Science Society of America Journal* 70, 448-453.
- Dempster, D. N., Jones, D. L. und Murphy, D. V. (2012): Clay and biochar amendments decreased inorganic but not dissolved organic nitrogen leaching in soil. In: *Soil Research* 50, 216-221.
- Devereux, R. C., Sturrock, C. J. und Mooney, S. J. (2012): The effects of biochar on soil physical properties and winter wheat growth. In: *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 103, 13-18.
- Dias, B. O., Silva, C. A., Higashikawa, F. S., Roig, A. und Sánchez-Monedero, M. A. (2010): Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification. In: *Bioresource Technology* 101, 1239-1246.
- Ding, Y., Liu, Y. X., Wu, W. X., Shi, D. Z., Yang, M. und Zhong, Z. K. (2010): Evaluation of Biochar Effects on Nitrogen Retention and Leaching in Multi-Layered Soil Columns. In: *Water, Air, & Soil Pollution* 213, 47-55.
- Döhler, H. (1996): Landbauliche Verwertung stickstoffreicher Abfallstoffe, Komposte und Wirtschaftsdünger. In: *Wasser und Boden* 48, 7-16.
- Döhler, H., Schultheiss, U., Eckel, H. und Roth, U. (2002): Schwermetallgehalte von Wirtschaftsdüngern in Deutschland und der EU. In: *Wasser und Boden* 54, 4-9.
- Downie, A. (2011): Biochar Production and Use: Environmental Risks and Rewards. Dissertation, The University of New South Wales.

- Downie, A., Crosky, A. und Munroe, P. (2009): Physical Properties of Biochar. (S. Joseph und J. Lehmann, eds.), 13-29. Earthscan, London ;Sterling, VA.
- Downie, A., Munroe, P., Cowie, A., Van Zwieten, L. und Lau, D. M. S. (2012): Biochar as a Geoengineering Climate Solution: Hazard Identification and Risk Management. In: *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 42, 225-250.
- DWD (2016): [https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/nieder\\_8110\\_fest\\_html.html;jsessionid=9BA999719B75C1C8111DEA4A7AB29485.live21062?view=nasPublication&nn=16102](https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/nieder_8110_fest_html.html;jsessionid=9BA999719B75C1C8111DEA4A7AB29485.live21062?view=nasPublication&nn=16102). 2016. DWD.
- Ebertseder, T. und Gutser, R. (2003): Effect of long-term compost application on physical properties of loamy soils
- Eitzinger, J., Kersebaum, K. C. und Formayer, H. (2009): Landwirtschaft im Klimawandel: Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa, Agrimedia.
- Ellmer, F. (2010): Nachhaltige Sicherung der Bodenfruchtbarkeit unter Beachtung des Klimawandels. In Düngeungstagung in Sachsen am 26.02.2010.
- Enquete-Kommision (1994): Schutz des Menschen und der Umwelt - Bewertungskriterien und Perspektiven für umweltverträgliche Stoffkreisläufe in der Industriegesellschaft; Die Industriegesellschaft gestalten - Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen. 12.
- Erben, G. A. (2011): Carbon dynamics and stability of biochar compost. An evaluation of three successive composting experiments, Universität Bayreuth, Bayreuth, zitiert nach Fischer and Glaser, 2012.
- Fabrizi, D., Rombolà, A. G., Torri, C. und Spokas, K. A. (2012): Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar and biochar amended soil. In: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 103, 60-67.
- Fischer, D. und Glaser, B. (2012): Synergisms between Compost and Biochar for Sustainable Soil Amelioration. (S. Kumar und A. Bharti, eds.), 167-198. InTech, Rijeka, Croatia.
- Fischer, D. (unveröffentlicht).
- Flesch, F., Böhmer, J. und Hildebrandt, J. (2013): Arbeitspapier zum Arbeitspaket 1.3 „Ökologische Bewertung der Stoffstromszenarien“. (I.-I. f. a. Stoffstrommanagement, ed.).
- Freddo, A., Cai, C. und Reid, B. J. (2012): Environmental contextualisation of potential toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar. In: *Environmental Pollution* 171, 18-24.
- Friege, H., Engelhardt, C. und Henseling, K. O. (2013): Das Management von Stoffströmen: Geteilte Verantwortung-Nutzen für alle, Springer-Verlag.
- Gärtner, E. J. (1987): Beobachtungseinrichtung des hessischen Untersuchungsprogrammes „Waldbelastung durch Immission - Wdl“. Forschungsberichte der Hess. Forstl. Versuchsanstalt.
- Gaskin, J. W., Speir, A., Morris, L., Ogden, L., Harris, K., Lee, D. und Das, K. (2007): Potential for pyrolysis char to affect soil moisture and nutrient status of a loamy sand soil. Georgia Water Resources Conference. University of Georgia.
- Gaskin, J. W., Steiner, C., Harris, K., Das, K. C. und Bibens, B. (2008): Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use.

- Gast, M. und Haubold-Rosar, M. (2003): Einfluss organischer Massenabfälle auf den N-Haushalt landwirtschaftlich rekultivierter Kippsubstrate. 10. Gumpensteiner Lysimetertagung, 29. und 30. April 2003. A-8952 Irdning.
- Gerstengarbe, F.-W., Badeck, F., Hattermann, F., Krysanova, V., Lahmer, W., Lasch, P., Stock, M., Suckow, F., Wechsung, F. und Werner, P. (2003): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven, PIK Potsdam.
- Glaser, B. (2007): Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 362, 187-196.
- Glaser, B. (2010): Biokohle – Produktion, Entwicklung und Charakterisierung zur Anwendung als Bodenverbesserer. Abschlussbericht. Universität Bayreuth.
- Glaser, B., Balashov, E., Haumaier, L., Guggenberger, G. und Zech, W. (2000): Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. In: *Organic Geochemistry* 31, 669-678.
- Glaser, B. und Birk, J. (2012): State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 82, 39–51.
- Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G. und Zech, W. (2001): The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. In: *Naturwissenschaften* 88, 37-41.
- Glaser, B. und Kammann, C. (2013): Wechselwirkungen von Kompost und Pflanzenkohle: Möglichkeiten und Grenzen von Terra Preta-ähnlichen Produkten. In: *Abfallwirtschaft meets Biochar - Perspektiven für den Klimaschutz?* (K. Fricke, C. Kammann, R. Wallmann, D. Fischer, J. M. Rödger und F. Schwarz, eds.), 135-148. Orbit e. V., Weimar.
- Glaser, B., Lehmann, J. und Zech, W. (2002): Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. In: *Biology and Fertility of Soils* 35, 219-230.
- Glaser, B., Parr, M., Braun, C. und Kopoló, G. (2009): Biochar is carbon negative. In: *Nature Geoscience* 2, 2.
- Glaser, B., Wiedner, K., Seelig, S., Schmidt, H.-P. und Gerber, H. (2015): Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers. In: *Agronomy for Sustainable Development* 35, 667-678.
- Grünewald, U. (2001): Water resources management in river catchments influenced by lignite mining. In: *Ecological Engineering* 17, 143-152.
- Gunschera, G. (1978): Landwirtschaftliche Rekultivierungsmaßnahmen auf quartären bindigen Kippsubstraten in der Niederlausitz. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle.
- Gunschera, G. (1996): Landwirtschaftliche Rekultivierung von Kippenflächen des Braunkohlebergbaus - Empfehlungen und Richtwerte, Finsterwalde, unveröffentlicht.
- Gunschera, G. (1998): Landwirtschaftliche Rekultivierung. In: *Braunkohlentagebau und Rekultivierung* (W. Pflug, ed.), 589-599. Springer.
- Gutser, R. und Ebertseder, T. (2002): Grundlagen zur Nährstoff- und Sonderwirkung sowie zu optimalen Einsatzstrategien von Komposten im Freiland. In: *Handbuch "Kompost im Gartenbau"*, 47-72. Zentralverband Gartenbau e.V. (ZVG).

- Haber, N., Kluge, R., Deller, B., Flaig, H., Schulz, E. und Reinhold, J. (2008): Nachhaltige Kompostanwendung in der Landwirtschaft-Abschlussbericht 2008. In: *Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Karlsruhe*.
- Haider, G., Steffens, D., Moser, G., Müller, C. und Kammann, C. I. (2017): Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 237, 80-94.
- Hale, S. E., Lehmann, J., Rutherford, D., Zimmerman, A. R., Bachmann, R. T., Shitumbanuma, V., O'Toole, A., Sundqvist, K. L., Arp, H. P. und Cornelissen, G. (2012): Quantifying the total and bioavailable polycyclic aromatic hydrocarbons and dioxins in biochars. In: *Environmental Science & Technology* 46, 2830-2838.
- Hamblin, A. und Davies, D. (1977): Influence of organic matter on the physical properties of some East Anglian soils of high silt content. In: *Journal of Soil Science* 28, 11-22.
- Hamer, U., Marschner, B., Brodowski, S. und Amelung, W. (2004): Interactive priming of black carbon and glucose mineralisation. In: *Organic Geochemistry* 35, 823-830.
- Hammes, K. und Schmidt, M. W. I. (2009): Changes of biochar in soil. In: *Biochar for Environmental Management - Science and Technology.*, 169-181. Lehmann, J., Joseph, S., London ;Sterling, VA: Earthscan.
- Hammond, J. und Rödger, J.-M. (2010): Herstellung von Pflanzenkohle mittels Pyreg-Technologie. In: *Journal für Terroirwein und Biodiversität*.
- Hanff, H. und Lau, H. (2016): Datensammlung für die Betriebsplanung und die betriebswirtschaftliche Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg: Ackerbau, Grünlandwirtschaft, Tierproduktion. LELF, Frankfurt/Oder.
- Hanff, H., Neubert, G., Brudel, H. und Grosskopf, K. (2008): Datensammlung für die Betriebsplanung und die betriebswirtschaftliche Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg: Ackerbau, Grünlandwirtschaft, Tierproduktion. MLUV, LVLf, Frankfurt/Oder.
- Hartge, K. H. und Horn, R. (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden:[Praxis, Messmethoden, Auswertung], Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Hass, A., Gonzalez, J. M., Lima, I. M., Godwin, H. W., Halvorson, J. J. und Boyer, D. G. (2012): Chicken Manure Biochar as Liming and Nutrient Source for Acid Appalachian Soil. In: *Journal of Environmental Quality* 41, 1096-1106.
- Haubold-Rosar, M. (2005): Die Rekultivierung von Böden für eine land- und forstwirtschaftliche Nutzung. In *Change - Landschaft und Energie*, 51-58.
- Haubold-Rosar, M. und Gunschera, G. (2009): Düngeempfehlung für die landwirtschaftliche Rekultivierung von Kippenflächen, Finsterwalde.
- Haubold-Rosar, M., Kern, J., Reinhold, J., Dicke, C., Funke, A., Germer, S., Heinkele, T., Karagöz, Y., Lanza, G., Libra, J., Medick, J., Meyer-Aurich, A., Mumme, J., Neubauer, Y., Teichmann, I., Theobald, A. und Rademacher, A. (2016): Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden. UBA, Dessau-Roßlau.



- Haubold-Rosar, M., Rademacher, A., Krollig, S. und Stöhr, C. (2013): Einsatz regionaler Inputstoffe zur Herstellung von Biokohle-Substraten und deren Einfluss auf die Stickstofffreisetzung. Berichte der DBG; Jahrestagung der DBG, Böden - Lebensgrundlage und Verantwortung; 07.-12.09.2013 in Rostock. <http://eprints.dbges.de/id/eprint/970>.
- Heck, P., Böttcher, J., Flesch, F., Angilella, M., Fischer, D., Bruch, I., Adlung, A., Wolff, T., Dotterweich, M. und Peña, D. (2008): Projektstudie zur Erstellung eines innovativen Stoffstrommanagementkonzepts zur Schließung des Bioabfallkreislaufs am Beispiel der Morbacher Energielandschaft (MEL).
- Heck, P., Flesch, F., Böhmer, J. und Wagener, F. (2014): Praxisbasiertes Biomasse-Stoffstrommanagement im Verbundprojekt LaTerra — Ökologische Bewertung der Stoffstromszenarien. 75. Symposium 2014. Berlin. 32-42.
- Heinkele, T. und Haubold-Rosar, M. (2010): Datenerhebung zum Ausbau des Lysimeters A2 37. schriftl. Mitteilung.
- Hilber, I., Blum, F., Leifeld, J., Schmidt, H. P. und Bucheli, T. D. (2012): Quantitative Determination of PAHs in Biochar: A Prerequisite To Ensure Its Quality and Safe Application. In: *Journal of agricultural and food chemistry* 60, 3042–3050.
- Hilscher, A. und Knicker, H. (2011): Degradation of grass-derived pyrogenic organic material, transport of the residues within a soil column and distribution in soil organic matter fractions during a 28month microcosm experiment. In: *Organic Geochemistry* 42, 42-54.
- Hockaday, W. C., Grannas, A. M., Kim, S. und Hatcher, P. G. (2006): Direct molecular evidence for the degradation and mobility of black carbon in soils from ultrahigh-resolution mass spectral analysis of dissolved organic matter from a fire-impacted forest soil. In: *Organic Geochemistry* 37, 501-510.
- Hockaday, W. C., Grannas, A. M., Kim, S. und Hatcher, P. G. (2007): The transformation and mobility of charcoal in a fire-impacted watershed. In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71, 3432-3445.
- Hofbauer, H., Kaltschmitt, M. und Nussbaumer, T. (2009): Thermo-chemische Umwandlungsprozesse. In: *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren* (M. Kaltschmitt und H. Hartmann, eds.), 375-407. Springer, Heidelberg.
- Hossain, M. K., Strezov, V., Chan, K. Y., Ziolkowski, A. und Nelson, P. F. (2011): Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. In: *Journal of Environmental Management* 92, 223-228.
- Hua, L., Chen, Y., Wu, W. und Ma, H. (2011): Microorganism communities and chemical characteristics in sludge-bamboo charcoal composting system. In: *Environmental Technology* 32, 663-672.
- Hua, L., Wu, W., Liu, Y., McBride, M. B. und Chen, Y. (2009): Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment. In: *Environmental Science and Pollution Research* 16, 1-9.
- Hüttl, R. F. (2001): Rekultivierung im Braunkohletagebau—Fallbeispiel Niederlausitzer Bergbaufolgelandschaften. In: *Akademie journal* 1, 7-12.
- Hüttl, R. F., Haubold-Rosar, M., Schaaf, W., Heinkele, T. und Gast, M. (2004): Leitfaden zum Einsatz von Kompost und Klärschlamm bei der Rekultivierung.
- Hüttl, R. F., Klem, D. und Weber, E. (1999): Rekultivierung von Bergbaufolgelandschaften: das Beispiel des Lausitzer Braunkohlerevierts, Walter de Gruyter.

