

Deponie Chrüzlen

Monitoring und Emissionsprognose des Trockenschlackenkompartiments



Impressum

Stiftung ZAR

Die Stiftung bezweckt die Förderung einer nachhaltigen Stoffpolitik im Rahmen der Behandlung und Verwertung von Abfällen. Sie fördert die Weiterentwicklung des Standes der Technik und unterstützt die entsprechenden Entwicklungsaktivitäten. Die Stiftung kann auch die Verwertung der Erkenntnisse unterstützen.

Stiftung Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung

Wildbachstrasse 2

CH - 8340 Hinwil

Tel + 41 44 938 31 11

Fax + 41 44 938 31 08

E-mail info@zar-ch.ch

www.zar-ch.ch

Diese Publikation ZAR-Schriftenreihe wird von der Stiftung ZAR kostenlos abgegeben. Der Weiterverkauf oder eine wie auch immer geartete kommerzielle Nutzung sind daher nicht zulässig.

PDF-Download auf www.zar-ch.ch. Nachdruck oder elektronische Wiedergabe von Text und Bild ausschliesslich mit Quellenangaben gestattet.

Projektleitung

Dr. Gisela Weibel, Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung (ZAR), Hinwil

Projektbegleitung

Daniel Böni, Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung (ZAR), Hinwil

Fabian Di Lorenzo, Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung (ZAR), Hinwil

Dr. Urs Eggenberger, Fachstelle für Sekundärrohstoffe, Institut für Geologie, Bern

Emmanuel Hess, Wiedag AG

Autoren des Berichts

Dr. Gisela Weibel

Erhältliche Publikationen der ZAR-Schriftenreihe

N°	Titel	Autor	Jahr
001	Industrielle Schlackenaufbereitung – Status und Ziele	D. Böni	2020
002	Deponie Chrüzlen – Monitoring und Emissionsprognose des Trockenschlackenkompartmentes	G. Weibel	2020

Zusammenfassung

Innerhalb von drei Jahren wurden auf dem Trockenschlackenkompartiment der Deponie Chrüzlen in Oetwil am See (Wiedag AG) ca. 120'000 t Schlacke A der ZAV Recycling AG abgelagert. Die Schlacke A besteht aus den beiden aufbereiteten Schlackenfraktionen 0.3–2 mm und 2–12 mm und entspricht ca. 60% der gesamten Restschlacke. Die Schlacke B, eine Mischung aus dem Schlackenstaub <0.3 mm und der magnetischen Schlacke 0.3–12 mm, wird auf dem Schlackenkompartiment anderer Deponien abgelagert. Seit Oktober 2018 betreibt die Stiftung ZAR ein Online-Monitoring auf dem Spezialkompartiment Chrüzlen. Die ersten Erkenntnisse zum Ablagerungsverhalten von Trockenschlacke sind in diesem Bericht zusammengefasst.

Im Gegensatz zu nass ausgetragener Schlacke besitzt die Trockenschlacke der ZAV Recycling AG, bedingt durch den Aufbereitungsprozess, eine höhere Reaktionsfähigkeit und eine grössere spezifische Oberfläche. Die aufbereitete Feinschlacke 0.3–2 mm hat einen Anteil von ca. 25% an der Schlacke A und die Konzentration von Chlorid und TOC ist doppelt so hoch verglichen zur Grobschlacke. Insgesamt resultiert für die Schlacke A im Durchschnitt eine TOC Konzentration von 0.6%.

Eine Rammkernbohrung sowie Laborversuche zeigen, dass das Einbaupotential für Trockenschlacke auf dem Spezialkompartiment nicht ausgeschöpft ist. Eine zusätzliche Bewässerung während dem Einbau und die gemeinsame Ablagerung der gesamten Restschlacke (Schlacke A und B) der ZAV Recycling AG würde die Einbaudichte erhöhen. Mit dem Schlackenstaub wird eine erhöhte Einbaudichte und Stabilität des Kompartiments erreicht. Die im Zuge der Bohrung verbaute Temperatursensoren erlauben seit Oktober 2018 die Verfolgung der Temperaturentwicklung auf unterschiedlichen Höhen des Kompartiments. Dabei ist ein Temperaturgradient erkennbar von 90°C einige Meter unter der Oberfläche bis hin zu ca. 40°C nahe der Deponiebasis. Im letzten Jahr wurde über das gesamte Tiefenprofil eine Temperaturabnahme von 18% gemessen.

Die Emissionen der Schlacke A via Gas- und Sickerwasserpfad liegen in typischen Bereichen wie man dies von Schlackendeponien in den Anfangsjahren her kennt. Das flächen- und zeit aufgelöste Ammoniakmonitoring der Umgebungsluft im nahen Umfeld des Kompartiments zeigt, dass neben der Trockenschlacke auch Pferdestallungen als Ammoniakquellen auftreten. Die Konzentrationen im Zentrum des Kompartiments überschreiten 15 ppm Ammoniak sehr selten und es gibt bezüglich der Ammoniakkonzentration in der Umgebung der Deponie insgesamt keine gesundheitlichen Bedenken.

Die ermittelten Transferkoeffizienten der im Sickerwasser analysierten Stoffe zeigen, dass sich 99.7% des TOC und mehr als 99.9% der Schwermetalle aktuell noch im Deponiekörper befinden. Einzig beim Chlor kann bereits ein relevanter Austrag beobachtet werden, hier wurde innerhalb von 3 Jahren bereits ca. 14% des in der Schlacke vorhandenen Chlors über das Sickerwasser mobilisiert. Durch den Austrag von gelösten Stickstoffverbindungen wurde bisher ca. 6% der gesamten Stickstoffmenge mobilisiert. Durchschnittlich werden 35% des infiltrierten Niederschlags als Sickerwasser ausgetragen und die DOC-Konzentrationen im Sickerwasser entwickeln sich seit 2016 von sehr hohen Jahresmittelwerten von ± 600 mg/l hin zu

Werten von durchschnittlich 180 mg/l im Jahr 2019. Auch für die Konzentrationswerte von Ammonium, Nitrit und Kupfer ist bereits ein abnehmender Trend erkennbar. Bis auf das Kupfer, welches durch die Komplexbildung mit DOC in erhöhten Mengen aus dem Trockenschlackenkompartiment ausgetragen wird, werden die Einleitgrenzwerte in die öffentliche Kanalisation für alle Schadstoffe eingehalten. Aufgrund der tiefen Grenzwerte und die initial hohen Konzentrationen sind vor allem die Stickstoffverbindungen Ammonium und Nitrat sowie der DOC im Sickerwasser entscheidend für die Nachsorgedauer des Trockenschlackenkompartiments. Für eine Gefährdungsabschätzung wird zusätzlich zum Ist-Zustand der Deponie auch die Erstellung einer Prognose über die Entwicklung der Emissionen verlangt. Aus diesem Grund wurden zusätzlich zum Deponiemonitoring Batch- und Säulentests bis zu einem Flüssig/Feststoff-Verhältnis von 10 durchgeführt. Dabei wurde bei allen Versuchen während der ganzen Testdauer keine signifikante Veränderung von pH-Wert, Temperatur und Redoxbedingungen festgestellt. Bei den in den Säulentests vorhandenen, stark alkalischen Bedingungen und einer homogenen Durchströmung der Schlacke resultiert eine DOC-Konzentration im Sickerwasser von <20 mg/l nach ca. einem Viertel der Versuchsdauer (L/S 2.4). Nach Versuchsende sind ca. 45% des in der Schlacke A vorhandenen Chlorids mobilisiert, wogegen der mobilisierbare Anteil von TOC in Form von DOC auf 5% begrenzt ist. Bei den Stickstoffkomponenten sind am Testende ca. 10% des gesamten Stickstoffs als Ammonium mobilisiert und ca. 0.6% in Form von Nitrat. Die Metallfreisetzung erfolgt, mit Ausnahme des amphoteren Aluminiums, bei den vorherrschenden alkalischen Bedingungen der Labortests auf einem sehr tiefen Niveau. Die Auswirkungen veränderter Freisetzungsmechanismen durch das fortschreitende Alter des Kompartiments konnten mit den durchgeführten Säulentests nicht aufgezeigt werden. Für eine Gefährdungsbetrachtung sollte deshalb eine Langzeitprognose unter Berücksichtigung veränderter Bedingungen durchgeführt werden. Dabei sind die Einflüsse von Temperatur, pH-Wert, Redoxbedingungen, Sorption und biologischer Aktivität mit reaktiven Transportmodellen zu untersuchen.

Um möglichst realistische Prognosen zum Langzeitverhalten von Trockenschlacke zu entwickeln, müssen längere Zeitreihen von Deponiedaten ausgewertet werden. Da für die Trockenschlacke diese Zeitreihen noch fehlen, sollten die Resultate dieser Studie mit langjährigen Zeitreihen von Nassschlackendeponien verglichen werden. In einem weiteren Projekt ist geplant, Prognosemodelle für die Abschätzung der Langzeitemissionen von Schlackendeponien zu entwickeln, welche dann als Grundlage für die Erstellung von Gefährdungsabschätzungen dienen. Nebst Studien zum Ablagerungsverhalten von Trockenschlacke gilt es die Qualitätsverbesserung der Restschlacken voranzutreiben. Erste Versuche die Trockenschlacke auf einer Bodenwaschanlage zu behandeln waren vielversprechend und die Emissionen wurden deutlich reduziert. Tiefere Schadstoffkonzentrationen führen zu einem schnelleren Erreichen der Einleitbarkeit in Oberflächengewässer und eröffnen Möglichkeiten für eine Verwertung der Restschlacken und somit der Schonung von Primärressourcen und Deponieraum.

Inhalt

1.	Einleitung.....	5
1.1.	Hintergrund.....	5
1.2.	Ziele und Vorgehen.....	6
2.	Trockenschlackenkompartiment	7
2.1.	Aufbau und Mengestatistik	7
3.	Auswertung der aktuellen Monitoringdaten	9
3.1.	Charakterisierung der Schlacke A vor der Ablagerung	9
3.2.	Charakterisierung der Schlacke A nach der Ablagerung	11
3.3.	Chemische Reaktionen und Temperatur im Deponiekörper	17
3.4.	Deponiegas.....	19
3.5.	Sickerwasserqualität	24
3.6.	Sickerwassermengen	28
4.	Emissionsprognose.....	33
4.1.	Abschätzungen der Mobilisierung anhand von Laborversuchen.....	33
4.2.	Abschätzungen der Mobilisierung anhand von Monitoringdaten.....	36
5.	Fazit und Ausblick	41
6.	Literatur.....	43
7.	Anhang.....	44
7.1.	Methodik	44
7.2.	Resultate Säulentests nach DIN CEN/TS 14405.....	47
7.3.	Anwohnerprotokolle Geruchsbelästigung.....	51

1. Einleitung

1.1. Hintergrund

Nachdem in den letzten Jahren die Forschung und Entwicklung hauptsächlich darauf gerichtet war möglichst viele Metalle aus der KVA-Schlacke wieder in den Kreislauf zu bringen, wird heute auch der Behandlung und Nachsorge der abgelagerten Restschlacke eine grosse Bedeutung beigemessen. In der Schweiz fallen jährlich ca. 800'000 t Schlacke an, wobei nach der Metallabtrennung noch ca. 85% Restschlacke deponiert werden muss. Gemäss der Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (VVEA) darf Schlacke aus der Verbrennung von Siedlungsabfällen auf Deponien abgelagert werden, wenn sie den Anteil an partikulären Nicht-Eisenmetallen (NE-Metalle) vom 1% nicht überschreitet und höchstens 2% TOC enthält [1]. Um die Verbesserung der Schlackenqualität voranzutreiben, hat das AWEL Zürich den TOC als zielführenden Indikator für die Güte des Ausbrands definiert und bis 2020 einen Zielwert von 0.5% TOC für Zürcher Schlacken festgelegt [2]. Diese Massnahme soll zu einer Verbesserung der Sickerwasserqualität führen (DOC <20 mg/l). Neben der Optimierung der Betriebsparameter gilt es in Labor- und Pilotversuchen Aufbereitungs- oder Behandlungsverfahren zu entwickeln, welche zu möglichst emissionsarmen Restschlacken führen.

Die VVEA enthält Vorgaben zur Nachsorge von Deponien und schreibt die Überwachung der Anlagen, des Grund- und Abwassers sowie der Deponiegase vor [1]. Um zu gewährleisten, dass dauerhaft keine schädlichen oder lästigen Einwirkungen von einer abgeschlossenen Deponie auf die Umwelt ausgehen, müssen in den kommenden Jahren für alle Schlackendeponien Gefährdungsabschätzungen durchgeführt werden [3]. Die Beurteilung des Ist-Zustands einer Deponie und eine detaillierte Emissionsprognose dienen als Grundlage für die Durchführung einer Gefährdungsabschätzung. Mit dieser Beurteilungsgrundlage kann die Behörde überprüfen bis wann noch schädliche oder lästige Einwirkungen auf die Umwelt zu erwarten sind.