- IfaS (2008): Neue Wege in eine nachhaltige Industriegesellschaft – Null-Emissions-Netzwerk. IfaS.
- Illner, K. und Sauer, H. (1974): Zur Mindestmächtigkeit der Schüttung kulturfähiger Schichten und der Grundmelioration auf landwirtschaftlich zu nutzenden Kippflächen im Lausitzer Braunkohlenrevier. In: *Neue Bergbautechnik* 4, 34-36.
- Ippolito, J. A., Laird, D. A. und Busscher, W. J. (2012a): Environmental Benefits of Biochar. In: *Journal of Environmental Quality* 41, 967-972.
- Ippolito, J. A., Novak, J. M., Busscher, W. J., Ahmedna, M., Rehrh, D. und Watts, D. W. (2012b): Switchgrass Biochar Affects Two Aridisols. In: *Journal of Environmental Quality* 41, 1123-1130.
- Iqbal, H., Garcia-Perez, M. und Flury, M. (2015): Effect of biochar on leaching of organic carbon, nitrogen, and phosphorus from compost in bioretention systems. In: *Science of The Total Environment* 521–522, 37-45.
- Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M. und Bastos, A. C. (2011): A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 144, 175–187.
- Jindo, K., Sánchez-Monedero, M. A., Hernández, T., García, C., Furukawa, T., Matsumoto, K., Sonoki, T. und Bastida, F. (2012a): Biochar influences the microbial community structure during manure composting with agricultural wastes. In: *Science of The Total Environment* 416, 476-481.
- Jindo, K., Suto, K., Matsumoto, K., García, C., Sonoki, T. und Sanchez-Monedero, M. A. (2012b): Chemical and biochemical characterisation of biochar-blended composts prepared from poultry manure. In: *Bioresource Technology* 110, 396-404.
- Jones, D. L., Rousk, J., Edwards-Jones, G., DeLuca, T. H. und Murphy, D. V. (2012): Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. In: *Soil Biology and Biochemistry* 45, 113–124.
- Kahle, P. und Belau, L. (1998): Modellversuche zur Prüfung der Verwertungsmöglichkeiten von Bioabfallkompost in der Landwirtschaft. In: *Agribiological research* 51, 193-200.
- Kaiser, M. (2004): Einfluss von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Menge und Zusammensetzung unterschiedlich stabiler Fraktionen der organischen Bodensubstanz. Dissertation, Universität Potsdam, Potsdam.
- Kameyama, K., Miyamoto, T., Shiono, T. und Shinogi, Y. (2012): Influence of Sugarcane Bagasse-derived Biochar Application on Nitrate Leaching in Calcaric Dark Red Soil. In: *Journal of Environmental Quality* 41, 1131-1137.
- Kammann, C. (2014): Optimierung des N-Kreislaufs durch Biochar in der Landwirtschaft: Neueste Forschungsergebnisse. 75. Symposium des ANS e.V. Berlin. 68-89.
- Kammann, C., Glaser, B. und Schmidt, H.-P. (2016): Combining biochar and organic amendments. In: *Biochar in European Soils and Agriculture: Science and Practice*, 136.
- Kammann, C., Grünhage, L., Busch, D., Müller, C., Dröger, G., Hanewald, K. und Schmid, T. (2010a): Biokohle: Ein Weg zur dauerhaften Kohlenstoff-Sequestrierung?
- Kammann, C., Kühnel, Y., von Bredow, C. und Gößling, J. (2010b): C-Sequestrierungspotential und Eignung von Torfersatzstoffen, hergestellt aus Produkten der Landschaftspflege und Biochar.

- Kammann, C. I., Schmidt, H.-P., Messerschmidt, N., Linsel, S., Steffens, D., Müller, C., Koyro, H.-W., Conte, P. und Joseph, S. (2015): Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. In: *Scientific reports* 5, 11080.
- Kämpfer, P. und Weißenfels, W. D. (2001): Biologische Behandlung organischer Abfälle, Springer-Verlag.
- Karami, N., Clemente, R., Moreno-Jiménez, E., Lepp, N. W. und Beesley, L. (2011): Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass. In: *Journal of Hazardous Materials* 191, 41-48.
- Karer, J., Wimmer, B., Zehetner, F., Kloss, S. und Soja, G. (2013): Biochar application to temperate soils: effects on nutrient uptake and crop yield under field conditions. In: *Agricultural and Food Science* 22, 390-403.
- Karhu, K., Mattila, T., Bergström, I. und Regina, K. (2011): Biochar addition to agricultural soil increased CH<sub>4</sub> uptake and water holding capacity – Results from a short-term pilot field study. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 140, 309-313.
- Katur, J. (1987): Zur Entwicklung der Humusverhältnisse auf den meliorierten schwefelhaltigen Kippböden. In: *Archiv für Acker-und Pflanzenbau und Bodenkunde* 31, 239-247.
- Katur, J. (1998): Melioration schwefelhaltiger Kippböden. In: *Pflug, W (Hrsg.): Braunkohlentagebau und Rekultivierung. Landschaftsökologie - Folgenutzung- Naturschutz*, 559 - 572, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Katur, J. und Böcker, L. (2007): Landwirtschaftliche Testversuche zur Verwendung von N-modifizierter Weichbraunkohle als Humusdüngestoff bei der Rekultivierung von Kippenböden des Braunkohlebergbaus. In: *Archives of Agronomy and Soil Science* 53, 355-389.
- Katur, J., Fischer, K., Böcker, L., Liebner, F. und Schiene, R. (2003): Düngewirkung der N-modifizierten Braunkohle und ihre Auswirkungen auf Pflanze, Boden und N-Auswaschungsverluste. In: *Archives of Agronomy and Soil Science* 49, 61-75.
- Katur, J., Haubold-Rosar, M. und Liebner, C. (2000): Wissenschaftlicher Vorlauf für die Rekultivierung im Lausitzer Braunkohlenrevier, Teilvorhaben 2: Bodenverbessernde Substrate aus Massenabfällen für die landwirtschaftliche Rekultivierung. Abschlussbericht BMBF-Projekt, FKZ: 1470933.
- Keiluweit, M., Kleber, M., Sparrow, M. A., Simoneit, B. R. und Prah, F. G. (2012): Solvent-extractable polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar: influence of pyrolysis temperature and feedstock. In: *Environmental Science & Technology* 46, 9333-9341.
- Kohlenwirtschaft, S. d. (2014): Der Kohlenbergbau in der Energiewirtschaft der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 2013. Herne und Köln.
- Koppolu, L., Prasad, R. und Davis Clements, L. (2004): Pyrolysis as a technique for separating heavy metals from hyperaccumulators. Part III: pilot-scale pyrolysis of synthetic hyperaccumulator biomass. In: *Biomass and Bioenergy* 26, 463-472.
- Körschens, M. (2010): Der organische Kohlenstoff im Boden (Corg)–Bedeutung, Bestimmung, Bewertung Soil organic carbon (Corg)–importance, determination, evaluation. In: *Archives of Agronomy and Soil Science* 56, 375-392.

- Körschens, M., Rogasik, J., Schulz, E., Böning, H., Eich, D., Ellerbrock, R., Franko, U., Hülsbergen, K. J., Köppen, D., Kolbe, H., Leitholg, G., Merbach, I., Peschke, H., Prystav, W., Reinhold, J. und Zimmer, J. (2004): Standpunkt Humusbilanzierung, Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland, VDLUFA - Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Bonn.
- Körschens, M. und Schulz, E. (1999): Die organische Bodensubstanz: Dynamik-Reproduktion-ökonomisch und ökologisch begründete Richtwerte. 13. UFZ-Bericht, Leipzig-Halle.
- Körschens, M., Schulz, E. und Behm, R. (1990): Hot water extractable carbon and nitrogen of soils as criteria of their ability for N-release. In: *Zentralblatt für Mikrobiologie* 145, 305-311.
- Kranert, M. und Cord-Landwehr, K. (2010): Einführung in die Abfallwirtschaft 4. Auflage, Vieweg+ Teubner Verlag. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Krieger, A. (2015): terra preta - Stand der Forschung und Anwendungsbeispiele im Öko-Landbau. In 16. Tellow Vortragsveranstaltung zum ökologischen Landbau. Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern Tellow.
- Krieger, A. E., Böttcher, J. und Dotterweich, M. (2011): Großtechnische Erzeugung und Nutzung von Terra Preta. (K. Fricke, C. G. Bergs, N. Dichtl und R. Wallmann, eds.), 135-139. Orbit e. V., Weimar.
- Krollig, S. (2013): Untersuchung der Stickstofffreisetzung aus ausgewählten Biokohle-Substraten. Diplomarbeit, Ernst-Moritz-Arndt- Universität Greifswald.
- Krug, J. (2013): Perspektiven ackerbaulicher Grenzstandorte in Nordostdeutschland: Übertragbarkeit extensiver Produktionssysteme überseeischer Trockenstandorte, Thünen Report.
- Kuntze, H., Roeschmann, G. und Schwerdtfeger, G. (1994): Bodenkunde, Ulmer Stuttgart.
- Kurz, H. (1998): Landwirtschaftliche Nutzungsmöglichkeiten von Grenzstandorten in den neuen Bundesländern, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAL).
- Kuzyakov, Y., Subbotina, I., Chen, H., Bogomolova, I. und Xu, X. (2009): Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by <sup>14</sup>C labeling. In: *Soil Biology & Biochemistry* 41, 210-219.
- LABO (2017): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. In: *Saarbrücken: Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft, Bodenschutz*.
- LAGA (1995): Länderarbeitsgemeinschaft Abfall - Merkblatt M10. Qualitätskriterien und Anwendungsempfehlungen für Kompost. In: *Müllhandbuch* 4, 1-52.
- Laird, D. A. (2008): The Charcoal Vision: A Win–Win–Win Scenario for Simultaneously Producing Bioenergy, Permanently Sequestering Carbon, while Improving Soil and Water Quality. In: *Agronomy Journal* 100, 178-181.
- Landgraf, D., Leinweber, P. und Makeschin, F. (2006): Cold and hot water–extractable organic matter as indicators of litter decomposition in forest soils. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 76-82.
- Lang, T., Jensen, A. D. und Jensen, P. A. (2005): Retention of Organic Elements during Solid Fuel Pyrolysis with Emphasis on the Peculiar Behavior of Nitrogen. In: *Energy Fuels* 19, 1631-1643.

- Laves, D., Franko, U. und Thum, J. (1993): Umsatzverhalten fossiler organischer Substanzen. In: *Arch. Acker-Pflanzenb. Bodenk* 37, 211-219.
- Lehmann, J. (2007): A handful of carbon. In: *Nature* 447, 143-144.
- Lehmann, J., da Silva, J. P., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W. und Glaser, B. (2003a): Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. In: *Plant and Soil* 249, 343-357.
- Lehmann, J., Gaunt, J. und Rondon, M. (2006): Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review. In: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11, 403-427.
- Lehmann, J. und Joseph, S. (2009): Biochar for Environmental Management: Science and Technology, Earthscan.
- Lehmann, J., Kern, D., German, L., Mccann, J., Martins, G. C. und Moreira, A. (2003b): Soil fertility and production potential. In: *Amazonian dark earths*, 105-124. Springer.
- Lehmann, J., Kern, D. C., Glaser, B. und Woods, W. I. (2003c): Amazonian dark earths, Kluwer Academic, Dordrecht; Boston.
- Lehmann, J. und Rondon, M. (2006): Bio-Char Soil Management on Highly Weathered Soils in the Humid Tropics. (N. Uphoff und et al., eds.), 517-530.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J. O., Thies, J., Luizao, F. J., Petersen, J. und Neves, E. G. (2006): Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. In: *Soil Science Society of America Journal* 70, 1719-1730.
- Libra, J. A., Ro, K. S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N. D., Neubauer, Y., Titirici, M. M., Fühner, C., Bens, O., Kern, J. und Emmerich, K. H. (2011): Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. In: *Biofuels* 2, 71-106.
- Liedtke, H. und Marschner, B. (2003): Bodengüte der landwirtschaftlichen Nutzflächen. In: *Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland – Relief, Boden und Wasser*, 2, 104-105. Leibniz-Institut für Länderkunde.
- Lima, H. N., Schaefer, C. E., Mello, J. W., Gilkes, R. J. und Ker, J. C. (2002): Pedogenesis and pre-Colombian land use of "Terra Preta Anthrosols" ("Indian black earth") of Western Amazonia. In: *Geoderma* 110, 1-17.
- Liu, J., Schulz, H., Brandl, S., Miehtke, H., Huwe, B. und Glaser, B. (2012): Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 175, 698–707.
- Löhde, K. (2014): Klärschlamm zu Dünger, Biomasse zu Pflanzenkohle. In: *Umwelt-Magazin* April - Mai, 92-93.
- Lorenz, K. und Lal, R. (2014): Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177, 651-670.
- Lotze-Campen, H., Claussen, L., Dosch, A., Noleppa, S., Rock, J., Schuler, J. und Uckert, G. (2009): Klimawandel und Kulturlandschaft Berlin, Potsdam-Inst. für Klimafolgenforschung.
- LTZ (2014): CarboSolum - Effiziente und ökologische Nutzung von Biokohle aus verschiedengradig carbonisierter Restbiomasse zur Bodenverbesserung in der Landwirtschaft: Schlussbericht zu einem Rentenbankvorhaben, gefördert aus

- dem Zweckvermögen; Berichtszeitraum: 11/2010 - 10/2014. LTZ Augustenberg, Förderkennzeichen Z20083.
- LUA (2001): Untersuchungen zur Kompostqualität im Land Brandenburg. Fachbeiträge des Landesumweltamtes, 65.
- Lutz, H., Romeiro, G. A., Damasceno, R. N., Kutubuddin, M. und Bayer, E. (2000): Low temperature conversion of some Brazilian municipal and industrial sludges. In: *Bioresource Technology* 74, 103-107.
- Martins, O. und Kowald, R. (1988): Auswirkung des langjährigen Einsatzes von Müllkompost auf einen mittelschweren Ackerboden. In: *Z Kulturtech Flurbereinigung* 29, 234-244.
- McHenry, M. P. (2009): Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: Certainty, uncertainty and risk. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 129, 1-7.
- Mehlich, A. (1948): Determination of cation- and anion-exchanges properties of soils. In: *Soil Science* 66, 429-446.
- Mokry, M., Aichele, T. und Beyer (2013): Einsatz von "Biokohle" in der Landwirtschaft. In: *Landinfo* 4, 49-56.
- Möller, A. und Höper, H. (2014): Bewertung des Einsatzes von Biokohle in der Landwirtschaft aus Sicht des Bodenschutzes. LBEG - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.
- Mönicke, R. (2005): Klärschlamm–ein dringend benötigter preisgünstiger Ergänzungsdünger. In: *KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall* 52, 1108-1113.
- Morishita, T. und Boratynski, J. K. (1992): Accumulation of cadmium and other metals in organs of plants growing around metal smelters in Japan. In: *Soil Science and Plant Nutrition* 38, 781-758.
- Nadeem, S. M., Imran, M., Naveed, M., Khan, M. Y., Ahmad, M., Zahir, Z. A. und Crowley, D. E. (2017): Synergistic use of biochar, compost and plant growth-promoting rhizobacteria for enhancing cucumber growth under water deficit conditions. In: *Journal of the Science of Food and Agriculture* 97, 5139–5145.
- Neander, E. (1973): Organisationsformen für Nutzung von Grenzstandorten. Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues. Braunschweig-Volkenrode. 10,
- Neubauer, Y. (2016): Pyrolyse zur Herstellung von Pflanzenkohle - aktueller Stand der technischen Lösungen. In EIP Workshop Herstellung und Einsatz von Pflanzenkohle 03.05.2016 in Berlin. TU Berlin.
- Neuling, U., Kaltschmitt, M. und Hofbauer, H. (2016): Einordnung der thermochemischen Verfahren. In: *Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 684-697. Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H., Springer. Heidelberg.
- Neumann, T. (1997): Gezielter Umgang mit kulturfähigen Substraten als Basis der Pedogenese in der Bergbaufolgelandschaft In: *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesell.* 84, 33 - 36.
- Neumann, T. (2008): Umgang mit Kipprohböden im Prozess der Rekultivierung bei der Vattenfall Europe Mining AG. Forstwirtschaftliche Wiedernutzbarmachung - Workshop - 07.10.2008 Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR).
- Neves, E. G., Petersen, J. B., Bartone, R. N. und Silva, C. A. D. (2003): Historical and socio-cultural origins of Amazonian Dark Earths. In: *Amazonian Dark Earths* (J.

- Lehmann, D. C. Kern, B. Glaser und W. I. Woods, eds.), 29-50. Kluwer Academic, Dordrecht [u.a].
- Nguyen, B. T., Lehmann, J., Hockaday, W. C., Joseph, S. und Masiello, C. A. (2010): Temperature sensitivity of black carbon decomposition and oxidation. In: *Environmental Science and Technology* 44, 3324-3331.
- Niggemann, J. (1972): Das Problem der landwirtschaftlichen Grenzertragsböden. In: *Ber. Ldw.* 49, 473-549.
- Novak, J. M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J. W., Steiner, C., Das, K. C., Ahmedna, M., Rehrh, D., Watts, D. W., Busscher, W. J. und Schomberg, H. H. (2009): Characterization of Designer Biochar Produced at Different Temperatures and Their Effects on a Loamy Sand. In: *Annals of Environmental Science* 3, 195-206.
- Pflug, W. (1998): Braunkohlentagebau und Rekultivierung: Landschaftsökologie-Folgenutzung-Naturschutz; mit 205 Tabellen, Springer.
- Prost, K., Borchard, N., Siemens, J., Kautz, T., Séquaris, J. M., Möller, A. und Ame- lung, W. (2013): Biochar affected by composting with farmyard manure. In: *Journal of Environmental Quality* 42, 164-172.
- Quicker, P. (2012): Thermochemische Verfahren zur Erzeugung von Biokohle. (K. Fricke, C. G. Bergs und C. Kammann, eds.), 21-33. Orbit e. V., Weimar.
- Quicker, P. und Schulten, M. (2012): Biokohle: Erzeugung und technische Einsatzmög- lichkeiten. In: *Müll und Abfall*, 464-475.
- Quilliam, R. S., Marsden, K. A., Gertler, C., Rousk, J., DeLuca, T. H. und Jones, D. L. (2012): Nutrient dynamics, microbial growth and weed emergence in biochar amended soil are influenced by time since application and reapplication rate. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 158, 192-199.
- Quilliam, R. S., Rangecroft, S., Emmett, B. A., Deluca, T. H. und Jones, D. L. (2013): Is biochar a source or sink for polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) compounds in agricultural soils? In: *Global change biology/Bioenergy* 5, 96-103.
- Rademacher, A. und Haubold-Rosar, M. (2012): Gefäßversuch zur Düngewirkung von Terra Preta Substraten mit unterschiedlichen Kohlegehalten auf ertragsschwachen sandigen Acker- und Kippböden der Lausitz. 55. Jahrestagung der Ge- sellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. 24.-27.09.2012 in Berlin. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 24, 226-227.
- Rademacher, A. und Haubold-Rosar, M. (2013): Gefäßversuch zur Wirkung von Bio- kohle-Substraten mit unterschiedlichen Kohlegehalten auf Eigenschaften er- tragsschwacher Acker- und Kippböden der Lausitz. Berichte der DBG; Jahres- tagung der DBG, Böden - Lebensgrundlage und Verantwortung; 07. - 12.09.2013 in Rostock, <http://eprints.dbges.de/id/eprint/929>.
- Rademacher, A. und Haubold-Rosar, M. (2014): Gefäßversuche zur Wirkung von Bio- kohle-Substraten mit unterschiedlichen Kohlegehalten und Inputstoffen auf den Pflanzenaufwuchs und ausgewählte Bodenparameter von ertragsschwachen Acker- und Kippböden der Lausitz. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbau- wissenschaften e. V. 16.-18.09.2014 in Wien. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 26, 66 - 67.
- Rademacher, A. und Haubold-Rosar, M. (2015a): Auswirkungen von Biokohlesubstrat- Gaben zu ertragsschwachen Ackerböden auf das Sickerwasser und die Nähr- stofffrachten in einem mehrjährigen Lysimeterversuch. 16. Gumpensteiner Ly- simetertagung, 21. und 22. April 2015. A-8952 Irdning.

- Rademacher, A. und Haubold-Rosar, M. (2015b): Auswirkungen von Biokohlesubstrat-Gaben zu ertragsschwachen Ackerböden auf das Sickerwasser und die Nährstofffrachten in einem vierjährigen Lysimeterversuch. Berichte der DBG; Jahrestagung der DBG, Unsere Böden – Unser Leben, 05.-10.09.2015 in München. <http://eprints.dbges.de/id/eprint/1140>.
- Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A. und Lehmann, J. (2012): Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. In: *Biology and Fertility of Soils* 48, 271-284.
- Rauhut, H. (1998): Gezielter Umgang mit kulturfähigen Substraten als Grundlage einer erfolgreichen und wirtschaftlichen Rekultivierung. In Rekultivierungskongress „Neue Landschaft folgt dem Tagebau“ Köln/Brauweiler 1998, 68-73. DEBRIV.
- Reinhold, J. (2005): Eine Möglichkeit der Ableitung der Stickstoffwirksamkeit organischer Dünger aus stofflicher Zusammensetzung und Humusreproduktionsleistung einschließlich Auswirkungen auf die betriebliche Stickstoffbilanz. In: *VDLUFA Schriftenreihe* 61, 342-349.
- Revell, K. T. (2011): The Effect of Fast Pyrolysis Biochar Made From Poultry Litter on Soil Properties and Plant Growth.
- Rogasik, J. und Reinhold, J. (2006): Organische Düngung - Grundlagen der Guten Fachlichen Praxis. In: *Kompost für die Landwirtschaft* 3. Aufl.
- Rogovska, N., Laird, D., Cruse, R., Fleming, P., Parkin, T. und Meek, D. (2011): Impact of Biochar on Manure Carbon Stabilization and Greenhouse Gas Emissions. In: *Soil Science Society of America Journal* 75, 871-879.
- Saleh, M. E., Mahmoud, A. H. und Rashad, M. (2012): Peanut Biochar as a Stable Adsorbent for Removing NH<sub>4</sub>-N from Wastewater: A Preliminary Study. In: *Advances in Environmental Biology* 6, 2170-2176.
- Schatten, R., Wagner, R., Rößler, K., Suer, U. und Terytze, K. (2015): Verwertung pflanzlicher Reststoffe zu Biokohle und Biokohlesubstraten und deren Einsatz im Zierpflanzenbau Ergebnisse des TerraBoGa-Projektes im Botanischen Garten Berlin-Dahlem. In: *Müll und Abfall* 3, 137-143.
- Scherzer, J. (2004): Der Wasserhaushalt von Kiefernforsten auf Kippböden der Niederlausitz. Dissertation, Brandenburgisch Technische Universität, Cottbus.
- Schilling, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung, Ulmer, Stuttgart.
- Schimmelpfennig, S. und Glaser, B. (2012): One Step Forward toward Characterization: Some Important Material Properties to Distinguish Biochars. In: *Journal of Environmental Quality* 41, 1001-1013.
- Schlenstedt, J., Brinckmann, A., Häfker, U., Haubold-Rosar, M., Kirmer, A., Knoche, D., Landeck, I., Lorenz, A., Rümmler, F., Stärke, M., Tischew, S. und Wiedemann, D. (2014): Rekultivierung. In: *Braunkohlesanierung: Grundlagen, Geotechnik, Wasserwirtschaft, Brachflächen, Rekultivierung, Vermarktung*. (C. Drebenstedt und M. Kuyumcu, eds.).
- Schmalfluss, K. (1958): Die geochemische Bedeutung des Stickstoffs unter besonderer Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Produktion und der Dünger. In: *Encyclopedia of plant physiology. Nitrogen metabolism*. (W. Ruhland, ed.), 8, 1128 - 1145, Springer-Verlag. Göttingen, Berlin, Heidelberg.
- Schmelmer, K. und Urban, B. (2013): Einfluss von Klimawandel und Bewirtschaftung auf Umsatzprozesse und Wasserhaushalt sandiger Ackerböden. In: *Berichte der DBG; Böden - Lebensgrundlage und Verantwortung; Jahrestagung der DBG, 07. -12.09.2013 in Rostock*.