Nebst konventionell ausgetragener Nassschlacke wird in den letzten Jahren in der Schweiz vermehrt auch trocken ausgetragene Schlacke aufbereitet und deponiert. Die ZAV Recycling AG in Hinwil verarbeitet Trockenschlacke der Anlagen Satom Monthey, KEBAG Zuchwil, KVA Horgen, KVA Hagenholz und KEZO Hinwil. Nach der Metallabtrennung wird der mineralische Anteil dieser Trockenschlacken zurzeit in zwei Schlackenqualitäten aufgetrennt und separat abgelagert. Die Schlacke A besteht aus den beiden aufbereiteten Schlackenfraktionen 0.3–2 mm und 2–12 mm, welche auf dem Trockenschlackenkompartiment der Deponie Chrüzlen in Oetwil am See abgelagert wird. Die Schlacke A entspricht ca. 60% der gesamten Restschlacke mit einem durchschnittlichen Mischverhältnis von 75% Grobschlacke 2–12 mm und 25% Feinschlacke 0.3–2 mm. Die Schlacke B entspricht ca. 40% der gesamten Restschlacke und beinhaltet den Schlackenstaub <0.3 mm (25%) und die magnetischen Schlacke 0.3–12 mm (75%), welche auf dem Schlackenkompartiment anderer Deponien abgelagert wird.

Die separate Ablagerung der Schlacke A auf der Deponie Chrüzlen erlaubt die detaillierte Betrachtung des Ablagerungsverhaltens. Eine zentrale Grundlage für die Durchführung einer Gefährdungsabschätzung ist die Beurteilung des Ist-Zustands der Deponie basierend auf Untersuchungen des Sickerwassers, des Deponiegases sowie der Emissionen im Umfeld der

Deponie. Aus diesem Grund wurde im Oktober 2018 mit einem umfassenden Monitoring des Trockenschlackenkompartiments gestartet. Für die Beurteilung der Nachsorgedauer einer Deponie sind zudem Trendanalysen zu den Schadstoffemissionen notwendig, welche anhand von Laborversuchen (Batch- und Säulentests) und physikalisch-chemischen Modellen erstellt werden sollten.

1.2. Ziele und Vorgehen

Ziel des vorliegenden Berichts ist die Auswertung und Interpretation der Monitoringdaten, welche innerhalb eines Jahres seit Oktober 2018 auf dem Trockenschlackenkompartiment Chrüzlen gesammelt wurden. In den Stellungnahmen zu den Jahresberichten 2017 und 2018 der Wiedag AG ersuchte das AWEL um die Übermittlung der Resultate aus dem Deponie-monitoring. Die Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Durchführung einer Gefährdungsabschätzung, welche massgeblich auf den Emissionsdaten (Sickerwasser, Deponiegas) aufbaut. Weiter dienen die Daten als Basis für Projekte der Stiftung ZAR zur Verbesserung der Schlackenqualität und Planung von zukünftigen Deponieprojekten zur Ablagerung von Trockenschlacke.

Grundlage für ein Deponie-monitoring über mehrere Jahre ist der Einsatz von Instrumenten für einen robusten Betrieb mit automatisierter Überwachung und Datenübermittlung. Die Deponieüberwachung wird in Zusammenarbeit mit Meteotest AG durchgeführt. Der Gesamtaufwand für die Installationen betrug CHF 35'000.– mit jährlichen Betriebskosten von ca. CHF 2'000.–.

Folgende Messgrössen werden durch das Monitoring erfasst:

- **Meteorologische Daten:** Die lokalen Daten wie Niederschlag, Lufttemperatur und -feuchte, Windrichtung und -geschwindigkeit werden im Zusammenhang mit anderen Messgrössen (Sickerwassermengen, Gasemissionen, Temperaturentwicklung) für die Erstellung der Wasser- und Stoffbilanz der Deponie erfasst.
- **Sickerwasser:** Die Leitfähigkeit und die Sickerwassermenge des Trockenschlackenkompartiments werden in einem Sammelschacht separat von den übrigen Sickerwässern der Deponie online überwacht. Seit September 2017 wird zudem monatlich das Sickerwasser beprobt und analysiert. Der Wasserhaushalt der Deponie während den Einbauarbeiten (offenes System 2016–2020) und nach der Abdichtung des Kompartiments (geschlossenes System ab 2021) wird durch die Auswertung der Niederschlags- und der Abflussmengen untersucht. Für die Frachtberechnungen werden die chemischen Analysen mit den Abflussmengen ausgewertet, was Aussagen zur Gefährdung der Einleitung von Sickerwässern in die umgebenden Oberflächengewässer erlaubt.
- **Deponiekörper:** Um die Entwicklung der Temperatur im Kompartiment zu verfolgen, wurden auf sieben unterschiedlichen Horizonten Temperatursensoren verbaut. Die für den Verbau der Sensoren benötigte Rammkernsondierung liefert Material, welches wertvolle Hinweise zum Ablagerungsverhalten und der Verdichtung der Schlacke A in verschiedenen Abschnitten des Kompartiments gibt. Zusätzlich wird über normierte Laborversuche und jährliche Drohnenaussmessungen des Deponievolumens die Verdichtung des Materials geprüft.

- **Deponiegas:** Zwischen 2016 und 2018 wurden die Gasemissionen der Trockenschlacke mittels Passivsammler überwacht. Seit Oktober 2018 liefert zusätzlich ein elektrochemischer Sensor im Zentrum des Kompartiments zeitaufgelöste Daten. Diese kontinuierliche Messung erlaubt es Rückschlüsse zu ziehen, wie sich der Einbau der Schlacke und die Wetterlage auf die Gasemissionen auswirken. Eine Protokollführung durch Anwohner zum Zeitpunkt der Geruchsbelästigung ergänzen das Konzept.

2. Trockenschlackenkompartiment

2.1. Aufbau und Mengenstatistik

Seit Oktober 2016 wird die Schlacke A der ZAV Recycling AG auf einem Spezialkompartiment der Deponie Chrüzlen in Oetwil am See (Wiedag AG) abgelagert. Die Planung und Umsetzung des Trockenschlackenkompartiments erfolgten zwischen Sommer 2014 und 2016 und die Eckdaten sind in Tabelle 1 aufgelisteten.

Tabelle 1: Eckdaten des Trockenschlackenkompartiments Chrüzlen.

Basisdrainage	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unverschmutzter Sand/Kies/Split (50 cm) ▪ Bituminöser Dichtungsbelag (10–15 cm) ▪ Sand (5 cm) ▪ Rundgeröll (50 cm, bei Sickerwasserleitung 1 m) ▪ Aufbereitete Schlacke 2–12 mm (1 m) an Basis als Filterschicht
Seitenabdichtung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Folienabdichtung gegen Inert-Kompartiment ▪ Aufbereiteter Schlacke 2–12 mm (ca. 1 m) auf beiden Seiten als Filterschicht
Leitungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zwei Leitungen (SL5 Sickerwasserleitung und Kontrollleitung unterhalb Abdichtung)
Schacht	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schacht 1 m versetzt zu Sickerwasserleitung (wurde anfangs 2019 zugeschüttet)
Grundfläche	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2'133 m²
Volumen*	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 113'402 m³ (ohne Filterschicht)

Für die Berechnung der Wasserbilanz ist eine möglichst genaue Bestimmung der offenen Kompartimentsfläche, welche zum Sickerwasserschacht des Trockenschlackenkompartiments entwässert, wichtig. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Kompartiment V-förmig angelegt ist und westlich im Kontakt zum alten Schlackenkompartiment keine Folienabdichtung angelegt wurde (Abbildung 1). Es wird deshalb davon ausgegangen, dass der dort infiltrierende Niederschlag nicht in das Trockenschlackenkompartiment versickert. Hingegen wurde östlich im Kontakt zum Inertkompartiment eine Folienabdichtung angelegt und es wird angenommen, dass auf dieser Seite der gesamte Niederschlag in Richtung Trockenschlackenkompartiment entwässert.

Unter Einbezug der Entwässerungswege wurde eine offene Fläche von 4'500 m² berechnet. Seit Oktober 2016 werden pro Jahr ca. 40'000 t Schlacke A mit einem Wassergehalt von 6.4% in das Trockenschlackenkompartiment eingebaut (Tabelle 2). Daraus resultiert eine bisher abgelagerte Menge von ca. 120'000 Tonnen Schlacke A bei einer mittleren Mächtigkeit von ca. 24 m. Hochrechnungen zeigen, dass das Kompartiment Mitte des Jahres 2020 aufgefüllt sein wird.

Tabelle 2. Jahresstatistik der Schlackeanlieferung und Drohnenvermessung des Kompartiments sowie aktuell angelieferte Menge Schlacke A von Januar bis September 2019.

Schlacke A		Jahresstatistik			Jan–Sept.	Total
Was	Einheit	2016	2017	2018	2019	
Anlieferung (Statistik ZAV RE)	t	7'222	39'718	43'448	32'453	122'841
Einbau (Drohnenvermessung)	m ³	3'875	27'149	27'416	-	-
Mächtigkeit	m	2	10	10	2	24

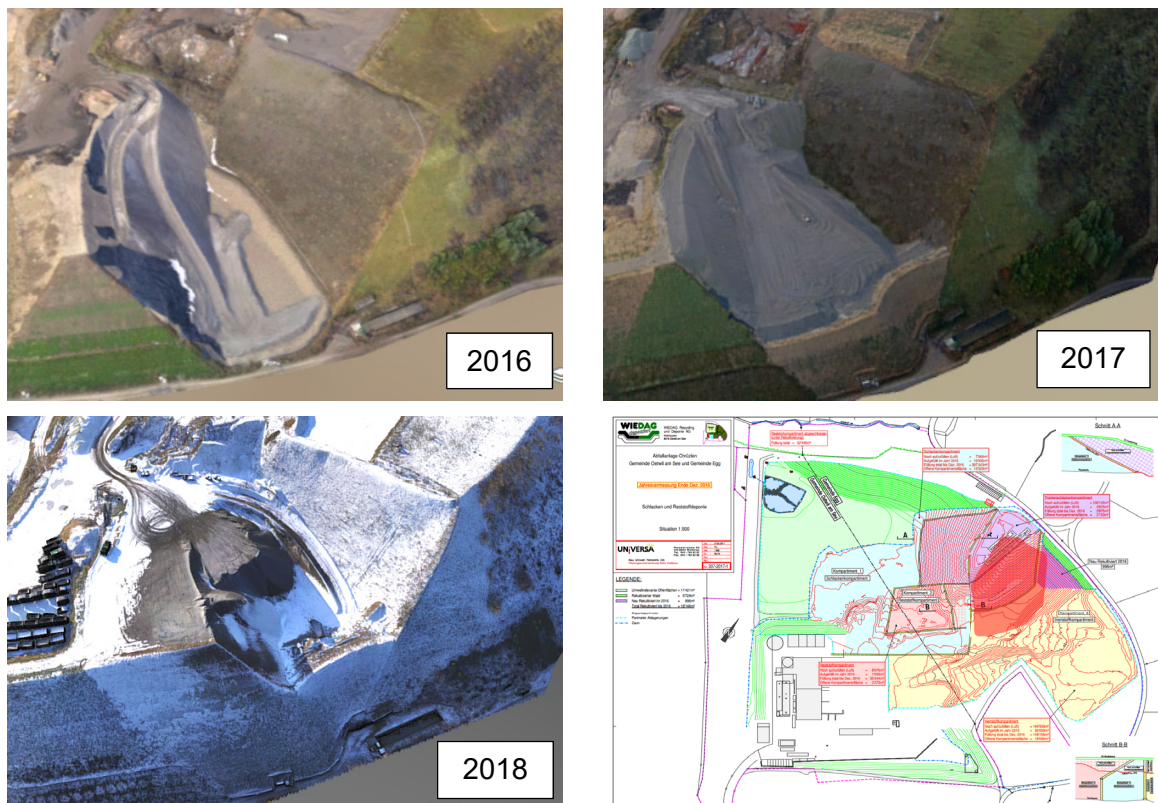


Abbildung 1: Entwicklung des Trockenschlackenkompartiments von Oktober 2016 bis Dezember 2018 und projizierten, offenen Kompartimentsfläche in rot.

3. Auswertung der aktuellen Monitoringdaten

3.1. Charakterisierung der Schlacke A vor der Ablagerung

3.1.1. Chemisch-mineralogische Charakterisierung

Der Wassergehalt der Restschlacke ist ein wichtiger Parameter für den Transport und Einbau in das Kompartiment. Um einen staubarmen Transport zu gewährleisten wurde der Schlacke A im ersten Halbjahr 2019 6.4% Wasser beim Verlad zugegeben. Drei Mal jährlich werden die vier Restschlackenfraktionen der ZAV Recycling AG aufwändig ab Band für das Schlackenmonitoring beprobt und analysiert (Material ohne zusätzliches Wasser). Da die Fraktionen der Schlacke A dabei separat beprobt und analysiert werden, sind in diesem Bericht die Resultate der einzelnen Fraktionen dargestellt, ergänzt mit der anteilmässig berechneten Schlacke A.