- Schmidt, H.-P., Kammann, C., Niggli, C., Evangelou, M. W., Mackie, K. A. und Abiven, S. (2014): Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: Influences on plant growth, nutrient uptake, plant health and grape quality. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 191, 117-123.
- Schmidt, H. P. (2011): Pflanzenkohle. In: *Ithaka-Journal* 1, 75-82.
- Schmidt, H. P. (2012): Pflanzenkohle, eine Schlüsseltechnologie zur Schließung der Stoffkreisläufe. In: *Ithaka Journal* 1, 75–79.
- Schmidt, H. P. (2013): Kaskadennutzung von Pflanzenkohle in der Tierhaltung (Teil1: Einstreu). In: *Ithaka-Journal*.
- Schmidt, H. P., Abiven, S., Glaser, B., Kammann, C., Bucheli, T. und Leifeld, J. (2012): Richtlinien zur Produktion von Pflanzenkohle Europäisches Pflanzenkohle Zertifikat / European Biochar Certificate.
- Schmidt, H. P. und Taylor, P. (2014): Kon-Tiki flame cap pyrolysis for the democratization of biochar production. In: *the Biochar-Journal* 14-24.
- Schmidt, M. W. und Noack, A. G. (2000): Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. In: *Global Biogeochemical Cycles* 14, 777-793.
- Schomberg, H. H., Gaskin, J. W., Harris, K., Das, K. C., Novak, J. M., Busscher, W. J., Watts, D. W., Woodroof, R. H., Lima, I. M., Ahmedna, M., Rehrh, D. und Xing, B. (2012): Influence of Biochar on Nitrogen Fractions in a Coastal Plain Soil. In: *Journal of Environmental Quality* 41, 1087-1095.
- Schönwiese, C.-D. und Trömel, S. (2011): Langzeitänderungen des Niederschlages in Deutschland. In: *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?* (J. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Karbe und C.-D. Schönwiese, eds.), 3. Aufl., 302-310.
- Schulz, E. (1997): Charakterisierung der organischen Bodensubstanz (OBS) nach dem Grad ihrer Umsetzbarkeit und ihre Bedeutung für Transformationsprozesse für Nähr- und Schadstoffe. In: *Archives of Agronomy and Soil Science* 41, 465-483.
- Schulz, H., Dunst, G. und Glaser, B. (2013): Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility. In: *Agronomy for sustainable development* 33, 817-827.
- Schulz, H., Dunst, G. und Glaser, B. (2014): No Effect Level of Co-Composted Biochar on Plant Growth and Soil Properties in a Greenhouse Experiment. In: *Agronomy* 4, 34-51.
- Schulz, H. und Glaser, B. (2012): Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 175, 410-422.
- Severin, K. (1992): Komposte aus Siedlungsreststoffen-ihre chemische Zusammensetzung und Anwendungsbereiche. In: *VDLUFA-Schriftenreihe* 35, 357-360.
- Shinogi, Y. (2004): Nutrient leaching from carbon products of sludge. In: *ASAE/CSAE Annual International Meeting, Paper (No. 044063)*.
- Shinogi, Y. und Kanri, Y. (2003): Pyrolysis of plant, animal and human waste: physical and chemical characterization of the pyrolytic products. 90, 241-247.
- Singh, B., Singh, B. P. und Cowie, A. L. (2010a): Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. In: *Australian Journal of Soil Research* 48, 516-525.
- Singh, B. P., Hatton, B. J., Balwant, S., Cowie, A. L. und Kathuria, A. (2010b): Influence of Biochars on Nitrous Oxide Emission and Nitrogen Leaching from Two Contrasting Soils. In: *Journal of Environmental Quality* 39, 1224-1235.

- Smith, J. L., Collins, H. P. und Bailey, V. L. (2010): The effect of young biochar on soil respiration. In: *Soil Biology and Biochemistry* 42, 2345–2347.
- Sohi, S., Lopez-Capel, E., Krull, E. und Bol, R. (2009): Biochar, climate change and soil: A review to guide future research, CSIRO Land and Water Science Report 05/09.
- Sohi, S. P. (2013): Pyrolysis bioenergy with biochar production – greater carbon abatement and benefits to soil. In: *GCB Bioenergy* 5.
- Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E. und Bol, R. (2010): Chapter 2 – A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. In: *Advances in Agronomy* 105, 47-82.
- Sonoki, T., Furukawa, T., Jindo, K., Suto, K., Aoyama, M. und Sánchez-Monedero, M. Á. (2013): Influence of biochar addition on methane metabolism during thermophilic phase of composting. In: *Journal of Basic Microbiology* 53, 617-621.
- Spokas, K. A., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Archer, D. W., Ippolito, J. A., Collins, H. P., Boateng, A. A., Lima, I. M., Lamb, M. C., McAloon, A. J., Lentz, R. D. und Nichols, K. A. (2012): Biochar: A Synthesis of Its Agronomic Impact beyond Carbon Sequestration. In: *Journal of Environmental Quality* 41, 973-989.
- Steiner, C. (2007): Slash and Char as Alternative to Slash and Burn: soil charcoal amendments maintain soil fertility and establish a carbon sink, Cuvillier Verlag.
- Steiner, C. (2010): Biochar in agricultural and forestry applications in: Biochar from Agricultural and Forestry Residues – A Complimentary Use of “Waste” Biomass. In: *U.S.-Focused Biochar Report, Assessment of Biochar’s Benefits for the United States of America* (J. Levine, ed.), 1-14, Colorado, USA.
- Steiner, C., Das, K. C., Melear, N. und Lakly, D. (2010): Reducing Nitrogen Loss during Poultry Litter Composting Using Biochar. In: *Journal of Environmental Quality* 39, 1236-1242.
- Steiner, C., Melear, N., Harris, K. und Das, K. C. (2011): Biochar as bulking agent for poultry litter composting. In: *Carbon Management* 2, 227-230.
- Steiner, C., Sánchez-Monedero, M. A. und Kammann, C. (2015): Biochar as an additive to compost and growing media. In: *Biochar for environmental management: science, technology and implementation* (J. Lehmann und S. Joseph, eds.), 717-735. Routledge.
- Steiner, C., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Nehls, T., de Macedo, J. L. V., Blum, W. E. H. und Zech, W. (2007): Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. In: *Plant and Soil* 291, 275-290.
- Stewart, D. P. C., Cameron, K. C., Cornforth, I. S. und Sedcole, J. R. (1998): Effects of spent mushroom substrate on soil physical conditions and plant growth in an intensive horticultural system. In: *Soil Research* 36, 899-912.
- Sütterlin, H., Trittler, R., Bojanowski, S., Stadlbauer, E. A. und Kümmerer, K. (2007): Fate of benzalkonium chloride in a sewage sludge low temperature conversion process investigated by LC–LC/ESI–MS/MS. In: *CLEAN - Soil Air Water* 35, 81-87.
- Tabatabai, M. und Bremner, J. (1969): Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. In: *Soil biology and biochemistry* 1, 301-307.
- Taghizadeh-Toosi, A., Clough, T. J., Condrón, L. M., Sherlock, R. R., Anderson, C. R. und Craigie, R. A. (2011): Biochar Incorporation into Pasture Soil Suppresses in situ Nitrous Oxide Emissions from Ruminant Urine Patches. In: *Journal of Environmental Quality* 40, 468-476.

- Tenholtern, R. (1997): Kompostanwendung auf Kultursolen aus Löß. In: *Mitt. d. Dt. Bodenkundl. Gesellschaft* 84, 65-68.
- Terytze, K., Vogel, I., Worzyk, F., Schatten, R., Friede, K. und Krüger, C. (2016a): Abschlussbericht Teilvorhaben 1 "Wiederherstellung der Bodenqualität auf militärischen Konversionsflächen unter besonderer Berücksichtigung der Nutzung von Bodenverbesserungsmitteln auf der Basis von Terra Preta und Verbundkoordination" : 01.10.2010-30.04.2016 : Forschungsverbund "Nachhaltige Landnutzung durch regionales Energie- und Stoffstrommanagement bei der Nutzung der Terra Preta Technologie auf militärischen Konversionsflächen und ertragschwachen Standorten (LaTerra).
- Terytze, K., Wagner, R., Schatten, R., Rößler, K. und König, N. (2015): Endbericht zum Forschungsvorhaben" Schließung von Kreisläufen durch Energie- und Stoffstrommanagement bei Nutzung der Terra-Preta-Technologie im Botanischen Garten im Hinblick auf Ressourceneffizienz und Klimaschutz-Modellprojekt Urban farming "(TerraBoGa).
- Terytze, K., Wagner, R., Schatten, R., Vogel, I., Rößler, K., König, N. und Thomas, P. (2016b): Handlungsanleitung - Verwertung von organischen Reststoffen zur Erzeugung fruchtbarer Pflanzenkohlesubstrate und deren Nutzung im Gartenbau, Terytze, K.
- Theeba, M., Bachmann, R. T., Illani, Z. I., Zulkefli, M., Husni, M. H. A. und Samsuri, A. W. (2012): Characterization of local mill rice husk charcoal and its effect on compost properties. In: *Malaysian Journal of Soil Science* 16, 89-102.
- Thies, J. E. und Rillig, M. C. (2009): Characteristics of Biochar - Biological Properties. (S. Joseph und J. Lehmann, eds.), 85-106. Earthscan, London ;Sterling, VA.
- Thun, R., Herrmann, R. und Knickmann, E. (1955): Methodenbuch, Band I: Die Untersuchung von Böden. Neumann Verlag, Radebeul, Berlin.
- Timmermann, F., Kluge, R., Bolduan, R., Mokry, M., Janning, S., Grosskopf, W., Schreiber, A., Ziegler, W. und Koscielniak, N. (2003): Nachhaltige Kompostverwertung in der Landwirtschaft. In: *DBU-Abschlussbericht zum Verbundforschungsprojekt Praxisbezogene Anwendungsrichtlinien sowie Vermarktungskonzepte für den nachhaltigen Einsatz von gütegesicherten Komposten im landwirtschaftlichen Pflanzenbau*, Hrsg: Gütegemeinschaft Kompost Region Süd eV, Leonberg.
- Tryon, E. H. (1948): Effect of Charcoal on Certain Physical, Chemical, and Biological Properties of Forest Soils. In: *Ecological Monographs* 18, 81-115.
- Ullum, K. (2017): Untersuchungen zur Wirkung von Biokohlekomposten in Topf- und Feldversuchen mit ausgewählten Pflanzen aus unterschiedlichen Klimazonen, Freie Universität Berlin.
- UP GmbH (2011): Baupläne Bodensäulenanlage FIB. unveröffentlicht.
- Vandecasteele, B., Mondini, C., D'Hose, T., Stefano, R., Sinicco, T. und Quero Alba, A. (2013): Effect of biochar amendment during composting and compost storage on greenhouse gas emissions, N losses and P availability. RAMIRAN 2013. Recycling of Organic Residues in Agriculture: From Waste Management to Ecosystem Services. Proceedings, 8.33.
- Vandecasteele, B., Sinicco, T., D'Hose, T., Vanden Nest, T. und Mondini, C. (2016): Biochar amendment before or after composting affects compost quality and N losses, but not P plant uptake. In: *Journal of Environmental Management* 168, 200-209.

- VDLUFA (1996): Landbauliche Verwertung von geeigneten Abfällen als Sekundärrohstoffdünger, Bodenhilfsstoffe und Kultursubstrate.
- VEB GFE (1979): Arbeitsrichtlinie Bodengeologie, Halle.
- Ventura, M., Sorrenti, G., Panzacchi, P., George, E. und Tonon, G. (2013): Biochar reduces short-term nitrate leaching from a horizon in an apple orchard. In: *Journal of Environmental Quality* 42, 76-82.
- Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A. C., van der Velde, M. und Dias, I. (2010): Biochar Application to Soils, European Commission, Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability.
- Verheijen, F. G. A., Graber, E. R., Ameloot, N., Bastos, A. C., Sohi, S. und Knicker, H. (2014): Biochars in soils: new insights and emerging research needs. In: *European Journal of Soil Science* 65, 22-27.
- Vogel, I., Worzyk, F., Wagner, R., Schatten, R., Krüger, C. und Terytze, K. (2016): Ergebnisse mehrjähriger Parzellenversuche zu den Auswirkungen von Biokohle-Substraten und Biokohle auf Bodenqualität und Pflanzenwachstum auf mit MKW und PAK kontaminierten Böden. In: *altlasten spektrum* 04, 125-133.
- Vogler, E. (1981): Zur Reproduktion der Bodenfruchtbarkeit bei der Wiedernutzbarmachung. In: *Arch. Naturschutz u. Landschaftsforsch* 21, 35-44.
- Vogtmann, H., Fricke, K. und Turk, T. (1993): Quality, physical characteristics, nutrient content, heavy metals and organic chemicals in biogenic waste compost. In: *Compost Science & Utilization* 1, 69-87.
- Von Wulffen, U., Roschke, M. und Kape, H.-E. (2008): Richtwerte für die Untersuchung und Beratung sowie zur fachlichen Umsetzung der Düngeverordnung (DüV) - Gemeinsame Hinweise der Länder Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt. LVL Brandenburg, Frankfurt/Oder.
- Wagner, R., Schatten, R., Rößler, K. und Terytze, K. (2014): Kompostierung und Karbonisierung von pflanzlichen Reststoffen - Herstellung von Biokohle und Biokohlesubstraten im Botanischen Garten Berlin-Dahlem. 75. Symposium des ANS e.V. 2014. Berlin. 90-107.
- Wagner, R., Schatten, R., Terytze, K., König, N., Stevens, A. und Thomas, P. (2012): Ressourcenschutz-Pflanzenkohlesubstrate (Terra Preta)-Schließung von Kreisläufen im Botanischen Garten von Berlin durch die Nutzung von organischen Rest- und Abfallstoffen zur Herstellung von Pflanzenkohlesubstraten-Vorstellung und erste Ergebnisse des TerraBoGa Projektes. In: *Müll und Abfall* 44, 140.
- Wang, C., Lu, H., Dong, D., Deng, H., Strong, P. J., Wang, H. und Wu, W. (2013): Insight into the effects of biochar on manure composting: Evidence supporting the relationship between N<sub>2</sub>O emission and denitrifying community. In: *Environmental Science & Technology* 47, 7341-7349.
- Wang, T., Arbestain, M. C., Hedley, M. und Bishop, P. (2012): Chemical and bioassay characterisation of nitrogen availability in biochar produced from dairy manure and biosolids. In: *Organic Geochemistry* 51, 45-54.
- Weiß, U., Klug, A., Haubold-Rosar, M. und Zeitz, J. (2013): Zur Wirkung von Biokohle-Substraten auf den Kohlenstoff- und Nährstoffhaushalt ertragsschwacher Acker- und Kippböden der Lausitz – Ergebnisse aus Feldversuchen. Berichte der DBG; Jahrestagung der DBG, Böden - Lebensgrundlage und Verantwortung; 07. -12.09.2013 in Rostock, <http://eprints.dbges.de/1021>.
- Weiß, U., Rademacher, A. und Haubold-Rosar, M. (2014): Effects of biochar substrates in agriculture and reclamation on poor sandy soils of Northeastern Germany -