Die Hauptbestandteile der aufbereiteten Schlacke 2–12 mm sind SiO₂ (50%) und CaO (20%) (Abbildung 2). Die Hälfte daraus resultiert aus erstarrten Schmelzen und Glas (amorphe Anteile der Schlacke) und die andere Hälfte aus kristallinen Phasen, welche entweder Durchläufer sind oder während dem Verbrennungsprozess neu gebildet werden. Als kristalline Phase überwiegt die Gruppe von Quarz und Melilith (Ca-Mg-Al-Silikate). Melilith entstehen während der Verbrennung bei Temperaturen >800°C durch die Reaktion zwischen CaO, Al₂O₃ und SiO₂ [4]. Weitere Matrixelemente der Schlacke 2–12 mm sind Na₂O, MgO, SO₃, TiO₂ und K₂O (1–5%). Die aufbereitete Schlacke 0.3–2 mm hat einen Anteil von 23–28% an der Schlacke A und weist höhere Schadstoffkonzentrationen auf im Vergleich zur gröberen Fraktion 2–12 mm. Nebst höheren Konzentrationen von CaO, TiO₂ und SO₃, sind die Konzentration an Chlorid und TOC in der Feinschlacke doppelt so hoch verglichen zur Grob- schlacke. Hingegen sind die Konzentrationen von SiO₂, NaO in der Feinschlacke tiefer.

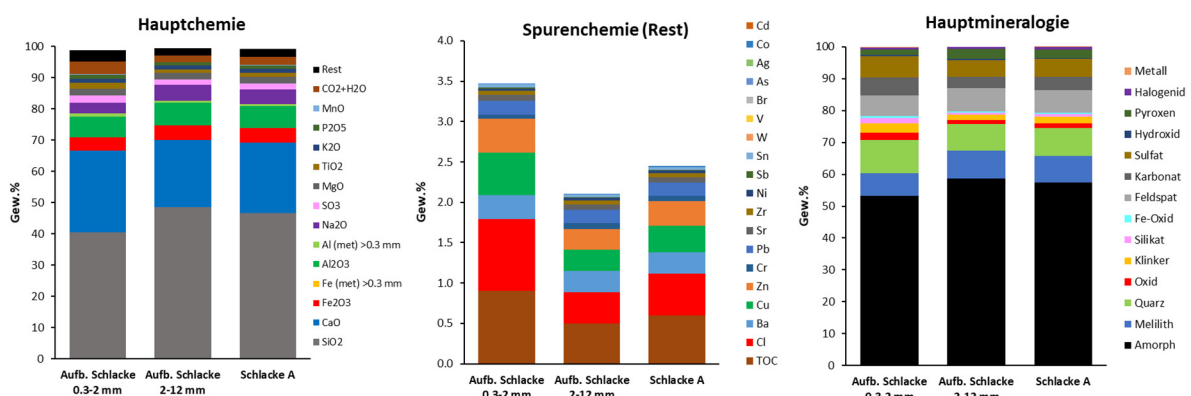


Abbildung 2: Haupt- und Spurenchemie sowie Hauptmineralogie der aufb. Schlacke 0.3–2 mm und 2–12 mm und der anteilmässig verrechneten Schlacke A.

Bei den Metallen überwiegt in beiden Schlackenfraktionen der Anteil an Aluminium und Eisen (Abbildung 2). Dabei gilt es zu unterscheiden ob die Metalle gebunden als Oxide in der Schmelzmatrix oder in partikulärer, metallischer Form vorliegen und somit für die mechanische Metallrückgewinnung grundsätzlich verfügbar sind. Bei der chemischen Analyse mit

XRF oder Säureaufschluss wird die gesamte Menge eines Elements erfasst und nur zusätzlich durch händische Separation kann der Anteil an partikulären Restmetallen bis zu einer Untergrenze von 0.3 mm bestimmt werden. Die Auswertung der verschiedenen Analysen zeigt, dass der grösste Teil des Aluminiums in den aufbereiteten Schlackenfraktionen gebunden in der Schmelzmatrix vorliegt (ca. 7% Al₂O₃) und noch 0.5–1% in partikulärer, metallischer Form vorliegt (Abbildung 2). Beim Eisen liegen ca. 4.5% in oxidischer und 0.1% in partikulärer, metallischer Form vor. Die Bestimmung der partikulären NE-Metalle >0.3 mm zeigt, dass in beiden Fraktionen noch ca. 0.9% als NE-Metalle vorliegen. Der VVEA-Grenzwert für den NE-Metallgehalt für die Ablagerung von Schlacke liegt bei 1% in der Fraktion 2–16 mm [1]. Bei beiden Fraktionen der Schlacke A sind diese Anforderungen deutlich unterschritten, selbst wenn sich die Bestimmung auf das gesamte Korngrössenspektrum >0.3 mm bezieht.

Drei Mal pro Jahr werden für das Schlackenmonitoring der ZAV Recycling AG die einzelnen Fraktionen beprobt und analysiert (Tabelle 3). Der Trend der höheren Schadstoffbelastung der Feinfraktion 0.3–2 mm zeigt sich auch hier deutlich. Hinsichtlich der angestrebten Qualitätsverbesserung von Schlacken für den Kanton Zürich ist vor allem die Konzentration von TOC wichtig. Die Feinfraktion der Schlacke A zeigt einen doppelt so hohen TOC Gehalt (0.96%) im Vergleich zur Grobfraktion (0.47%), wobei die Gehalte relativ geringe Schwankungen aufweisen (RSD 26%, resp. 15%). Da in der Schlacke A die Fraktion 2–12 mm mengenmässig dominiert, wird für die Gesamtschlacke A eine TOC Konzentration von 0.6%, was im Bereich des vom AWEL Zürich definierten Zielwerts von 0.5% TOC bis 2020 liegt. Wird die gesamte Restschlacke der ZAV Recycling AG betrachtet, liegt der TOC-Gehalt bei 0.5%.

Tabelle 3: Auswahl relevanter chemischer Parameter der aufb. Schlacke 0.3–2 mm, auf. Schlacke 2–12 mm sowie der Schlacke A (75% Grobschlacke 2–12 mm, 25% Feinschlacke 0.3–2 mm). Die Daten entsprechen dem Mittelwert der Resultate aus dem Schlackenmonitoring der ZAV Recycling AG von 2016–2019 (5 Probenahmen), ausser für Silber und Gold welche nur einmal analysiert wurden. Die relative Standardabweichung (RSD) zeigt die Schwankungsbreite jedes einzelnen Elements auf.

Parameter	Einheit	Aufbereitete Schlacke 0.3–2 mm		Aufbereitete Schlacke 2–12 mm		Schlacke A
		Mittelwert	RSD (%)	Mittelwert	RSD (%)	Mittelwert
Trockensubstanz (105°C)	%	99.9	0.0	100.2	1.0	100.1
Glührückstand (550°C)	%	96.6	1.0	98.5	1.0	98.0
FE-Metall >0.3 mm	%	0.0012	–	0.009	–	–
NE-Metall >0.3 mm	%	0.90	–	0.87	–	–
TC	%	1.72	11	0.87	21	1.06
TIC	%	0.74	10	0.40	35	0.48
TOC	%	0.96	26	0.47	15	0.59
N	%	0.07	39	0.03	34	0.04
Silber	mg/kg	14.2	–	13.1	–	13
Aluminium	mg/kg	49'850	9	45'089	10	46'279
Arsen	mg/kg	22	7	28	8	27
Gold	mg/kg	0.4	–	2.0	–	1.6
Kadmium	mg/kg	7.6	58	3.4	87	4.5
Chrom	mg/kg	354	26	545	23	497
Kupfer	mg/kg	6'036	11	4'379	26	4'793
Eisen	mg/kg	24'135	12	35'916	42	32'971
Nickel	mg/kg	170	16	209	35	199
Phosphor	mg/kg	5'306	9	3'990	12	4'319
Blei	mg/kg	2'026	43	1'500	32	1'632
Schwefel	mg/kg	6'470	55	3'767	72	4'443
Antimon	mg/kg	143	9	99	12	110
Silizium	mg/kg	204'679	7	234'396	6	226'967
Zink	mg/kg	4'537	25	3'282	50	3'596

3.1.2. Korngrößenverteilung

Die Schlacke A zeigt eine relativ homogene Korngrößenverteilung im Bereich 0.3–12 mm (Abbildung 1). Die aufbereitete Schlacke 2–12 mm enthält 6% Anteil welcher <2 mm ist. Dieser Feinanteil wird beim Transport und dem Siebprozess aufgrund von mechanischem Abrieb gebildet. Wird die Grobfraction über längere Zeit gelagert vergrößert sich der Feinanteil der Schlacke durch die Reaktion mit der Umgebungsluft. Ob es sich dabei um eine Disaggregation des TOC handelt muss noch weiter untersucht werden. Da die Schlacke A während des Einbaus stark verdichtet wird, verringert sich die Korngrösse des deponierten Materials bereits zu Beginn der Ablagerung stark.

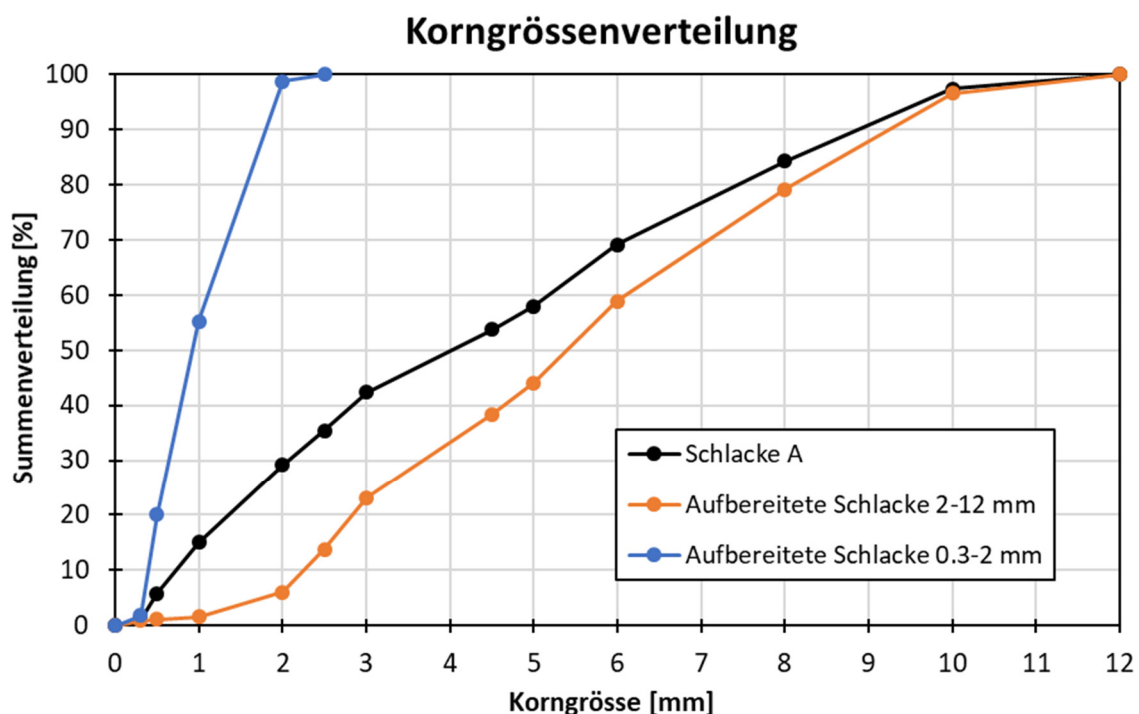


Abbildung 3: Summenverteilung der Korngrößenanalyse der aufb. Schlacke 0.3–2 mm und 2–12 mm und der anteilmässig verrechneten Schlacke A.

3.2. Charakterisierung der Schlacke A nach der Ablagerung

3.2.1. Morphologie

Am 7. August 2018 wurde eine Dreh-Rammkernsondierung (DRKS) von 16 m Länge und 15 cm Durchmesser auf dem Trockenschlackenkompartiment durchgeführt (bis 4 m über Deponiebasis). Bei der Entnahme hatte das Material eine Temperatur von 85°C. Der Bohrkern wurden bis zur Auswertung am 12. Oktober 2018 bei 5°C unter Luftabschluss verpackt gelagert. Die Auswertung des Kerns liefert wertvolle Hinweise zum Ablagerungsverhalten und der Verdichtung der Schlacke A in verschiedenen Abschnitten des Kompartiments. Zwei unterschiedliche Horizonttypen sind dabei deutlich zu erkennen; (1) hellgraue, pulvrige Abschnitte

und (2) dunklere Abschnitte, welche mehrheitlich als kompakte Segmente geborgen werden konnten (Tabelle 4).