- results of field and pot experiments. 19th International Conference for Renewable Resources and Plant Biotechnology NAROSSA. June 16-17, 2014. Poznan, Poland. Proceedings No. 2.1,
- Welling, J. (2016): Vollständige langsame Pyrolyse (Verkohlung). In: *Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 1223-1236. Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H.
- Werner, A. und Dabbert, S. (1993): Bewertung von Standortpotentialen im ländlichen Raum des Landes Brandenburg, ZALF-Berichte, Müncheberg.
- Wiedemann, D., Haubold-Rosar, M., Katur, J., Kleinschmidt, L., Landeck, I., Müller, L. und Ziegler, H. (1994): Schaffung ökologischer Vorrangflächen bei der Gestaltung der Bergbaufolgelandschaft. In: *Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften in Finsterwalde e. V.*, Abschlussbericht des BMBF-Förderprojektes.(FKZ: 0339393).
- Wiedner, K., Fischer, D., Walther, S., Criscuoli, I., Favilli, F., Nelle, O. und Glaser, B. (2015): Acceleration of biochar surface oxidation during composting? In: *Journal of Agricultural and food chemistry* 63, 3830-3837.
- Wiedner, K. und Glaser, B. (2015): Traditional use of biochar. In: *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. (J. Lehmann und S. Joseph, eds.), 15-37. Routledge.
- Wilk, V., Hofbauer, H. und Kaltschmitt, M. (2016): Thermo-chemische Umwandlungsprozesse. In: *Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 646-683. Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H.
- Worzyk, F., Schatten, R., Krüger, C., Terytze, K. und Vogel, I. (2014): Auswirkungen von Biokohle-Substraten und Biokohle auf Bodenparameter und Pflanzenwachstum MKW- und PAK-kontaminierter Böden. In: *Altlasten spektrum* 03, 101-113.
- Wünsche, M., Vogler, E. und Knauf, C. (1998): Bodenkundliche Kennzeichnung der Abraums substrate und Bewertung der Kippenböden für die Rekultivierung. In: *Braunkohlentagebau und Rekultivierung* (W. Pflug, ed.), 780-796. Springer Berlin Heidelberg.
- Yao, Y., Gao, B., Zhang, M., Inyang, M. und Zimmerman, A. R. (2012): Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. In: *Chemosphere* 89, 1467-1471.
- Yoshizawa, S., Tanaka, S., Ohata, M., Mineki, S., Goto, S., Fujioka, K. und Kokubun, T. (2005): Composting of food garbage and livestock waste containing biomass charcoal. Proceedings of the International Conference and Natural Resources and Environmental Management. 26.01.2017, verfügbar unter [www.geocities.jp/yasizato/Yoshizawa6.pdf](http://www.geocities.jp/yasizato/Yoshizawa6.pdf),
- Yuan, J. H., Xu, R. K. und Zhang, H. (2011): The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. In: *Bioresource Technology* 102, 3488-3497.
- Zheng, H., Wang, Z., Deng, X., Herbert, S. und Xing, B. (2013a): Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. In: *Geoderma* 206, 32-39.
- Zheng, H., Wang, Z., Deng, X., Zhao, J., Luo, Y., Novak, J., Herbert, S. und Xing, B. (2013b): Characteristics and nutrient values of biochars produced from giant reed at different temperatures. In: *Bioresource Technology* 130, 463-471.

- Zheng, J., Stewart, C. E. und Cotrufo, M. F. (2012): Biochar and Nitrogen Fertilizer Alters Soil Nitrogen Dynamics and Greenhouse Gas Fluxes from Two Temperate Soils. In: *Journal of Environmental Quality* 41, 1361-1370.
- Zundel, S., Witte, V. und Haubold-Rosar, M. (2017): Zur Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Biokohle und Biokohlesubstraten-Geschäftsmodelle und spezifische Anwendungsbedingungen.

## Gesetze, Normen und Richtlinien

- BBergG, B. (1980): Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), das zuletzt durch Artikel 4 Absatz 71 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154) geändert worden ist.
- BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 3 Absatz 4 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist.
- BGK (1998): Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Bundesgütegemeinschaft Kompost.
- BGK (2012a): Qualitätskriterien und Güterrichtlichen Fertigkompost. [http://www.kompost.de/fileadmin/user\\_upload/Dateien/Guetesicherung/Dokumente\\_Kompost/GP\\_K\\_2012.pdf](http://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Guetesicherung/Dokumente_Kompost/GP_K_2012.pdf).
- BGK (2012b): Qualitätskriterien und Güterrichtlichen Frischkompost. [http://www.kompost.de/fileadmin/user\\_upload/Dateien/Guetesicherung/Dokumente\\_Kompost/GP\\_FK\\_2012.pdf](http://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Guetesicherung/Dokumente_Kompost/GP_FK_2012.pdf).
- BGK (2014): Merkblatt zum RAL-Prüfzeugnis Kompost RAL-GZ 251 Erläuterung der RAL-Prüfzeugnisse und hinterlegter Qualitäts-/Prüfkriterien Kompost RAL-GZ 251, [http://www.kompost.de/fileadmin/user\\_upload/Dateien/Guetesicherung/Dokumente\\_Kompost/3.10.3\\_MB\\_PUEZ\\_Kompost\\_2014.pdf](http://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Guetesicherung/Dokumente_Kompost/3.10.3_MB_PUEZ_Kompost_2014.pdf).
- BioAbfV (2012): Bioabfallverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. April 2013 (BGBl. I S. 658), die zuletzt durch Artikel 3 Absatz 2 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist.
- BNatSchG (2009): Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 15. September 2017 (BGBl. I S. 3434) geändert worden ist.
- DIN 19683-2:1973-04: Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Physikalische Laboruntersuchungen - Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nach Vorbehandlung mit Natriumpyrophosphat.
- DIN 19683-12:1973-04: Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Physikalische Laboruntersuchungen, Bestimmung der Rohdichte.
- DIN 19684-3:2000-08: Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Chemische Laboruntersuchungen - Teil 3: Bestimmung des Glührückstands und des Glührückstands.
- DIN 19684-8:1977-02: Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau; Chemische Laboruntersuchungen, Bestimmung der Austauschkapazität des Bodens und der austauschbaren Kationen.
- DIN 38404-5:2009-07: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C) - Teil 5: Bestimmung des pH-Werts (C 5).
- DIN 38404-8:1981-01: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C); Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (C8).
- DIN 38405-11:1983-10: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Anionen (Gruppe D); Bestimmung von Phosphorverbindungen (D 11).

- DIN 38406-5:1983-10: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Kationen (Gruppe E); Bestimmung des Ammonium-Stickstoffs (E 5).
- DIN 38406-6:1998-07: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Kationen (Gruppe E) - Teil 6: Bestimmung von Blei mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) (E 6).
- DIN 38406-28:1998-05: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Kationen (Gruppe E) - Teil 28: Bestimmung von gelöstem Barium mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) (E 28).
- DIN 38409-41:1980-12: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Summarische Wirkungs- und Stoffkenngößen (Gruppe H); Bestimmung des Chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) im Bereich über 15 mg/l (H 41).
- DIN EN 12260:2003-12: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von Stickstoff - Bestimmung von gebundenem Stickstoff (TNb) nach Oxidation zu Stickstoffoxiden.
- DIN EN 1484:1997-08: Wasseranalytik - Anleitungen zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC).
- DIN EN ISO 10304-1:2009-07: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von gelösten Anionen mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie - Teil 1: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Fluorid, Nitrat, Nitrit, Phosphat und Sulfat (ISO 10304-1:2007).
- DIN EN ISO 10304-2:1996-11: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der gelösten Anionen mittels Ionenchromatographie - Teil 2: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Nitrat, Nitrit, Orthophosphat und Sulfat in Abwasser (ISO 10304-2:1995).
- DIN EN ISO 10693:2014-06: Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Carbonatgehaltes - Volumetrisches Verfahren (ISO 10693:1995).
- DIN EN ISO 11885:2009-09: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES) (ISO 11885:2007).
- DIN EN ISO 5961:1995-05: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von Cadmium durch Atomabsorptionsspektrometrie (ISO 5961:1994).
- DIN ISO 10390:1997-05: Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des pH-Wertes (ISO 10390:1994).
- DIN ISO 10694:1996-08: Bodenbeschaffenheit - Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse) (ISO 10694:1995).
- DIN ISO 11047:2003-05: Bodenbeschaffenheit - Bestimmung von Cadmium, Chrom, Cobalt, Kupfer, Blei, Mangan, Nickel und Zink im Königswasserextrakt - Flammen- und elektrothermisches atomabsorptionsspektrometrisches Verfahren (ISO 11047:1998).
- DIN ISO 11265:1997-06: Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit (ISO 11265:1994 + ISO 11265:1994/Corr.1:1996).
- DIN ISO 11274:2012-04: Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens - Laborverfahren (ISO 11274:1998 + Cor. 1:2009).
- DIN ISO 11464:1996-12: Bodenbeschaffenheit - Probenvorbereitung für physikalisch-chemische Untersuchungen (ISO 11464:1994).



- DIN ISO 11465:1996-12: Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts auf Grundlage der Masse - Gravimetrisches Verfahren (ISO 11465:1993).
- DIN ISO 11466:1997-06: Bodenbeschaffenheit - Extraktion in Königswasser löslicher Spurenelemente (ISO 11466:1995).
- DIN ISO 13878:1998-11: Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Gesamt-Stickstoffs durch trockene Verbrennung (Elementaranalyse) (ISO 13878:1998).
- DIN ISO 15178:2001-02: Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Gesamtschwefels nach trockener Verbrennung (ISO 15178:2000).
- DüMV (2012): Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305) geändert worden ist.
- DüngG (2009): Düngegesetz vom 9. Januar 2009 (BGBl. I S. 54, 136), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1068) geändert worden ist.
- EG (1991): Richtlinie des Rates vom 12. Dezember 1991 zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen (91/676/EWG).
- EPA 3052:1996: Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices.
- FuttMV (1981): Futtermittelverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 29. August 2016 (BGBl. I S. 2004), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 12. Juli 2017 (BGBl. I S. 2378) geändert worden ist.
- KrWg (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG) vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 4. April 2016 (BGBl. I S. 569) geändert worden ist.
- LABO (2017): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. In: *Saarbrücken: Saarbrücken: Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft, Bodenschutz.*
- LAGA (1995): Länderarbeitsgemeinschaft Abfall - Merkblatt M10. Qualitätskriterien und Anwendungsempfehlungen für Kompost. In: *Müllhandbuch 4*, 1-52.
- Schmidt, H. P., Abiven, S., Glaser, B., Kammann, C., Bucheli, T. und Leifeld, J. (2012): Richtlinien zur Produktion von Pflanzenkohle Europäisches Pflanzenkohle Zertifikat / European Biochar Certificate.
- TrinkwV (2001): Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 3. Januar 2018 (BGBl. I S. 99) geändert worden ist.
- VEB GFE (1979): Arbeitsrichtlinie Bodengeologie, Halle.