Tabelle 4: Beschreibung, Schüttdichte (auf TS), Einbaudichte (auf TS) und Wassergehalt (%) der einzelnen Bohrkernabschnitte: (1) hellgraue, pulvrige Schichten (weiss), (2) dunklere, kompaktere Schichten (grau).

Depo- niahöhe (m)	Ablagerungs- zeitpunkt	Beschreibung	Schütt- dichte (t/m ³)	Einbau- dichte (t/m ³)	Wasser- gehalt (%)
19–20	Aug. 2018	dunkelgrau, körnig	–	–	8.4
18–19		hellgrau, feinkörnig	1.00	–	5.5
17–18		Mischkern, hellgrau, feinkörnig	0.99	–	4.9
16–17	April 2018	fein, pulvrig	1.22	–	2.9
13–16		Mischkern, fein, pulvrig	1.24	–	1.4
12–13		Übergang von losem Material zu "Bohrkern"	0.98	–	6.4
11.5–12		Fester "Bohrkern"	–	1.50	8.1
11–11.5		fester "Bohrkern"	–	–	8.2
10–11		körnig, pulvrig	0.92	–	6.3
9–10	Dez. 2017	fein, pulvrig	1.08	–	3.7
8.65–9		fein	1.11	–	3.4
8–8.65		fester "Bohrkern"	–	1.89	9.1
7–8		dunkel, fest	–	1.83	9.0
6.5–7		dunkel, fest	–	1.61	9.8
6–6.5		hell, pulvrig	1.11	–	8.2
5–6	Juli 2017	Hell, pulvrig	1.02	–	6.6
4–5		Hell, pulvrig	1.13	–	4.7
Mittelwert		Trockenere Abschnitte	1.07	–	4.9
Mittelwert		Feuchtere Abschnitte	–	1.72	8.8



Bohrkern 18–19 m: Hellgrauer, pulvriger Abschnitt.



Bohrkern 11–12 m: Mehrheitlich fester Bohrkern.



Bohrkern 8–9 m: Übergang pulvriges Material zu festem Bohrkern.



Bohrkern 6–7 m: Dunkles, festes Material.



Segment 6.5–7 m: Dunkles, festes Material.



Bohrkern: 4–5 m: Helles, pulvriges Material.

Abbildung 4: Auswahl von unterschiedlichen Bohrkernabschnitten der abgelagerten Schlacke A aus dem Trockenschlackenkompartiment Chrüzlen.

3.2.2. Wassergehalt und Einbaudichte

Die Schlacke A wird mit einem Wassergehalt von 6.4% bei der ZAV Recycling AG verladen und zur Deponie Chrüzlen transportiert. Während dem Transport und dem anschliessenden Kippen trocknet die Schlacke ab. Bis zum definitiven Einbau ist das Material der Umgebung ausgesetzt und trocknet je nach Jahreszeit weiter ab oder nimmt in niederschlagsreichen Zeiten Wasser auf. Die Auswertung des Bohrkerns zeigt, dass unterschiedliche Abschnitte mit variierenden Wassergehalten vorhanden sind. Die dunklen, kompakten Bohrkernabschnitte weisen einen höheren Wassergehalt auf (ca. 9%) verglichen zu den hellgrauen, pulvrigen Abschnitten (ca. 5%) (Tabelle 4). Die Auswertung ganzer Segmente dieser dunklen, kompakten Abschnitte resultiert in einer Einbaudichte von 1.72 t/m³ gerechnet auf die Trockensubstanz. Bei den hellgrauen, pulvrigen Abschnitten konnte nur die Schüttdichte ermittelt werden, welche sich bei durchschnittlich 1.07 t/m³ bewegt. Obwohl die Bohrkernabschnitte zeitlich grob dem Einbau zugeordnet werden konnten, sind die feuchteren Abschnitte nicht eindeutig niederschlagsreicheren Perioden zuzuordnen. Verdichtungstests, welche während der Bohrung durchgeführt wurden (Standard-Penetrations-Test, SPT), zeigen, dass auf 12 m Höhe das Material deutlich dichter gelagert ist als in den übrigen Horizonten (Tabelle 5).

Diese Beobachtung deckt sich mit der Bohrkernaufnahme, wo in diesem Abschnitt dunkles, kompaktes Material entnommen wurde.

Tabelle 5: Verdichtungstest (Standard-Penetration-Tests) auf bestimmten Abschnitten (Deponiehöhen) des Trockenschlackenkompartiments Chrüzlen.

Deponiehöhe	N 0–15	N 15–30	N 30–45	N30 N15–30+N30–45
	Anzahl Schläge für 15 cm	Anzahl Schläge für 15 cm	Anzahl Schläge für 15 cm	
16	16	8	6	14
12	28	14	12	26
8	10	9	6	15
4	9	8	6	14

Basierend auf der Statistik der jährlich angelieferten Schlackenmenge und dem ermittelten Volumen der Drohnausmessung der Wiedag ergibt sich eine mittlere Einbaudichte (gerechnet auf die Trockensubstanz) von 1.46 t/m³ seit Beginn der Ablagerung (Abbildung 5). Die jährlich berechneten Einbaudichten schwanken allerdings stark: 1.75 t/m³ (2016), 1.37 t/m³ (2017) sowie 1.48 t/m³ (2018). Ergänzend lassen sich Einbaudichten mit Proctorversuchen im Labor ermitteln. Von der gesamten Schlacke A gibt es aktuell keinen Proctorversuch, jedoch lassen sich Erkenntnisse aus Versuchen von der aufbereiteten Schlacke 2–12 mm (Grobanteil Schlacke A) und der gesamten Restschlacke der ZAV Recycling AG schliessen [5]. Die Proctorversuche wurden mit unterschiedlichen Wassergehalt durchgeführt und ergeben beim Einsatz von 10% Wasser (ähnlich den dunklen, kompakten Segmente aus dem Bohrkern) auf die Trockensubstanz gerechnete Einbaudichten von 1.53 t/m³ für die Grobschlacke, respektive 1.79 t/m³ für die gesamte Restschlacke (Abbildung 5).

Die Betrachtung der verschiedenen Ansätze macht deutlich, dass der Wassergehalt und die Einbaudichte des Materials in einem direkten Zusammenhang stehen. Je mehr Wasser zur Verfügung steht, desto dichter kann die Schlacke gepackt werden [5]. Zudem werden die höchsten Einbaudichten erreicht, wenn man eine ideale Kornverteilung von ganz fein bis grob hat, wie das bei der gesamten Restschlacke der Fall ist. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass das Potential der Einbaudichte auf dem Trockenschlackenkompartiment Chrüzlen nicht vollständig ausgeschöpft ist. Die zusätzliche Bewässerung während dem Einbau und die Beimischung von Feinanteil (Schlackenstaub) würde in deutlich höheren Einbaudichten resultieren.

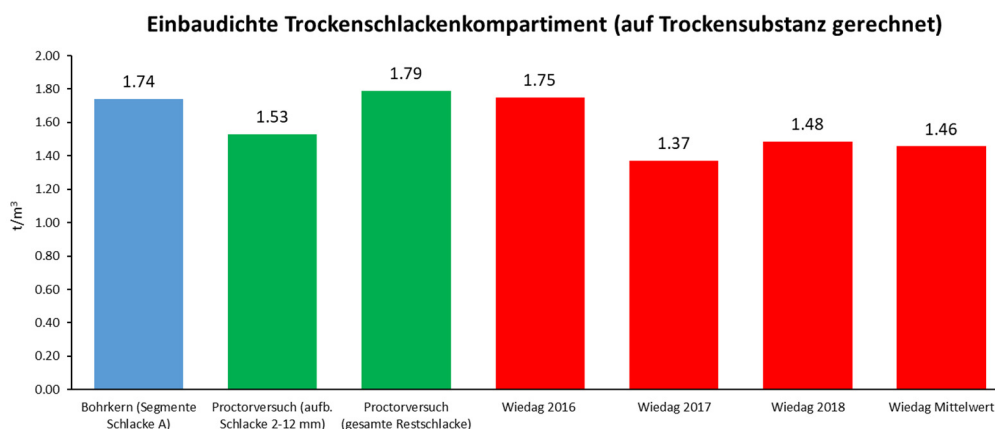


Abbildung 5: Einbaudichten der Schlacke A (ausser Proctorversuche mit leicht anderer Zusammensetzung), ermittelt mit unterschiedlichen Ansätzen und gerechnet auf die Trockensubstanz.

3.2.3. Korngrößenverteilung

Die Schlacke A aus dem Bohrkern zeigt über das gesamte 16 m Profil eine ähnliche Korngrößenverteilung, mit einer deutlichen Verschiebung hin zu kleineren Korngrößen verglichen zur Schlacke A welche im Zuge des Schlackenmonitorings der ZAV-Recycling AG direkt ab Band beprobt wurde (Abbildung 6). Vor der Ablagerung sind >70% der Schlacke A in einer Korngrösse >2 mm vorhanden, wogegen beim verdichteten Material nur noch 40–45% >2 mm vorliegend sind. Durch den Einbau mittels Bulldozer und der Interaktion mit der Atmosphäre werden die Grobanteile der Restschlacke mechanisch und chemisch zerkleinert. In der Fraktion >2 mm bleiben nach 1–2 Jahren Ablagerung vor allem noch kompetente Glas- und Keramikteilchen übrig.

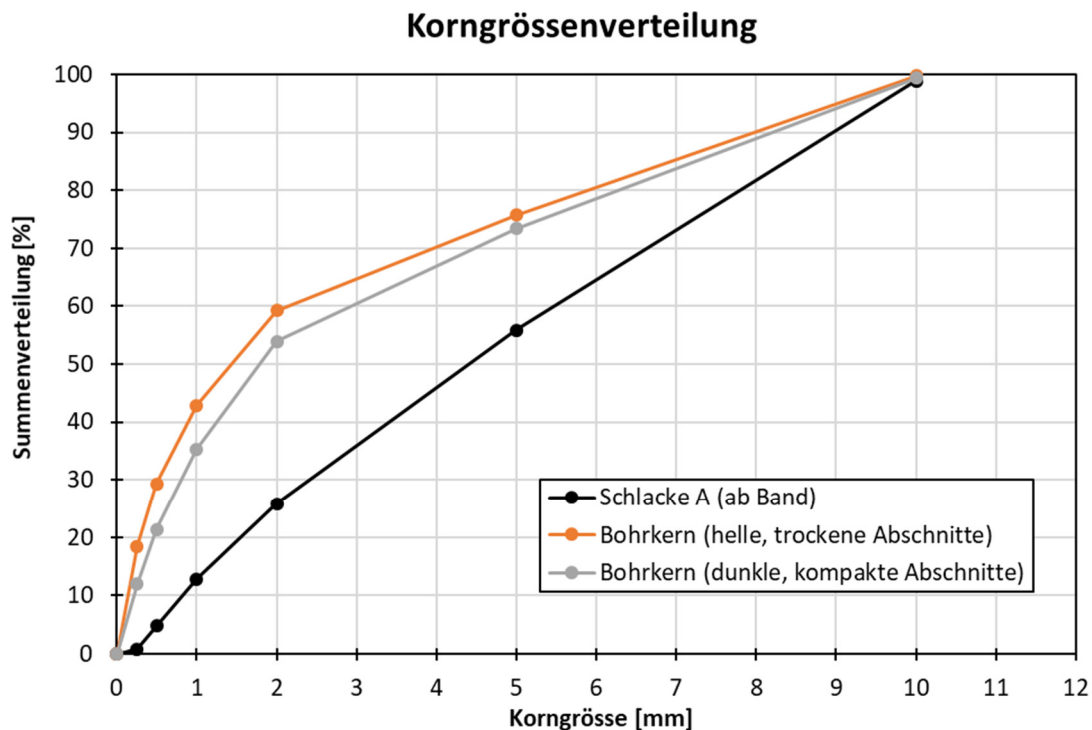


Abbildung 6: Korngrößenverteilung der Schlacke A und des abgelagerten Materials aus dem Bohrkern der Deponie Chrüzlen.

3.2.4. Chemisch-mineralogische Zusammensetzung

Korrelationsplots über die gesamte Tiefe der Bohrung zeigen keine deutlichen Zusammenhänge zwischen dem Auftreten gewisser chemischer Elemente und der Ablagerungsdauer, respektive der Temperatur des Materials. Hingegen ist ein chemischer Unterschied im Bereich der feuchteren und kompakteren Abschnitte im Vergleich zum eher trockeneren Material erkennbar (graue Abschnitte in Abbildung 8). Diese wasserreicheren Abschnitte zeigen tendenziell erhöhtes SiO_2 und Na_2O , wogegen in diesen Bereichen CaO , TiO_2 , Cl und Zn in tieferer Konzentration vorliegen.

Die Entstehung der kompakteren Abschnitte im Deponieprofil muss mit einer erhöhten Wassermenge beim Einbau der Schlacke im Zusammenhang stehen und weniger mit einer unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung. Teilweise wird bei Kapazitätsproblemen der

Silos bei der ZAV Recycling AG auch magnetisch Schlacke nach Chrüzlen gebracht. Um die Entstehung der kompakten Schichten mit der Ablagerung von magnetischer Schlacke zu erklären, müsste sich die chemische Zusammensetzung (v.a. Eisen) jedoch deutlich von den übrigen Abschnitten des Bohrkerns unterscheiden.

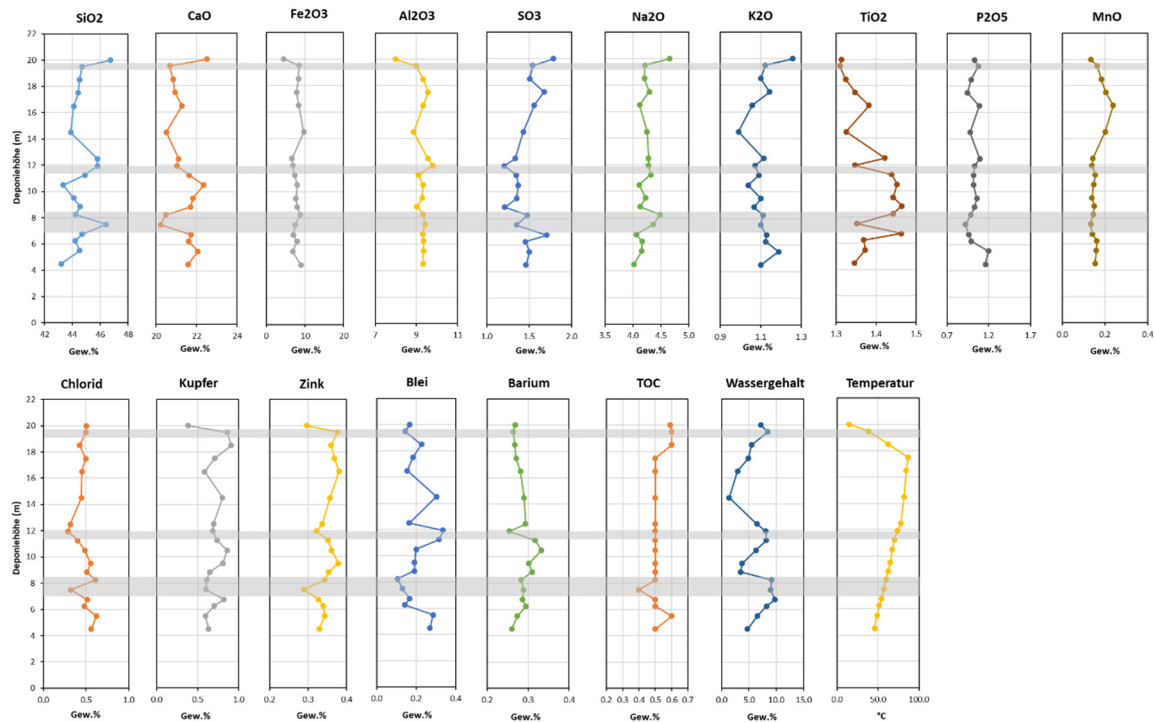


Abbildung 7: Haupt- und Spurenelemente der abgelagerten Schlacke auf unterschiedlichen Höhen des Trockenschlackenkompartiments Chrüzlen. In grau sind die feuchteren, kompakteren Abschnitte gekennzeichnet.

Nebst der Hauptchemie wurde auch die Hauptmineralogie an allen Bohrkernproben bestimmt. Die auftretenden kristallinen Phasen über den ganzen Bohrkern gesehen unterscheiden sich nicht signifikant von der Schlacke A vor der Ablagerung (Abbildung 8). Auffällig beim abgelagerten Material ist die leicht erhöhte Konzentration von Klinkerphasen (2.7%) wie Alit (Ca_3SiO_5) und Belit (Ca_2SiO_4) verglichen zur frischen Schlacke A (1.9%). Diese Zementphasen führen zu einer Verfestigung des Materials und somit zur Stabilisierung des Kompartiments. Der Schlackenstaub weist mit 6% signifikante Mengen solcher Klinkerphasen auf und würde beim Beimischen zur Schlacke A einerseits die Einbaudichte vergrößern und aufgrund der Zementeigenschaften zu einer zusätzlichen Stabilisierung führen. Entgegen den Vermutungen ist keine Zunahme von Karbonaten, Sulfaten und Hydroxiden in der abgelagerten Schlacke A erkennbar. Die Kalzitkonzentration ist sogar in den Bohrkernproben tiefer, währenddessen Sulfate und Hydroxide gar nicht detektiert wurden. Über das ganze Bohrprofil wurden insgesamt kaum signifikante Veränderungen der Hauptmineralogie festgestellt. Für die Feststellung von Feststoffveränderungen braucht es eine längere Ablagerungsdauer mit fortgeschrittenen Alterationsprozessen.

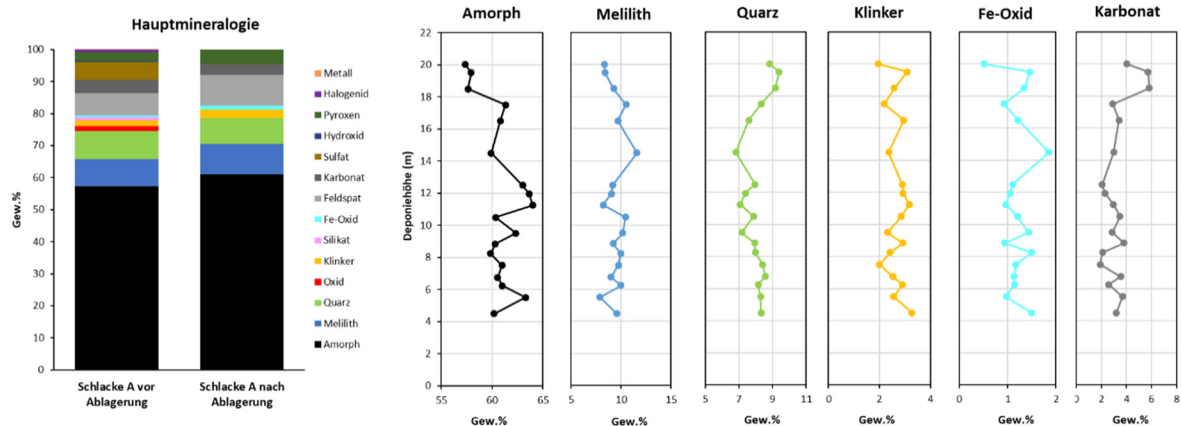


Abbildung 8: Hauptmineralogie der Schlacke A vor und nach der Ablagerung (links) sowie ausgewählte Phasen im Tiefenprofil (rechts).

3.3. Chemische Reaktionen und Temperatur im Deponiekörper

In das Bohrloch wurden Sensoren zur Überwachung der Temperatur im Deponiekörper eingebaut. Ein vorbereitetes Geotextil mit verbauten Sensoren wurde nach dem Rückziehen des Bohrgestänges in das Bohrloch gelassen. Bis zu einer Tiefe von 4 m ab Deponiebasis wurden alle 3–4 m zwei redundante Sensoren verbaut (Abbildung 9). Das Niveau des Trockenschlackenkompartiments lag beim Einbau der Sensoren auf 20 m. Die beiden Sensoren auf 22 m befanden sich bis im November 2018 noch oberhalb der Deponie und zeigten deshalb in den ersten Monaten den atmosphärischen Tagesverlauf bevor die Temperatur mit zunehmender Einbautiefe kontinuierlich zunahm. Die Sensoren auf 30 m sind aktuell noch immer außerhalb des Kompartiments und sind stark von den Aussentemperaturen beeinflusst. Bereits einige Meter unter der Oberfläche wurden kurz nach dem Einbau Temperaturen gegen 90°C gemessen, mit einer konstanten Abnahme auf aktuell 38°C nahe der Deponiebasis. Im letzten Jahr wurde über das gesamte Tiefenprofil eine Temperaturabnahme von 18% beobachtet (Abbildung 9). Erhöhte Temperaturen in Schlackenkörpern sind ein bekanntes Phänomen [6]. Nach der Ablagerung der Schlacke stellt sich ein neues thermodynamisches Gleichgewicht ein. Insbesondere metastabile Phasen, die im Ofen gebildet wurden, reagieren mit Sauerstoff und Wasser aus der Luft zu stabileren Verbindungen. Die chemischen und mineralogischen Analysen der Bohrkernproben (Abbildung 7, Abbildung 8) zeigen keine eindeutigen Anzeichen auf ablaufende exotherme Oxidations- und Hydratationsreaktionen. Die Ablagerungsdauer ist zu kurz, um signifikante Alterationsvorgänge im Material festzustellen und eine Bohrkernentnahme müsste in einigen Jahren nochmals wiederholt werden.

Auch wenn im untersuchten Feststoff mit den angewendeten Methoden keine Hinweise auf Materialveränderungen offensichtlich sind, beginnen chemische Reaktionen rasch nach der Ablagerung der Schlacke durch die Interaktion von Wasser. So werden Metalloxide durch Hydratationsreaktionen zu Hydroxiden umgewandelt und durch dessen Lösung entsteht das alkalische Sickerwasser (Tabelle 6). Das alkalische Sickerwasser wiederum kann beim Kontakt mit amorphen Phasen zu Mineralneubildungen führen (u.a. Kalziumaluminiumsilikathydrate). Mit zunehmender Ablagerungsdauer reagiert Kohlendioxid aus der Luft oder aus dem Abbau organischer Substanzen im Deponiekörper mit dem Kalziumhydroxidreichen Sickerwasser und führt zur Ausfällung von Kalzit (CaCO_3). Weiter kommt es nach der Ablagerung

der Schlacke zur Metallkorrosion von metallischem Eisen und Aluminium welche unter Freisetzung von Wärme ablaufen. Bei der Reaktion von Aluminium mit Wasser zu Aluminiumhydroxid werden grössere Mengen von Wasserstoff freigesetzt. Da die Schlacke in grossen Mächtigkeiten abgelagert wird, staut sich diese Wärme im Schlackenkörper teilweise über Jahre bis Jahrzehnte an.

Da die Charakterisierung der abgelagerten Schlacke über die gesamte Deponiehöhe keine eindeutigen Hinweise auf die oben beschriebenen exothermen Prozesse gibt, sind die initial hohen Temperaturen kurz nach der Bohrung sicherlich auch im Zusammenhang mit der entstandenen Reibungswärme während der Bohrung zu erklären. Aufgrund der intensiven Verdichtung und der Bildung von frischen, reaktiven Oberflächen während der Bohrung kann es zudem zur Beschleunigung von Reaktionen kommen.

Tabelle 6: Chemische Hauptreaktionen in Schlacke nach der Deponierung [7]

Bezeichnung	Reaktionsgleichung	Bemerkungen
Kalziumsulfathydratisierung	$\text{CaSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Anhydrit zu Gips
Kalziumhydratisierung	$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$	Gebранter Kalk zu Portlandit
Karbonatisierung	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	Portlandit zu Kalzit
Silikathydratbildung	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaH}_2\text{SiO}_4$	Bildung von halbkristallinen Kalziumsilikathydraten und Tobermorit
Aluminiumhydratisierung	$\text{Al} + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al(OH)}_3 + 3/2 \text{H}_2$	-
Eisenoxidation/-hydratisierung	$\text{Fe} + 3/4 \text{O}_2 + 3/2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe(OH)}_3$	-

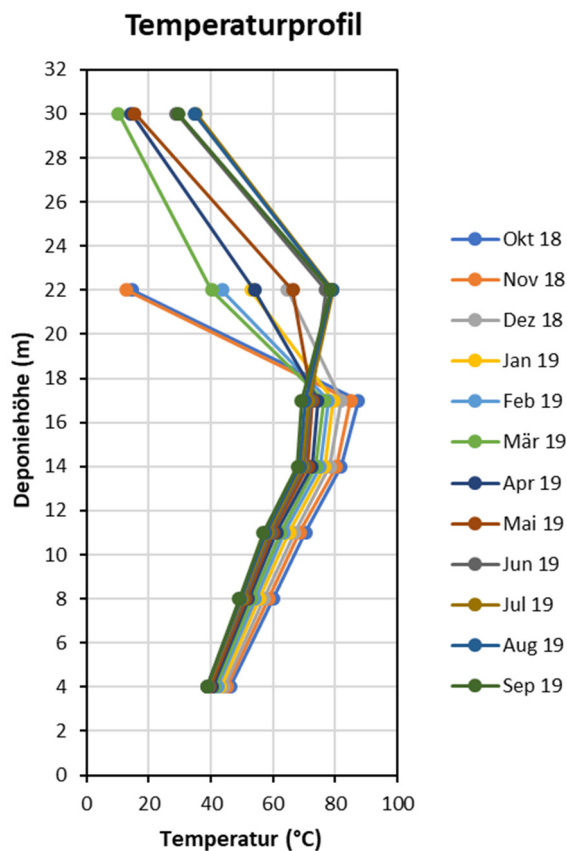


Abbildung 9: Temperaturentwicklung auf unterschiedlichen Horizonten des Trockenschlackenkompartiments zwischen Oktober 2018 und Oktober 2019.