## 9 Anhang

### A 1 Ergänzende Angaben zu dem Gefäßversuch I

Anhang 1.1: Bodenphysikalische und -chemische Welzow

Varianten	pH (CaCl <sub>2</sub> )	C <sub>org</sub> [M.-%]	N <sub>t</sub>	C/N [mg/kg]	P <sub>DL</sub>	K <sub>DL</sub> [μS/cm]	R <sub>t</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	GPV	LK	FK		nFK	TW
										[Vol.-%]			
150/90/150	n. b.	0,19	0,012	15,4	20	16	1,53	42,08	30,42	11,52	8,55	2,92	
0/90/150	7,5	0,18	0,011	16,5	25	24	1,51	43,12	31,89	11,24	8,21	3,03	
50/90/150	7,5	0,17	0,011	15,6	24	20	1,59	39,16	26,98	12,22	9,17	3,02	
100/90/150	n. b.	0,18	0,011	16,4	20	16	1,59	39,17	27,09	11,87	8,91	2,94	
200/90/150	n. b.	0,19	0,013	14,6	20	14	1,63	37,77	25,56	12,22	9,29	2,92	
400/90/150	n. b.	0,18	0,013	13,8	22	15	1,52	41,72	29,95	11,78	9,02	2,76	
150/0/150	n. b.	0,18	0,012	15,0	11	15	1,57	40,45	27,80	12,65	9,67	2,98	
150/60/150	n. b.	0,16	0,013	12,3	16	15	1,58	40,32	28,08	12,56	9,54	3,02	
150/180/150	n. b.	0,16	0,010	16,0	35	13	1,57	40,38	27,73	12,91	9,85	3,02	
150/270/150	7,5	0,15	0,013	11,4	44	14	1,55	41,01	28,43	12,73	9,73	3,00	
50/90/150	7,5	0,17	0,011	15,6	24	20	1,59	39,16	26,98	12,22	9,17	3,02	
100/180/150	7,5	0,19	0,013	14,8	27	15	1,60	39,61	27,00	12,31	9,22	3,18	
200/360/150	7,4	0,16	0,012	13,3	58	12	1,61	39,63	26,66	13,20	10,09	3,05	

= Anhang 1.2: Bodenphysikalische und -chemische Zinnitz

Varianten	pH (CaCl <sub>2</sub> )	C <sub>org</sub> [M.-%]	N <sub>t</sub>	C/N [mg/kg]	P <sub>DL</sub>	K <sub>DL</sub> [μS/cm]	R <sub>t</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	GPV	LK	FK [Vol.-%]	nFK	TW
150/90/150		0,94	0,081	11,6	46	19	1,46	44,03	13,96	30,07	25,83	4,16
0/90/150	6,2	0,92	0,077	11,9	41	28	1,45	44,30	15,17	29,12	24,52	4,40
50/90/150	6,2	0,93	0,079	11,8	51	21	1,50	42,42	12,18	30,24	25,70	4,54
100/90/150		0,97	0,078	12,4	50	24	1,48	43,38	13,67	29,72	25,50	4,22
200/90/150		0,92	0,076	12,1	43	19	1,51	41,86	11,74	30,12	25,46	4,66
400/90/150		0,95	0,078	12,2	48	11	1,51	41,90	12,98	28,93	24,21	4,77
150/0/150		0,94	0,079	11,9	38	13	1,50	42,42	12,42	30,00	24,86	5,14
150/60/150		0,96	0,077	12,5	42	8	1,48	42,69	13,66	28,74	23,62	5,09
150/180/150		0,94	0,078	12,1	56	7	1,50	42,42	13,18	29,80	24,68	5,16
150/270/150	6,0	0,91	0,077	11,8	66	16	1,44	45,49	15,55	30,15	25,21	4,96
50/90/150	6,2	0,93	0,079	11,8	51	21	1,50	42,42	12,18	30,24	25,70	4,54
100/180/150	6,0	0,98	0,081	12,1	49	14	1,52	41,24	11,16	30,09	24,90	5,19
200/360/150	6,0	0,93	0,080	11,6	72	12	1,49	42,53	13,07	29,46	24,36	5,10

Anhang 1.3: Darstellung signifikanter Ertragsunterschiede ( $TM_{atro}$ ) des Knaulgrases im Gefäßversuch I auf dem Boden Welzow nach Ernteterminen sowie als Summe (Nemenyi-Test,  $\alpha = 0,05$ ; <sup>1</sup> 1. Schnitt, <sup>2</sup> = 2. Schnitt, <sup>3</sup> Summe beider Schnitte, Referenzvariante ist grau hervorgehoben)

Varianten	30	60	90	120	240	30	60	90	120	0/ 90/ 150	50/ 90/ 150	100/ 90/ 150	150/ 90/ 150	200/ 90/ 150	400/ 90/ 150	150/ 0/ 150	150/ 60/ 150	150/ 180/ 150	150/ 270/ 150	100/ 180/ 150	200/ 360/ 150
Varianten	BKS15					BKS30															
30 BKS15					s. <sup>2</sup>										s. <sup>1</sup> , s. <sup>3</sup>	s. <sup>1</sup> , s. <sup>3</sup>			s. <sup>1</sup>		
60 BKS15																					
90 BKS15																					
120 BKS15																					
240 BKS15	s. <sup>2</sup>					s. <sup>2</sup>				s. <sup>1</sup> , s. <sup>3</sup>	s. <sup>2</sup>	s. <sup>2</sup>									
30 BKS30					s. <sup>2</sup>				s. <sup>2</sup>					s. <sup>3</sup>	s. <sup>1</sup> , s. <sup>3</sup>						
60 BKS30															s. <sup>1</sup> , s. <sup>3</sup>						
90 BKS30																					
120 BKS30						s. <sup>2</sup>			s. <sup>2</sup>		s. <sup>2</sup>										
0/90/150					s. <sup>1</sup> , s. <sup>3</sup>				s. <sup>2</sup>					s. <sup>1</sup> , s. <sup>2</sup> , s. <sup>3</sup>	s. <sup>1</sup> , s. <sup>2</sup> , s. <sup>3</sup>	s. <sup>1</sup>		s. <sup>1</sup>	s. <sup>1</sup> , s. <sup>3</sup>		
50/90/150					s. <sup>2</sup>				s. <sup>2</sup>					s. <sup>2</sup> , s. <sup>3</sup>	s. <sup>2</sup> , s. <sup>3</sup>			s. <sup>3</sup>			
100/90/150					s. <sup>2</sup>																
150/90/150																					
200/90/150	s. <sup>1</sup> , s. <sup>3</sup>					s. <sup>3</sup>				s. <sup>1</sup> , s. <sup>2</sup> , s. <sup>3</sup>	s. <sup>2</sup> , s. <sup>3</sup>										
400/90/150	s. <sup>1</sup> , s. <sup>3</sup>					s. <sup>1</sup> , s. <sup>3</sup>	s. <sup>1</sup> , s. <sup>3</sup>			s. <sup>1</sup> , s. <sup>2</sup> , s. <sup>3</sup>	s. <sup>2</sup> , s. <sup>3</sup>										
100/180/150																					
200/360/150																					
150/0/150										s. <sup>1</sup>											
150/60/150																					
150/180/150										s. <sup>1</sup>	s. <sup>3</sup>										
150/270/150	s. <sup>1</sup>									s. <sup>1</sup> , s. <sup>3</sup>											

≧ Anhang 1.4: Darstellung signifikanter Ertragsunterschiede ( $TM_{atro}$ ) des Knaulgrases im Gefäßversuch I auf dem Boden Zinnitz nach Ernteterminen sowie als Summe (Nemenyi-Test,  $\alpha = 0,05$ ; <sup>1</sup> 1. Schnitt, <sup>2</sup> = 2. Schnitt, <sup>3</sup> Summe beider Schnitte, Referenzvariante ist grau hervorgehoben)

Varianten	30	60	90	120	240	30	60	90	120	0/ 90/ 150	50/ 90/ 150	100/ 90/ 150	150/ 90/ 150	200/ 90/ 150	400/ 90/ 150	150/ 0/ 150	150/ 60/ 150	150/ 180/ 150	150/ 270/ 150	100/ 180/ 150	200/ 360/ 150	
Varianten	BKS15					BKS30																
30 BKS15																						
60 BKS15																						
90 BKS15															s. <sup>3</sup>							
120 BKS15															s. <sup>3</sup>							
240 BKS15															s. <sup>3</sup>	s. <sup>1</sup>				s. <sup>1</sup>		
30 BKS30																						
60 BKS30																	s. <sup>2</sup>					
90 BKS30															s. <sup>3</sup>							
120 BKS30															s. <sup>3</sup>							
0/90/150																						
50/90/150																						
100/90/150																						
150/90/150																						
200/90/150																	s. <sup>2</sup>					
400/90/150			s. <sup>3</sup>	s. <sup>3</sup>	s. <sup>3</sup>			s. <sup>3</sup>	s. <sup>3</sup>								s. <sup>2</sup>			s. <sup>2</sup>		
100/180/150					s. <sup>1</sup>																	
200/360/150						s. <sup>2</sup>								s. <sup>2</sup>	s. <sup>2</sup>							
150/0/150					s. <sup>1</sup>																	
150/60/150					s. <sup>1</sup>										s. <sup>2</sup>							
150/180/150																						
150/270/150																						

Anhang 1.5: Darstellung signifikanter Unterschiede im N-Gehalt des Knaulgrases im Gefäßversuch I auf dem Boden Welzow nach Ernteterminen (Nemenyi-Test,  $\alpha = 0,05$ ; <sup>1</sup> 1. Schnitt, <sup>2</sup> = 2. Schnitt, Referenzvariante ist grau hervorgehoben)

Varianten	30	60	90	120	240	30	60	90	120	0/ 90/ 150	50/ 90/ 150	100/ 90/ 150	150/ 90/ 150	200/ 90/ 150	400/ 90/ 150	150/ 0/ 150	150/ 60/ 150	150/ 180/ 150	150/ 270/ 150	100/ 180/ 150	200/ 360/ 150
Varianten	BKS15					BKS30															
30 BKS15																					
60 BKS15										s. <sup>2</sup>					s. <sup>1</sup>						
90 BKS15																					
120 BKS15											s. <sup>1</sup>										
240 BKS15											s. <sup>1</sup>										
30 BKS30																					
60 BKS30																					
90 BKS30																					
120 BKS30																					
0/90/150		s. <sup>2</sup>																	s. <sup>2</sup>		
50/90/150				s. <sup>1</sup>	s. <sup>1</sup>										s. <sup>1</sup>				s. <sup>2</sup>		
100/90/150															s. <sup>1</sup>						
150/90/150																					
200/90/150																					
400/90/150		s. <sup>1</sup>									s. <sup>1</sup>	s. <sup>1</sup>									
100/180/150																					
200/360/150																					
150/0/150																					
150/60/150										s. <sup>2</sup>	s. <sup>2</sup>										
150/180/150																					
150/270/150																					





Anhang 1.7: Darstellung signifikanter Unterschiede im K-Gehalt des Knaulgrases im Gefäßversuch I auf dem Boden Welzow nach Ernteterminen (Nemenyi-Test,  $\alpha = 0,05$ ; <sup>1</sup> 1. Schnitt, <sup>2</sup> = 2. Schnitt, Referenzvariante ist grau hervorgehoben)

Varianten	30	60	90	120	240	30	60	90	120	0/ 90/ 150	50/ 90/ 150	100/ 90/ 150	150/ 90/ 150	200/ 90/ 150	400/ 90/ 150	150/ 0/ 150	150/ 60/ 150	150/ 180/ 150	150/ 270/ 150	100/ 180/ 150	200/ 360/ 150
Varianten	BKS15					BKS30															
30 BKS15															s. <sup>2</sup>						
60 BKS15															s. <sup>2</sup>						
90 BKS15														s. <sup>1</sup>	s. <sup>2</sup>						
120 BKS15														s. <sup>1</sup>	s. <sup>2</sup>						
240 BKS15											s. <sup>1</sup>			s. <sup>1</sup>	s. <sup>1</sup>						
30 BKS30															s. <sup>2</sup>						
60 BKS30															s. <sup>2</sup>						
90 BKS30																					
120 BKS30																					
0/90/150																					
50/90/150					s. <sup>1</sup>																
100/90/150																					
150/90/150																					
200/90/150			s. <sup>1</sup>	s. <sup>1</sup>	s. <sup>1</sup>																
400/90/150	s. <sup>2</sup>	s. <sup>2</sup>	s. <sup>2</sup>	s. <sup>2</sup>	s. <sup>1</sup>	s. <sup>2</sup>	s. <sup>2</sup>														
100/180/150																					
200/360/150																					
150/0/150																					
150/60/150																					
150/180/150																					
150/270/150																					

Anhang 1.8: Darstellung signifikanter Unterschiede im N-Gehalt des Knautgrases im Gefäßversuch I auf dem Boden Zinnitz nach Ernteterminen (Nemenyi-Test,  $\alpha = 0,05$ ; <sup>1</sup> 1. Schnitt, <sup>2</sup> = 2. Schnitt, Referenzvariante ist grau hervorgehoben)

Varianten	30	60	90	120	240	30	60	90	120	0/ 90/ 150	50/ 90/ 150	100/ 90/ 150	150/ 90/ 150	200/ 90/ 150	400/ 90/ 150	150/ 0/ 150	150/ 60/ 150	150/ 180/ 150	150/ 270/ 150	100/ 180/ 150	200/ 360/ 150	
Varianten	BKS15					BKS30																
30 BKS15															s. <sup>1</sup>							
60 BKS15																						
90 BKS15																						
120 BKS15																						
240 BKS15						s. <sup>1</sup>																
30 BKS30					s. <sup>1</sup>									s. <sup>1</sup>	s. <sup>1</sup>						s. <sup>1</sup>	
60 BKS30																						
90 BKS30																						
120 BKS30																						
0/90/150															s. <sup>1</sup>							
50/90/150																						
100/90/150															s. <sup>1</sup>							
150/90/150																						
200/90/150						s. <sup>1</sup>																
400/90/150	s. <sup>1</sup>					s. <sup>1</sup>				s. <sup>1</sup>		s. <sup>1</sup>									s. <sup>2</sup>	
100/180/150																						
200/360/150																						
150/0/150																						
150/60/150																						
150/180/150																						
150/270/150						s. <sup>1</sup>												s. <sup>2</sup>				

Anhang 1.9: Darstellung signifikanter Unterschiede im P-Gehalt des Knaulgrases im Gefäßversuch I auf dem Boden Zinnitz nach Ernteterminen (Nemenyi-Test,  $\alpha = 0,05$ ; <sup>1</sup> 1. Schnitt, <sup>2</sup> = 2. Schnitt, Referenzvariante ist grau hervorgehoben)