3.4. Deponiegas

Die Zugabe von Wasser beim Verlad der Schlacke A sowie die Interaktion mit meteorischem Wasser nach der Ablagerung führt zum typischen Ammoniakgeruch wie man ihn von Nassschlacke her kennt. Insbesondere während dem Kippen und Umwälzen der Schlacke auf der Deponie ist eine deutliche Geruchsbildung wahrnehmbar. Im Gegensatz zur Ammoniakbildung sind Gefahren durch Wasserstoff auf Schlackendeponien gut untersucht und hauptsächlich bedingt durch Verpuffungen und Explosionen [8]. Ammoniak wirkt stark toxisch (MAK Wert 20 ppm, bzw. 15 mg/m³) und wegen der niedrigen Geruchsschwelle von 2.7 ppm wird er bereits bei unbedenklichen Konzentrationen deutlich wahrgenommen. Verschiedene Faktoren wie die Reaktionsoberfläche, Kinetik, Wasserpermeabilität, pH-Wert, Temperatur und der Metallanteil in der Schlacke beeinflussen die Produktion von Wasserstoff und Ammoniak [8].

Von Januar 2017 bis Dezember 2018 wurde deshalb auf der Deponie mittels Passivsammler die Menge und Ausbreitung der Gasemissionen aufgezeichnet. Mit der Erneuerung und Intensivierung des Deponiemonitorings im September 2018 wurde zusätzlich eine kontinuierliche Ammoniakmessung installiert (DOL 53). Nebst dem Deponiemonitoring laufen seit 2017 diverse Projekte zur Identifikation der Ammoniakquellen und der Bestimmung des Ammoniakemissionspotentials diverser Schlackenfraktionen am Institut für Geologie der Universität Bern und am UMTEC Rapperswil. Die Erkenntnisse dieser Laboruntersuchungen werden in einem separaten Bericht zusammengefasst.

3.4.1. Passivsammler

Die Nullmessungen der Passivsammler auf dem Deponiegelände ergaben NH₃-Hintergrundkonzentrationen von 5–20 µg/m³ was im Bereich der ländlichen Ammoniakbelastung in der Nähe von Ställen und Feldern liegt [9]. Das Monitoring zeigt, dass im Zentrum des Kompartiments (Messstandort 1) die höchsten Ammoniakkonzentrationen mit Spitzenwerten von 600 µg/m³ wurden (Abbildung 10, Abbildung 11).

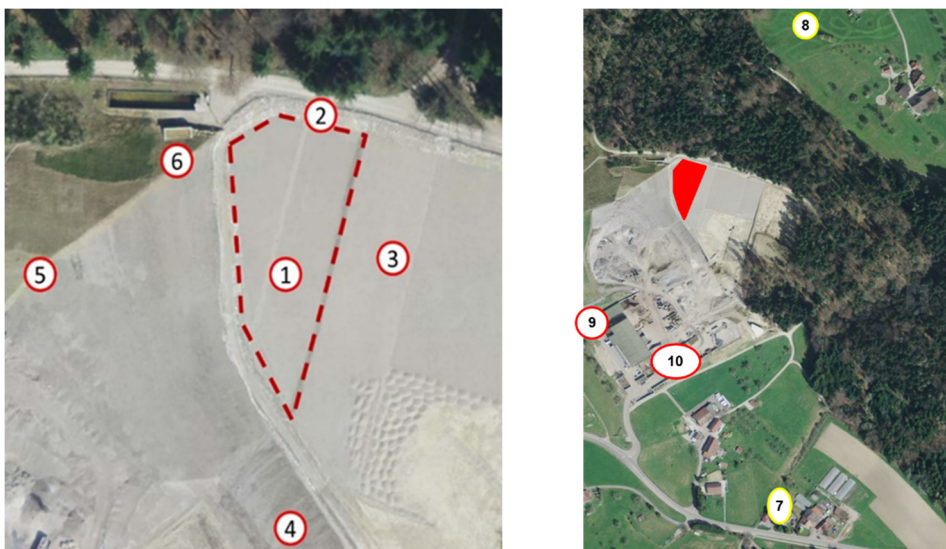


Abbildung 10: Anordnung der Passivsammler für die Erfassung der Ammoniakemissionen in der Umgebung des Trockenschlackenkompartiments.

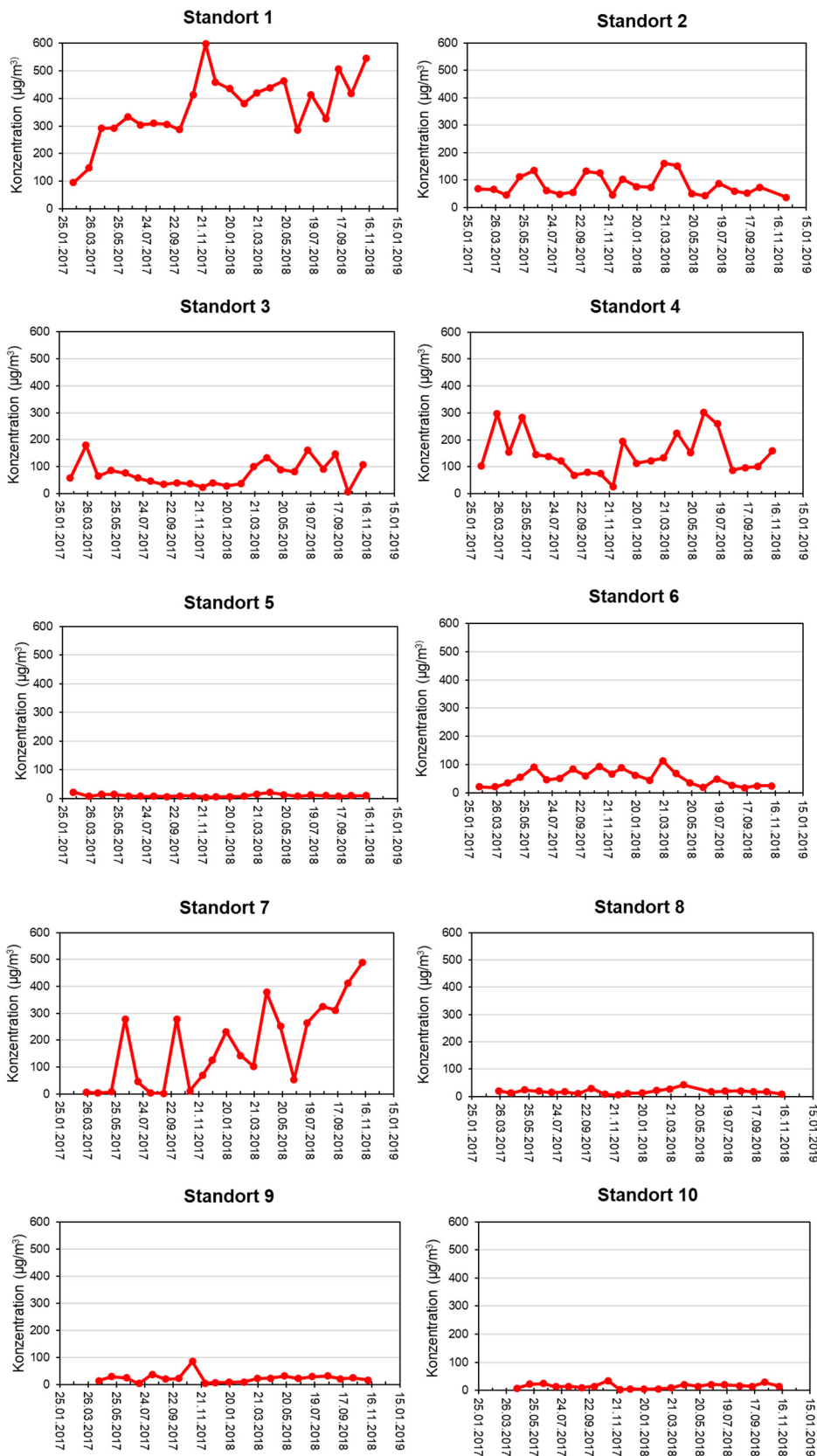


Abbildung 11: Resultate des Ammoniakmonitorings in der Umgebung des Trockenschlackenkompartiments mittels Passivsammler von Januar 2017 bis Dezember 2018.

Bereits am Rand des Kompartiments liegen die Konzentrationen mit Werten $<200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ deutlich tiefer. Messstandort 4 liegt bei der Kippstelle der Schlacke und zeigt deshalb erhöhte Konzentrationen verglichen zu den anderen Messstellen. Die Messstelle 9 und 10 wurden ab dem 18.4.2017 in das Monitoring integriert und zeigen Werte im Bereich der natürlichen Hintergrundkonzentration. Die Messstellen 7 und 8 liefern Konzentrationen in der Umgebung der unmittelbaren Nachbarschaft der Deponie. Während sich die Konzentrationen der Messstelle 8 nicht wesentlich von denjenigen am Rand des Deponiegeländes (9 und 10) unterscheiden ist auffällig, dass Standort 7 je nach Monat Konzentrationen im Bereich von $\geq 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aufweist. Der Verdacht liegt nahe, dass sich zwischen dem Deponiegelände und Standort 7 eine zusätzliche Ammoniakquelle befinden muss. Da in diesem Bereich Pferdestallung angesiedelt sind, wird angenommen, dass der gemessene Ammoniak am Standort 7 von dieser Quelle stammt.

Zur Abschätzung der Ausbreitung des Ammoniaks in der Atmosphäre wurden zusätzlich zum Deponiemonitoring Modellierungen mittels AUSTAL 2000 durchgeführt (Abbildung 12). Für die Ermittlung der Quellenstärke des Ammoniaks dient das im Labor ermittelte Ammoniakbildungspotential der Schlacke A von $36 \text{ g NH}_3/\text{kg}$ ($56 \text{ g NH}_3/\text{m}^3$). Daraus resultiert ein berechnetes Potential von $1'566 \text{ kg NH}_3/\text{Jahr}$, welches im Modell über eine Fläche von $4'500 \text{ m}^2$ freigesetzt wird. Als weiterer Parameter wurden die Winddaten aus dem Deponiemonitoring in das Modell einbezogen. Als Bezugspunkte für das Modell wurden die 10 Messstellen der Passivsammler 1 m über Boden genommen.

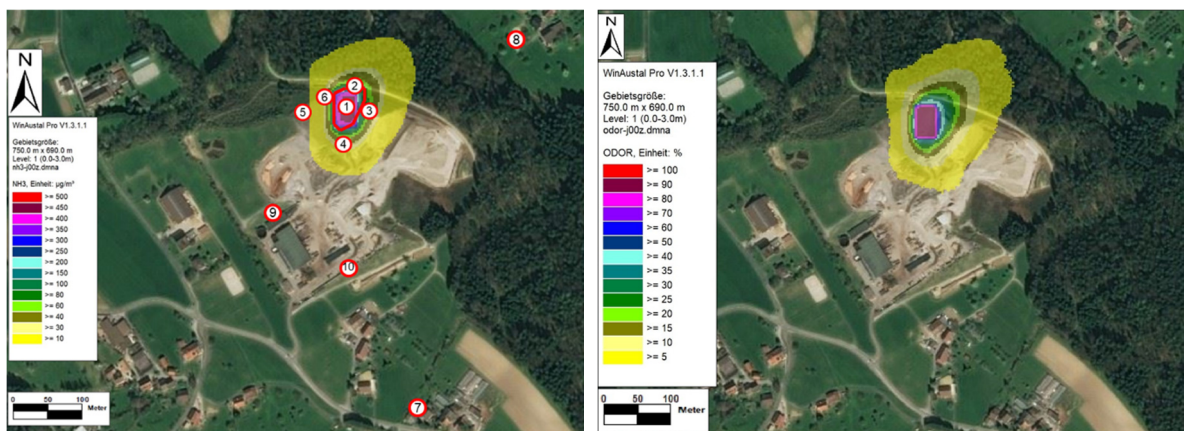


Abbildung 12: Modellierung der Ammoniakemissionen (links) und der Geruchsausbreitung (rechts).

Die modellierten Werte für die Messstandorte 1–6 sind leicht höher als die realen Messwerte aus dem Passivsammlermonitoring (Tabelle 7). Für die Messstelle 4 wurden im Monitoring höhere Werte gemessen als im Modell berechnet, da im Modell der Faktor der Kippstelle nicht berücksichtigt wurde. Für die Messstandorte 7–10 wurden während dem Monitoring höhere Ammoniakkonzentrationen gemessen als die Modellierung ergaben, da die natürliche Hintergrundkonzentration im Modell nicht berücksichtigt wurde ($6\text{--}10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Bei Messstandort 7 waren die gemessenen Ammoniak-Konzentrationen während dem Monitoring rund 600 Mal höher als die modellierte Ammoniakkonzentration. Dies unterstützt die Annahme, dass sich zwischen dem Deponiegelände und Standort 7 eine zusätzliche Ammoniakquelle befinden muss. Da im Bereich des Kompartimentes die Modellierung leicht höhere Werte ergeben als im Passivsammlermonitoring gemessen, wurde ein Korrekturfaktor von 0.85 definiert welcher es erlaubt die Modellierung der Geruchsausbreitung an die realen Bedingungen anzugleichen.