Varianten	30	60	90	120	240	30	60	90	120	0/ 90/ 150	50/ 90/ 150	100/ 90/ 150	150/ 90/ 150	200/ 90/ 150	400/ 90/ 150	150/ 0/ 150	150/ 60/ 150	150/ 180/ 150	150/ 270/ 150	100/ 180/ 150	200/ 360/ 150		
Varianten	BKS15					BKS30																	
30 BKS15																							
60 BKS15														s. <sup>2</sup>									
90 BKS15													s. <sup>1</sup>	s. <sup>2</sup>									
120 BKS15													s. <sup>1</sup>	s. <sup>1</sup> , s. <sup>2</sup>					s. <sup>1</sup>		s. <sup>2</sup>		
240 BKS15												s. <sup>1</sup>	s. <sup>1</sup>	s. <sup>1</sup> , s. <sup>2</sup>			s. <sup>1</sup>	s. <sup>1</sup>	s. <sup>1</sup>				
30 BKS30																							
60 BKS30														s. <sup>2</sup>									
90 BKS30																							
120 BKS30													s. <sup>1</sup>										
0/90/150																							
50/90/150																							
100/90/150					s. <sup>1</sup>																		
150/90/150			s. <sup>1</sup>	s. <sup>1</sup>	s. <sup>1</sup>				s. <sup>1</sup>														
200/90/150		s. <sup>2</sup>	s. <sup>2</sup>	s. <sup>1</sup> , s. <sup>2</sup>	s. <sup>1</sup> , s. <sup>2</sup>		s. <sup>2</sup>																
400/90/150																							
100/180/150					s. <sup>1</sup>																		
200/360/150					s. <sup>1</sup>																		
150/0/150					s. <sup>1</sup>																		
150/60/150				s. <sup>1</sup>	s. <sup>1</sup>																		
150/180/150				s. <sup>2</sup>																			
150/270/150																							

× Anhang 1.10: Darstellung signifikanter Unterschiede im K-Gehalt des Knaulgrases im Gefäßversuch I auf dem Boden Zinnitz nach Ernteterminen (Nemenyi-Test,  $\alpha = 0,05$ ; <sup>1</sup> 1. Schnitt, <sup>2</sup> = 2. Schnitt, Referenzvariante ist grau hervorgehoben)

Varianten	30	60	90	120	240	30	60	90	120	0/ 90/ 150	50/ 90/ 150	100/ 90/ 150	150/ 90/ 150	200/ 90/ 150	400/ 90/ 150	150/ 0/ 150	150/ 60/ 150	150/ 180/ 150	150/ 270/ 150	100/ 180/ 150	200/ 360/ 150
Varianten	BKS15					BKS30															
30 BKS15																					
60 BKS15														s. <sup>2</sup>						s. <sup>2</sup>	
90 BKS15														s. <sup>2</sup>							
120 BKS15									s. <sup>1</sup>			s. <sup>1</sup> , s. <sup>2</sup>	s. <sup>1</sup>	s. <sup>2</sup>						s. <sup>2</sup>	
240 BKS15									s. <sup>1</sup>			s. <sup>1</sup> , s. <sup>2</sup>	s. <sup>1</sup> , s. <sup>2</sup>	s. <sup>2</sup>				s. <sup>1</sup>	s. <sup>2</sup>	s. <sup>2</sup>	
30 BKS30																					
60 BKS30																					
90 BKS30																					
120 BKS30												s. <sup>1</sup>		s. <sup>2</sup>							
0/90/150				s. <sup>1</sup>	s. <sup>1</sup>																
50/90/150				s. <sup>1</sup> , s. <sup>2</sup>	s. <sup>1</sup> , s. <sup>2</sup>				s. <sup>1</sup>												
100/90/150				s. <sup>1</sup> , s. <sup>2</sup>	s. <sup>1</sup> , s. <sup>2</sup>				s. <sup>1</sup>												
150/90/150				s. <sup>1</sup>	s. <sup>1</sup> , s. <sup>2</sup>																
200/90/150		s. <sup>2</sup>	s. <sup>2</sup>	s. <sup>2</sup>	s. <sup>2</sup>				s. <sup>2</sup>												
400/90/150																					
100/180/150																					
200/360/150																					
150/0/150																					
150/60/150					s. <sup>1</sup>																
150/180/150		s. <sup>2</sup>		s. <sup>2</sup>	s. <sup>2</sup>																
150/270/150					s. <sup>2</sup>																

## A 2 Ergänzende Angaben zu dem Bodensäulenversuch

Anhang 2.1: Erträge der vier Knaulgrasernten in der Periode I

Erntetermin	Welzow			Zinnitz		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
Ertrag [dt/ha TS]						
10.11.2011	1,77	4,95	9,52	6,16	19,41	4,89
08.02.2012	1,02	3,38	10,29	15,69	17,48	9,83
18.04.2012	2,13	4,51	11,24	19,55	21,51	11,00
09.08.2012	9,97	19,08	21,04	6,97	36,89	16,74

Anhang 2.2: N-, P- und K-Gehalte im Knaulgrasaufwuchs in der Periode I

Gehalte	Welzow			Zinnitz		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
Ernte am 10.11.2011						
N [g/kg TS]	23,43	23,79	28,64	42,08	33,62	41,49
P [g/kg TS]	4,45	5,02	4,91	6,00	4,98	6,03
K [g/kg TS]	51,06	50,91	52,86	69,21	57,15	70,15
Ernte am 08.02.2012						
N [g/kg TS]	19,97	21,78	19,97	22,47	21,89	33,20
P [g/kg TS]	4,81	5,42	3,96	4,26	4,08	4,53
K [g/kg TS]	41,41	43,67	42,36	45,57	43,25	55,71
Ernte am 18.04.2012						
N [g/kg TS]	24,83	25,76	25,19	29,47	24,56	37,64
P [g/kg TS]	6,56	7,33	5,37	5,35	4,97	5,08
K [g/kg TS]	46,02	47,74	49,09	48,94	42,68	60,90
Ernte am 09.08.2012						
N [g/kg TS]	18,99	17,88	25,08	34,83	31,51	37,42
P [g/kg TS]	2,85	3,55	3,76	4,31	3,32	3,67
K [g/kg TS]	31,39	28,22	35,25	56,65	34,71	47,72

IX Welzow

Anhang 2.3: Signifikante Unterschiede der Sickerwassermengen in dem Bodensäulenversuch Welzow für die drei Tiefenstufen über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Tiefenstufe 1			Tiefenstufe 2			Tiefenstufe 3		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	

Anhang 2.4: Signifikante Unterschiede der Sickerwassermengen in dem Bodensäulenversuch Welzow für die drei Tiefenstufen und fünf Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III			Periode IV			Periode V		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
Tiefenstufe 1															
MIN		n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.	n. s.		n. s.		n. s.
90 BKS15	s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		s.	n. s.	
Tiefenstufe 2															
MIN		n. s.	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.			s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.			s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		s.	s.	
Tiefenstufe 3															
MIN		n. s.	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.	

Anhang 2.5: Signifikante Unterschiede der elektrischen Leitfähigkeit in dem Bodensäulenversuch Welzow für die drei Tiefenstufen über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Tiefenstufe 1			Tiefenstufe 2			Tiefenstufe 3		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		s.	s.		n. s.	s.	

Anhang 2.6: Signifikante Unterschiede der elektrischen Leitfähigkeit in dem Bodensäulenversuch Welzow für die drei Tiefenstufen und fünf Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III			Periode IV			Periode V		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
Tiefenstufe 1															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 2															
MIN		n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 3															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.	

Anhang 2.7: Signifikante Unterschiede der NO<sub>3</sub>-N-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Welzow für die drei Tiefenstufen über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Tiefenstufe 1			Tiefenstufe 2			Tiefenstufe 3		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.	

Anhang 2.8: Signifikante Unterschiede der NO<sub>3</sub>-N-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Welzow für die drei Tiefenstufen und fünf Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III			Periode IV			Periode V		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
Tiefenstufe 1															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 2															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 3															
MIN		n. s.	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.	



Anhang 2.9: Signifikante Unterschiede der NPOC(D)-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Welzow für die drei Tiefenstufen über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Tiefenstufe 1			Tiefenstufe 2			Tiefenstufe 3		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.			s.		n. s.	s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		s.	s.		s.	s.	

Anhang 2.10: Signifikante Unterschiede der NPOC(D)-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Welzow für die drei Tiefenstufen und fünf Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III			Periode IV			Periode V		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
Tiefenstufe 1															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 2															
MIN		n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.	
Tiefenstufe 3															
MIN		n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	

Anhang 2.11: Signifikante Unterschiede der DN<sub>b</sub>-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Welzow für die drei Tiefenstufen über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Tiefenstufe 1			Tiefenstufe 2			Tiefenstufe 3		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		s.	s.		n. s.	n. s.	

Anhang 2.12: Signifikante Unterschiede der DN<sub>b</sub>-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Welzow für die drei Tiefenstufen und fünf Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III			Periode IV			Periode V		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
Tiefenstufe 1															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 2															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 3															
MIN		n. s.	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.	

Anhang 2.13: Signifikante Unterschiede der o-PO<sub>4</sub>-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Welzow für die drei Tiefenstufen über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Tiefenstufe 1			Tiefenstufe 2			Tiefenstufe 3		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	

Anhang 2.14: Signifikante Unterschiede der o-PO<sub>4</sub>-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Welzow für die drei Tiefenstufen und fünf Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III			Periode IV			Periode V		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
Tiefenstufe 1															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 2															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 3															
MIN		n. s.	(s.) <sup>1)</sup>		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		(s.) <sup>1)</sup>	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	(s.) <sup>1)</sup>	(s.) <sup>1)</sup>		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	

<sup>1)</sup> Es liegt ein signifikanter Unterschied in dieser Tiefenstufe und Periode vor, der allerdings im paarweisen Vergleich durch die Fehlerkorrektur nicht belegt werden kann.

Anhang 2.15: Signifikante Unterschiede der K-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Welzow für die drei Tiefenstufen über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Tiefenstufe 1			Tiefenstufe 2			Tiefenstufe 3		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		s.	s.		s.	s.	

Anhang 2.16: Signifikante Unterschiede der K-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Welzow für die drei Tiefenstufen und fünf Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III			Periode IV			Periode V		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
Tiefenstufe 1															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 2															
MIN		n. s.	s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	(s.) <sup>1)</sup>		n. s.	s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		(s.) <sup>1)</sup>	n. s.		s.
90 BKS15	s.	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.		(s.) <sup>1)</sup>	(s.) <sup>1)</sup>		s.	s.	
Tiefenstufe 3															
MIN		n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		s.	n. s.	

<sup>1)</sup> Es liegt ein signifikanter Unterschied in dieser Tiefenstufe und Periode vor, der allerdings im paarweisen Vergleich durch die Fehlerkorrektur nicht belegt werden kann.

Zinnitz

Anhang 2.17: Signifikante Unterschiede der Sickerwassermengen in dem Bodensäulenversuch Zinnitz für die drei Tiefenstufen über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Tiefenstufe 1			Tiefenstufe 2			Tiefenstufe 3		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
MIN		s.	n. s.		s.	n. s.		s.	n. s.
30 BKS15	s.		n. s.	s.		n. s.	s.		s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.	

Anhang 2.18: Signifikante Unterschiede der Sickerwassermengen in dem Bodensäulenversuch Zinnitz für die drei Tiefenstufen und fünf Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III			Periode IV			Periode V		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
Tiefenstufe 1															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 2															
MIN		s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	s.
30 BKS15	s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.	
Tiefenstufe 3															
MIN		s.	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	s.		s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	

XX Anhang 2.19: Signifikante Unterschiede der elektrischen Leitfähigkeit in dem Bodensäulenversuch Zinnitz für die drei Tiefenstufen über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Tiefenstufe 1			Tiefenstufe 2			Tiefenstufe 3		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.	

Anhang 2.20: Signifikante Unterschiede der elektrischen Leitfähigkeit in dem Bodensäulenversuch Zinnitz für die drei Tiefenstufen und fünf Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III			Periode IV			Periode V		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
Tiefenstufe 1															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.	
Tiefenstufe 2															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.
90 BKS15	n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.	
Tiefenstufe 3															
MIN		n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	

Anhang 2.21: Signifikante Unterschiede der NO<sub>3</sub>-N-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Zinnitz für die drei Tiefenstufen über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Tiefenstufe 1			Tiefenstufe 2			Tiefenstufe 3		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	s.		s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.	

Anhang 2.22: Signifikante Unterschiede der NO<sub>3</sub>-N-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Zinnitz für die drei Tiefenstufen und fünf Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III			Periode IV			Periode V		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
Tiefenstufe 1															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 2															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 3															
MIN	n. s.	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	

Anhang 2.23: Signifikante Unterschiede der NPOC(D)-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Zinnitz für die drei Tiefenstufen über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Tiefenstufe 1			Tiefenstufe 2			Tiefenstufe 3		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	s.	

Anhang 2.24: Signifikante Unterschiede der NPOC(D)-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Zinnitz für die drei Tiefenstufen und fünf Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III			Periode IV			Periode V		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
Tiefenstufe 1															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 2															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 3															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	



Anhang 2.25: Signifikante Unterschiede der DN<sub>b</sub>-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Zinnitz für die drei Tiefenstufen über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Tiefenstufe 1			Tiefenstufe 2			Tiefenstufe 3		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.	

Anhang 2.26: Signifikante Unterschiede der DN<sub>b</sub>-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Zinnitz für die drei Tiefenstufen und fünf Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III			Periode IV			Periode V		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
Tiefenstufe 1															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 2															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 3															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	

Anhang 2.27: Signifikante Unterschiede der o-PO<sub>4</sub>-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Zinnitz für die drei Tiefenstufen über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test, α = 0,05)

	Tiefenstufe 1			Tiefenstufe 2			Tiefenstufe 3		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	

Anhang 2.28: Signifikante Unterschiede der o-PO<sub>4</sub>-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Zinnitz für die drei Tiefenstufen und fünf Perioden (Friedmann-Test, α = 0,05)

	Periode I			Periode II			Periode III			Periode IV			Periode V		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
Tiefenstufe 1															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 2															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 3															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		(s.) <sup>1)</sup>	n. s.		s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	(s.) <sup>1)</sup>		n. s.	s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	

<sup>1)</sup> Es liegt ein signifikanter Unterschied in dieser Tiefenstufe und Periode vor, der allerdings im paarweisen Vergleich durch die Fehlerkorrektur nicht belegt werden kann.

Anhang 2.29: Signifikante Unterschiede der K-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Zinnitz für die drei Tiefenstufen über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Tiefenstufe 1			Tiefenstufe 2			Tiefenstufe 3		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		s.	s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.	

Anhang 2.30: Signifikante Unterschiede der K-Gehalte in dem Bodensäulenversuch Zinnitz für die drei Tiefenstufen und fünf Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III			Periode IV			Periode V		
	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15	MIN	30 BKS15	90 BKS15
Tiefenstufe 1															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	
Tiefenstufe 2															
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.	
Tiefenstufe 3															
MIN		s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.
30 BKS15	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.	

## A 3 Ergänzende Angaben zu dem Lysimeterversuch

Welzow

Anhang 3.1: Signifikante Unterschiede der Sickerwassermengen in dem Lysimeterversuch Welzow über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		s.	n. s.
3x30 BKS15	s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.	

Anhang 3.2: Signifikante Unterschiede der Sickerwassermengen in dem Lysimeterversuch Welzow für die drei Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	Periode I		MIN	Periode II		MIN	Periode III	
		3x30 BKS15	90 BKS15		3x30 BKS15	90 BKS15		3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	s.
3x30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.	

Anhang 3.3: Signifikante Unterschiede im pH-Wert des Sickerwassers in dem Lysimeterversuch Welzow über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		s.	s.
3x30 BKS15	s.		n. s.
90 BKS15	s.	n. s.	

Anhang 3.4: Signifikante Unterschiede im pH-Wert des Sickerwassers in dem Lysimeterversuch Welzow für die drei Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	Periode I		MIN	Periode II		MIN	Periode III	
		3x30 BKS15	90 BKS15		3x30 BKS15	90 BKS15		3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	s.		s.	s.		n. s.	n. s.
3x30 BKS15	n. s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	s.	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.	

Anhang 3.5: Signifikante Unterschiede der elektrischen Leitfähigkeit in dem Lysimeterversuch Welzow über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		s.	n. s.
3x30 BKS15	s.		s.
90 BKS15	n. s.	s.	

Anhang 3.6: Signifikante Unterschiede der elektrischen Leitfähigkeit in dem Lysimeterversuch Welzow für die drei Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		s.	n. s.		s.	n. s.		s.	n. s.
3x30 BKS15	s.		n. s.	s.		s.	s.		s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	s.	

Anhang 3.7: Signifikante Unterschiede der  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte in dem Lysimeterversuch Welzow über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		s.	n. s.
3x30 BKS15	s.		s.
90 BKS15	n. s.	s.	

Anhang 3.8: Signifikante Unterschiede der  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte in dem Lysimeterversuch Welzow für die drei Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		(s.) <sup>1)</sup>	n. s.		s.	n. s.		n. s.	n. s.
3x30 BKS15	(s.) <sup>1)</sup>		(s.) <sup>1)</sup>	s.		s.	n. s.		s.
90 BKS15	n. s.	(s.) <sup>1)</sup>		n. s.	s.		n. s.	s.	

<sup>1)</sup> Es liegt ein signifikanter Unterschied in dieser Periode vor, der allerdings im paarweisen Vergleich durch die Fehlerkorrektur nicht belegt werden kann.

Anhang 3.9: Signifikante Unterschiede der TOC-Gehalte in dem Lysimeterversuch Welzow über den Zeitraum der Periode I und II (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	s.
3x30 BKS15	n. s.		s.
90 BKS15	s.	s.	

Anhang 3.10: Signifikante Unterschiede der TOC-Gehalte in dem Lysimeterversuch Welzow für die Periode I und II (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II <sup>1)</sup>		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	s.
3x30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		s.	s.	

<sup>1)</sup> unvollständig: Analyse erfolgte nur bis Mai 2012

Anhang 3.11: Signifikante Unterschiede der DOC-Gehalte in dem Lysimeterversuch Welzow über den Zeitraum der Periode I und II (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n.s.
3x30 BKS15	n. s.		s.
90 BKS15	s.	s.	

Anhang 3.12: Signifikante Unterschiede der DOC-Gehalte in dem Lysimeterversuch Welzow für die Perioden II und III (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II <sup>1)</sup>		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	s.
3x30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		s.	n. s.	

<sup>1)</sup> unvollständig: Analyse erfolgte nur bis Mai 2012

Anhang 3.13: Signifikante Unterschiede der NPOC(D)-Gehalte in dem Lysimeterversuch Welzow über den Zeitraum der Periode II und III (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	s.
3x30 BKS15	n. s.		s.
90 BKS15	s.	s.	

Anhang 3.14: Signifikante Unterschiede der NPOC(D)-Gehalte in dem Lysimeterversuch Welzow für die Perioden II und III (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	Periode II <sup>1)</sup>		MIN	Periode III	
		3x30 BKS15	90 BKS15		3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	s.
3x30 BKS15	n. s.		s.	n. s.		s.
90 BKS15	n. s.	s.		s.	s.	

<sup>1)</sup> unvollständig: Analyse erfolgte erst ab Juni 2012

Anhang 3.15: Signifikante Unterschiede der  $TN_b$ -Gehalte in dem Lysimeterversuch Welzow über den Zeitraum der Periode I und II (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		s.	n. s.
3x30 BKS15	s.		s.
90 BKS15	n. s.	s.	

Anhang 3.16: Signifikante Unterschiede der  $TN_b$ -Gehalte in dem Lysimeterversuch Welzow für die Perioden I und II (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II <sup>1)</sup>		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		(s.) <sup>2)</sup>	n. s.		s.	n. s.
3x30 BKS15	(s.) <sup>2)</sup>		(s.) <sup>2)</sup>	s.		s.
90 BKS15	n. s.	(s.) <sup>2)</sup>		n. s.	s.	

<sup>1)</sup> unvollständig: Analyse erfolgte nur bis Mai 2012.

<sup>2)</sup> Es liegt ein signifikanter Unterschied in dieser Periode vor, der allerdings im paarweisen Vergleich durch die Fehlerkorrektur nicht belegt werden kann.

Anhang 3.17: Signifikante Unterschiede der  $DN_b$ -Gehalte in dem Lysimeterversuch Welzow über den Zeitraum der Periode II und III (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		s.	n. s.
3x30 BKS15	s.		s.
90 BKS15	n. s.	s.	

Anhang 3.18: Signifikante Unterschiede der  $DN_b$ -Gehalte in dem Lysimeterversuch Welzow für die Perioden II und III (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode II			Periode III <sup>1)</sup>		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		s.	n. s.		n. s.	n. s.
3x30 BKS15	s.		s.	n. s.		s.
90 BKS15	n. s.	s.		n. s.	s.	

<sup>1)</sup> unvollständig: Analyse erfolgte erst ab Juni 2012



Anhang 3.19: Signifikante Unterschiede der o-PO<sub>4</sub>-Gehalte in dem Lysimeterversuch Welzow über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.
3x30 BKS15	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.	

Anhang 3.20: Signifikante Unterschiede der o-PO<sub>4</sub>-Gehalte in dem Lysimeterversuch Welzow für die drei Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		(s.) <sup>1)</sup>	n. s.		n. s.	n. s.
3x30 BKS15	n. s.		s.	(s.) <sup>1)</sup>		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	

<sup>1)</sup> Es liegt ein signifikanter Unterschied in dieser Periode vor, der allerdings im paarweisen Vergleich durch die Fehlerkorrektur nicht belegt werden kann.

Anhang 3.21: Signifikante Unterschiede der K-Gehalte in dem Lysimeterversuch Welzow über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	s.
3x30 BKS15	n. s.		s.
90 BKS15	s.	s.	

Anhang 3.22: Signifikante Unterschiede der K-Gehalte in dem Lysimeterversuch Welzow für die drei Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.
3x30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		s.
90 BKS15	s.	n. s.		s.	s.		n. s.	s.	

Braunerde-Podsol

Anhang 3.23: Signifikante Unterschiede der Sickerwassermengen in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.
3x30 BKS15	n. s.		s.
90 BKS15	n. s.	s.	

Anhang 3.24: Signifikante Unterschiede der Sickerwassermengen in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol für die drei Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
3x30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.	

Anhang 3.25: Signifikante Unterschiede im pH-Wert des Sickerwassers in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.
3x30 BKS15	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.	

Anhang 3.26: Signifikante Unterschiede im pH-Wert des Sickerwassers in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol für die drei Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	s.
3x30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.	

Anhang 3.27: Signifikante Unterschiede der elektrischen Leitfähigkeit in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	s.
3x30 BKS15	n. s.		s.
90 BKS15	s.	s.	

Anhang 3.28: Signifikante Unterschiede der elektrischen Leitfähigkeit in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol für die drei Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
3x30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.	

Anhang 3.29: Signifikante Unterschiede der  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		s.	s.
3x30 BKS15	s.		s.
90 BKS15	s.	s.	

Anhang 3.30: Signifikante Unterschiede der  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol für die drei Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	s.		n. s.	s.
3x30 BKS15	n. s.		s.	n. s.		s.	n. s.		s.
90 BKS15	n. s.	s.		s.	s.		s.	s.	

<sup>1)</sup> Es liegt ein signifikanter Unterschied in dieser Periode vor, der allerdings im paarweisen Vergleich durch die Fehlerkorrektur nicht belegt werden kann.

Anhang 3.31: Signifikante Unterschiede der NPOC(T)-Gehalte in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol über den Zeitraum der Perioden I und II (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	s.
3x30 BKS15	n. s.		n. s.
90 BKS15	s.	n. s.	

Anhang 3.32: Signifikante Unterschiede der NPOC(T) -Gehalte in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol für die Perioden I und II (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II <sup>1)</sup>		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		s.	s.		n. s.	s.
3x30 BKS15	s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	s.	n. s.		s.	n. s.	

<sup>1)</sup> unvollständig: Analyse erfolgte nur bis Mai 2012.

Anhang 3.33: Signifikante Unterschiede der NPOC(D)-Gehalte in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	s.
3x30 BKS15	n. s.		s.
90 BKS15	s.	s.	

Anhang 3.34: Signifikante Unterschiede der NPOC(D)-Gehalte in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol für die drei Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		s.	s.		n. s.	s.		n. s.	n. s.
3x30 BKS15	s.		n. s.	n. s.		s.	n. s.		s.
90 BKS15	s.	n. s.		s.	s.		n. s.	s.	

Anhang 3.35: Signifikante Unterschiede der  $TN_b$ -Gehalte in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol über den Zeitraum der Perioden I und II (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	s.
3x30 BKS15	n. s.		s.
90 BKS15	s.	s.	

Anhang 3.36: Signifikante Unterschiede der  $TN_b$ -Gehalte in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol für die Perioden I und II (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II <sup>1)</sup>		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	s.		n. s.	n. s.
3x30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		(s.) <sup>2)</sup>
90 BKS15	s.	n. s.		n. s.	(s.) <sup>2)</sup>	

<sup>1)</sup> unvollständig: Analyse erfolgte nur bis Mai 2012.

<sup>2)</sup> Es liegt ein signifikanter Unterschied in dieser Periode vor, der allerdings im paarweisen Vergleich durch die Fehlerkorrektur nicht belegt werden kann.

Anhang 3.37: Signifikante Unterschiede der  $DN_b$ -Gehalte in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	s.
3x30 BKS15	n. s.		s.
90 BKS15	s.	s.	

Anhang 3.38: Signifikante Unterschiede der  $DN_b$ -Gehalte in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol für die drei Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	s.		n. s.	s.		n. s.	s.
3x30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.
90 BKS15	s.	n. s.		s.	n. s.		s.	s.	

Anhang 3.39: Signifikante Unterschiede der o-PO<sub>4</sub>-Gehalte in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.
3x30 BKS15	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.	

Anhang 3.40: Signifikante Unterschiede der o-PO<sub>4</sub>-Gehalte in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol für die drei Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.
3x30 BKS15	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.
90 BKS15	n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.	

Anhang 3.41: Signifikante Unterschiede der K-Gehalte in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol über den gesamten Versuchszeitraum (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		s.	s.
3x30 BKS15	s.		s.
90 BKS15	s.	s.	

Anhang 3.42: Signifikante Unterschiede der K-Gehalte in dem Lysimeterversuch Braunerde-Podsol für die drei Perioden (Friedmann-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Periode I			Periode II			Periode III		
	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15	MIN	3x30 BKS15	90 BKS15
MIN		s.	s.		n. s.	s.		n. s.	s.
3x30 BKS15	s.		n. s.	n. s.		n. s.	n. s.		s.
90 BKS15	s.	n. s.		s.	n. s.		s.	s.	