Tabelle 7: Vergleich der Monatsmittelwerte aus dem Passivsammlermonitoring und den modellierten Konzentrationen mit AUSTAL 2000.

Messstandort	Ammoniak Monitoring $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Ammoniak modelliert $\mu\text{g}/\text{m}^3$
1	436	505
2	80	138
3	80	116
4	150	32
5	10	27
6	51	103
7	242	0.4
8	18	1.7
9	18	1.4
10	14	1.6

Die rechts in Abbildung 12 dargestellte Grafik zeigt die Geruchshäufigkeit, das heisst wie oft in einem Gebiet die Geruchsschwelle überschritten ist und der Geruch in einer Höhe von 0–3 m wahrnehmbar ist. Die Gebiete direkt um die Deponie gelegen weisen die höchste Geruchsbelastung auf. Die gelb gefärbte Fläche stellt die Fläche dar, wo der Geruch im Durchschnitt zwischen 5–10% der Zeit wahrnehmbar ist. Das heisst in diesem Gebiet ist der Geruch während rund 1–2.5 h pro Tag wahrnehmbar.

3.4.2. Elektrochemische Messung

Die elektrochemische Messung der Ammoniakemissionen erlaubt ein zeitaufgelöstes Monitoring im Zentrum des Kompartiments (Abbildung 13). Falls nicht gerade neben dem Ammoniaksensor Schlacke umgelagert wird, wie dies am 26.11.2018 der Fall war, bewegen sich die Messwerte im Bereich <15 ppm. Die Geruchsschwelle von Ammoniak liegt bei 2.7 ppm wird deshalb bereits bei gesundheitlich unbedenklichen Konzentrationen deutlich wahrgenommen. Der MAK-Wert liegt mit 20 ppm Ammoniak deutlich höher und folglich gibt es bezüglich der Ammoniakkonzentration in der Umgebung der Deponie keine gesundheitlichen Bedenken.

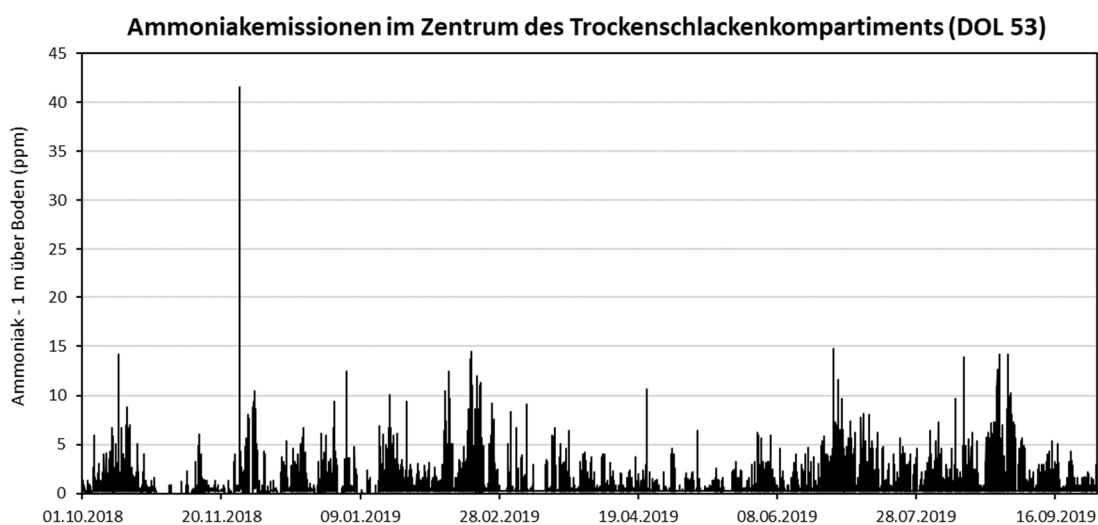


Abbildung 13: Kontinuierlich aufgezeichnete Ammoniakemissionen (ppm) mittels DOL 53 im Zentrum des Trockenschlackenkompartiments (1 m über Boden).

Für den Vergleich der beiden Messtechniken müssen die kontinuierlich aufgezeichneten Daten des elektrochemischen Ammoniaksensors in Monatsmittelwerte umgerechnet werden. Während zweier Monate im Oktober und November 2018 fand das Monitoring parallel statt und die Differenzen der Monatsmittelwerte sind sehr gering (Abbildung 14). Die Abweichungen sind mit den unterschiedlichen Messbereichen zu erklären, während man bei den Passivsammlern mit den gemessenen Konzentrationen am oberen Ende des Messbereiches, respektive teilweise darüber liegt, befindet man sich bei der elektrochemischen Messung im unteren Messbereich.

08.10 – 09.11 2018		Messbereich
417 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Passivsammler	0.5–200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
346 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Elektrochemisch	0–70'000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0–100 ppm)
09.11 – 03.12 2018		
546 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Passivsammler	0.5–200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
584 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Elektrochemisch	0–70'000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0–100 ppm)

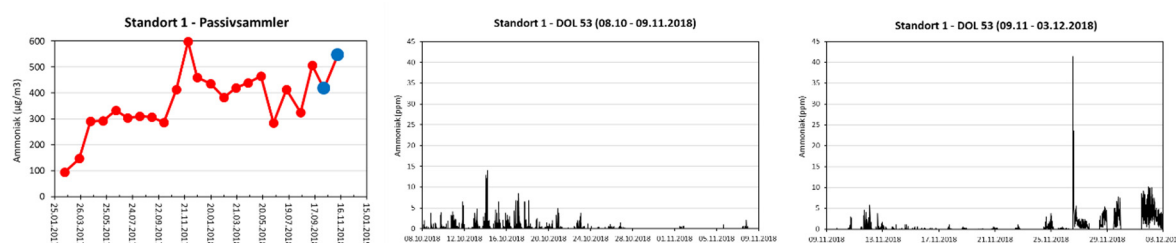


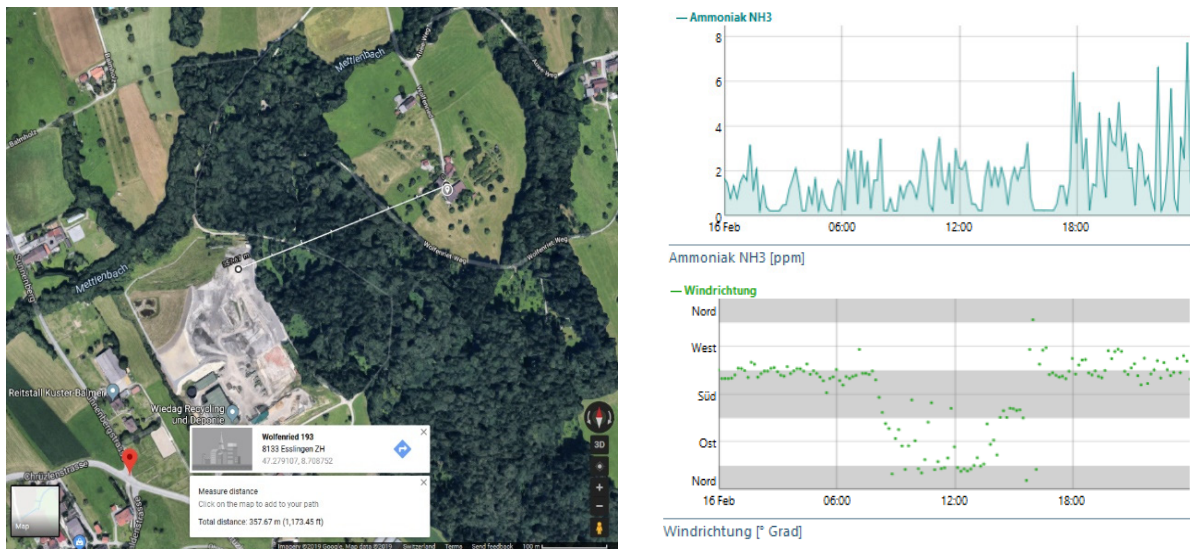
Abbildung 14: Vergleich der Passivsammler und der elektrochemischen Ammoniakmessung während November und Dezember 2018.

3.4.3. Anwohnerprotokolle

Zusätzlich zum Deponiemonitoring wurden die Anwohner rund um die Deponie Chrüzlen beauftragt Geruchsemissionen (Stärke und Art der Emission) zu dokumentieren. Die Protokolle wurden an 40 Parteien ausgehändigt und die drei erhaltenen Protokolle stammen alle aus dem Wiler Wolfenriet Esslingen, welcher sich nordöstlich der Deponie befindet (Abbildung 15). Die gemessene Ammoniakkonzentration auf dem Kompartiment zeigt keine Korrelation zu den erfassten Zeitpunkten der Geruchsbelästigung und meist wurden über den Tag hinweg konstante Konzentrationen zwischen 2–10 ppm gemessen, ohne auffällige Spitzenwerte. Der Vergleich mit den Winddaten zeigt jedoch, dass beim Zeitpunkt der Geruchsbelästigung im Wiler Wolfenriet meist Südwestwind vorherrscht, welcher den Ammoniak vom Kompartiment in Richtung Wolfenriet treibt. Dabei ist auffällig, dass meist eine Geruchsbelästigung dokumentiert wurde, wenn sich die Windverhältnisse verändert haben. Oftmals ist in den Morgenstunden ein Südwestwind vorherrschend, welcher in den Mittagsstunden einem Nordwind weicht und dann gegen Abend erneut in einen Südwestwind umsteuert (Abbildung 15). Korrelationen zu anderen Parametern wie Windstärke oder Niederschlag mit Ammoniakemissionen konnten keine eruiert werden.

Aufgrund des geringen Rücklaufs an Anwohnerprotokollen ist es nicht möglich eine flächendeckende Auswertung der Geruchsbelästigung durch das Trockenschlackenkompartiment vorzunehmen. Alle Auswertungen im Zusammenhang mit dem Deponiegas wurden an der Anwohnerinfoveranstaltung am 1. Juli 2019 bei der Wiedag den anwesenden Anwohnern

vorgestellt. Dabei stellte sich heraus, dass sich das Geruchsproblem fast ausschliesslich auf die Anwohner des Wilers Wolfenriet beschränken und deshalb von den übrigen Anwohnern die Dringlichkeit einer Protokollierung auch nicht vorhanden war. Die Modellierungen der Ammoniakemissionen (Abbildung 12) wurden mit Einbezug aller vorhandenen Winddaten durchgeführt und bestätigen die nordöstliche Ausbreitung der Emissionen in Richtung Wolfenriet.



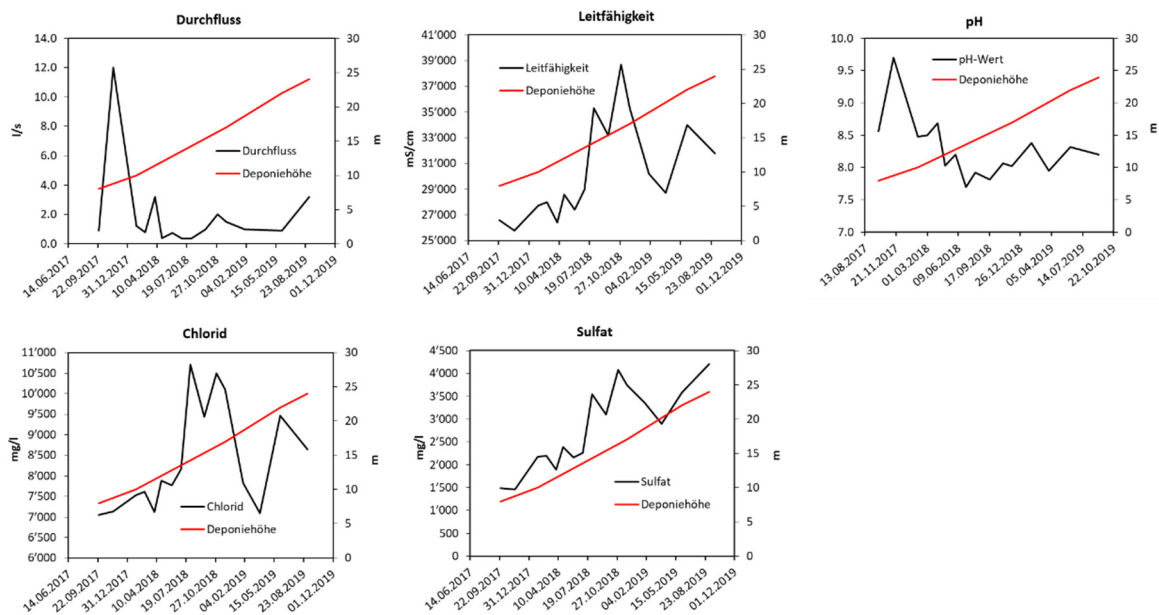
Datum	Uhrzeit	Intensität	Art des Geruchs	NH3 (ppm)	Windrichtung [° Grad]	Windrichtung	Windentwicklung	Windgeschw. (km/h)	Niederschlag (mm)	Niederschlags-summe (mm)	Feuchte (%)	Temperatur (°C)
18.01.2019	20:00	stark	Ammoniak	0.38	268	W	Ab 18.00 von N zu W/SW	0.4	0	2.6	87.6	-2.5
25.01.2019	19:00	mittel	Ammoniak	0.23	196	SSW	ganzer Tag SW/SSW	8	0	0	62.7	-3
27.01.2019	19:00	stark	Ammoniak	0.24	270	W	S, ab 18.00 W	4.3	0	0.4	95.8	3.5
29.01.2019	8:00	mittel	Ammoniak	0.23	189	S	W, ab 06.00 S, ab 10.00 N	0.6	0	1	99.9	-1.1
29.01.2019	20:00	stark	Ammoniak	1.59	171	S	W, ab 06.00 S, ab 10.00 N, ab 15.00 SW	2.1	0	1	87.8	-1.9
01.02.2019	9:00	stark	Ammoniak	1.44	172.2	S	S/SW, ab 12.00 N	0.8	0	0	78.3	2.6
04.02.2019	7:15	stark	Ammoniak	0.52	257.1	WSW	N, ab 04.00 W, ab 08.00 N	1.2	0	0.1	100	-3.7
08.02.2019	16:30	stark	Ammoniak	0.53	224.5	SW	ganzer Tag SW	2.2	0	0	69	5.2
09.02.2019	9:00	stark	Ammoniak	0.80	202.7	SSW	ganzer Tag SW	1.1	0	0.3	81.5	4.3
14.02.2019	19:00	stark	Ammoniak	1.61	239.2	SW	SW, ab 09.00 NO, ab 16.00 SW	3.6	0	0	65.1	6
15.02.2019	6:30	stark	Ammoniak	0.52	242.6	WSW	SW, ab 11.00 NO, ab 15.00 SW	1.1	0	0	95.4	0.3
16.02.2019	17:30	stark	Ammoniak	0.54	214	SSW	SSW, ab 08.00 NO, ab 15.00 SW	2.9	0	0	40.7	10.9
17.02.2019	17:30	stark	Ammoniak	1.60	210.7	SSW	SSW, ab 09.00 NO, ab 15.00 SW	1.9	0	0	42.6	10.1
30.03.2019	20:30	stark	Ammoniak	1.25	209.9	SSW	SSW, ab 07.00 NO, ab 20.00 SW	3.8	0	0	39.7	12.4
01.04.2019	21:00	stark	Ammoniak	1.34	240	SW	NW, ab 21.00 SW	2.9	0	0	57.2	12.8
03.04.2019	7:00	stark	Ammoniak	0.54	246.5	WSW	WSW, ab 08.00 N, ab 16.30 W	0.9	0	0	75.5	7.1
01.06.2019	23:00	stark	Ammoniak	2.21	254	WSW	SW, ab 06.00 NO, ab 21.30 WSW	1.5	0	0	53.5	19.4

Abbildung 15: Anwohnerprotokoll zur Erfassung der Geruchsbelästigung (NE des Kompartiments, Wolfenriet 3, 8133 Esslingen). Die anderen beiden erhaltenen Protokolle sind im Anhang angefügt.

3.5. Sickerwasserqualität

Die Schadstoffkonzentration im Sickerwasser gibt Aufschluss über den Wasserhaushalt der Deponie. Eintretendes Wasser wird von der Schlacke aufgenommen, zurückgehalten oder fliesst durch präferenzielle Fließwege Richtung Deponiebasis. Das Gewässerschutzgesetz (GSchV) [10] regelt in Anhang 3.3 unter Ziffer 25 die Anforderungen für gefasstes Sickerwasser aus Deponien. Die Gefährdung der abgelagerten Schlacke hängt hauptsächlich von den über das Sickerwasser freigesetzten Schadstoffen ab. Diese Freisetzung wird beeinflusst durch die chemischen Eigenschaften des Schadstoffes, den lokalen pH-Wert, das Redoxpotential, den Wasserströmungsverhältnissen sowie physischen, chemischen und biologischen Veränderungen des abgelagerten Materials. Das Trockenschlackenkompartiment wird seit September 2017 monatlich durch Stichproben überwacht (seit Januar 2019 alle zwei Monate). Trotz der kurzen Beobachtungsdauer sind gewisse Trends bei der Entwicklung der chemischen Zusammensetzung des Sickerwassers bereits erkennbar. Mit zunehmender Deponiemächtigkeit zeichnet sich eine Zunahme der Konzentrationen von Sulfat, Nitrat und Bor

im Sickerwasser ab (Abbildung 16, Abbildung 17). Durch die zunehmende Mächtigkeit der Ablagerung, muss das infiltrierte Wasser eine grössere Schichthöhe durchqueren und kann sich entsprechend mit diesen Schadstoffen anreichern. Dieselbe Tendenz zeigen die Konzentration des Chlorids und die Leitfähigkeit, eine Grösse für die Summe der gelösten Salze. Sie hängt von der Konzentration der Wasserinhaltsstoffe, deren Dissoziationsgrad und der Wertigkeit der Kationen ab. Für diese anorganischen und mobilen Ionen gibt es keine Anforderungen an die Einleitung in die öffentliche Kanalisation, resp. in Gewässer und es geht hauptsächlich darum mögliche Emissionen von Sickerwasser ins Grundwasser zu überprüfen. Bor ist ein zuverlässiger Indikator für Siedlungsabfälle, mit einer unmittelbaren Gefährdung von Schutzgütern ist jedoch nicht zu rechnen. Obwohl das Monitoring des Sickerwassers erst seit kurzem durchgeführt wird und sich das Kompartiment noch im Aufbau befindet, ist bereits eine Abnahme des pH-Werts sowie der Konzentrationen von Ammonium, Nitrit, Kupfer und gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) erkennbar. Ammonium und Nitrit sind Indikatoren für das Entwicklungsstadium einer Deponie. Hohe Konzentrationen in Sickerwässern resultieren aus anaeroben Abbauprozessen.



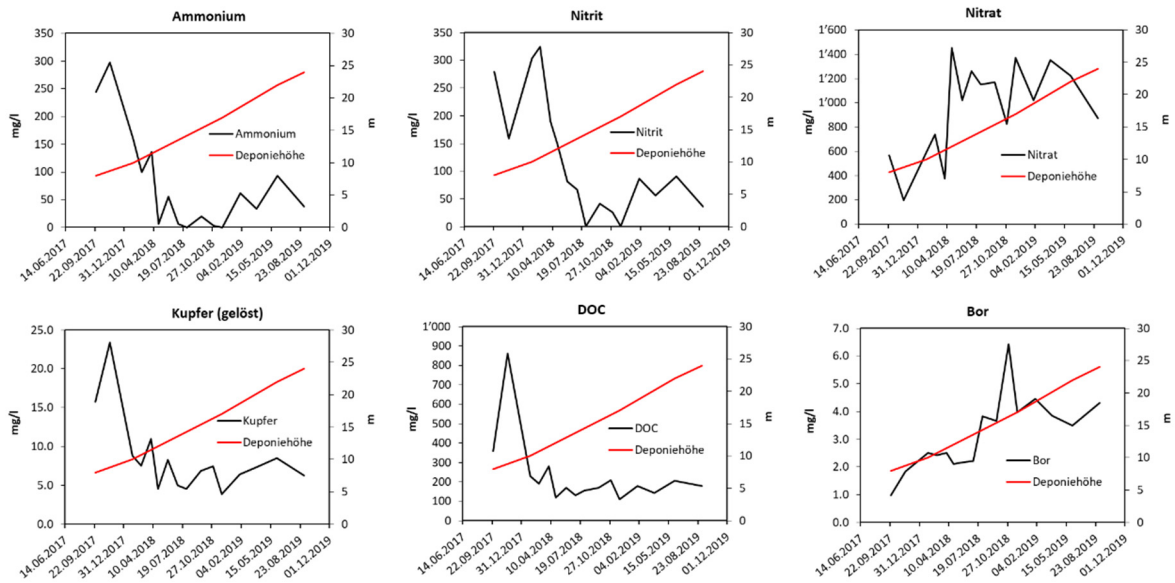


Abbildung 16: Entwicklung der chemischen Zusammensetzung der wichtigsten Parameter im Sickerwasser des Trockenschlackenkompartiments in Abhängigkeit der Deponiehöhe von September 2017 bis September 2019.

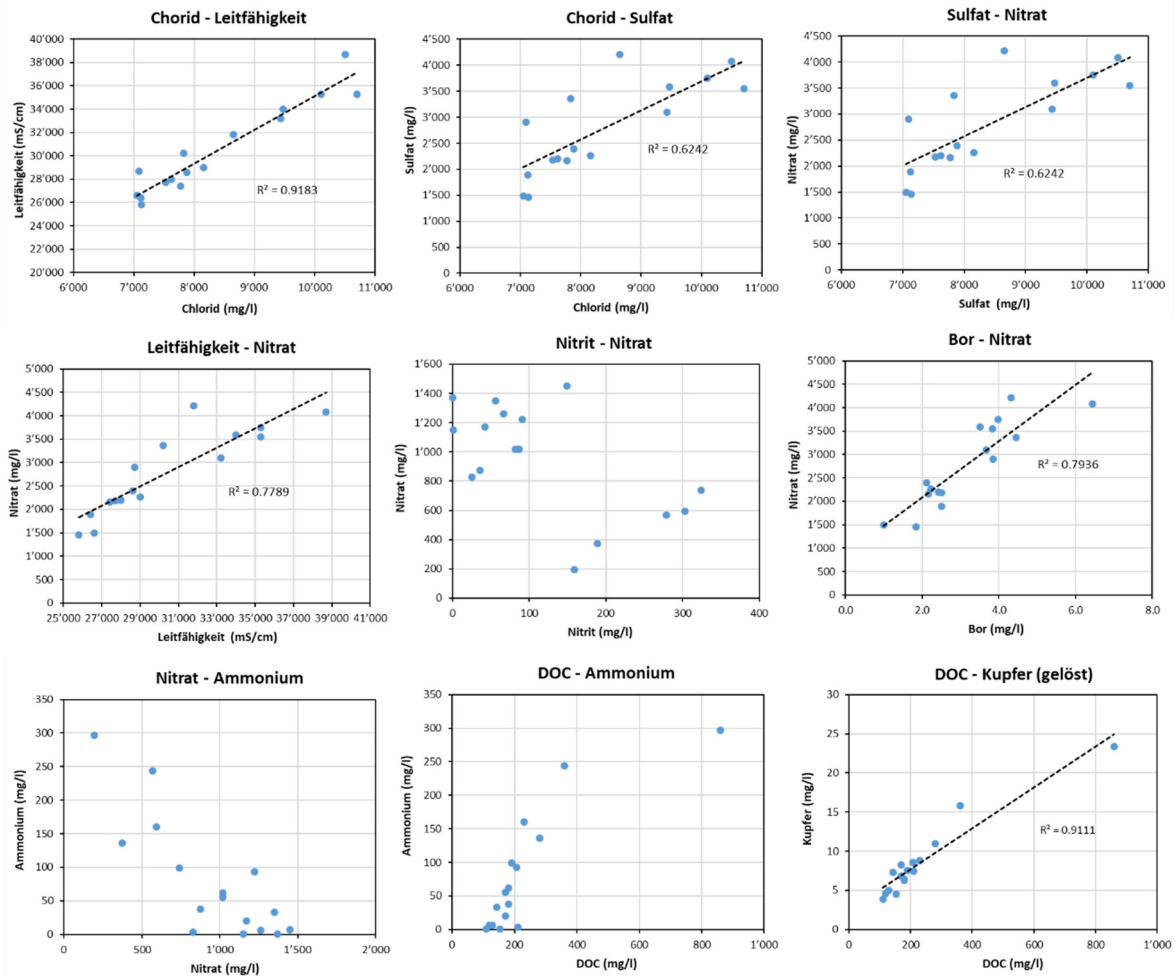


Abbildung 17: Korrelationsplots von Parametern im Sickerwasser des Trockenschlackenkompartiments von September 2017 bis September 2019.

Die Mobilität der meisten Schwermetalle ist stark vom pH-Wert und den Redoxbedingungen abhängig. Im sauren Bereich ist die Löslichkeit hoch, im neutralen und alkalischen Bereich sind die meisten Schwermetalle dagegen weitgehend immobil. Die Freisetzung von Schwermetallen aus dem Deponiekörper ist somit eng verbunden mit der vorhandenen Säurepufferkapazität der Schlacke und den vorherrschenden Bedingungen im Deponiekörper. Die Mobilisierung von Schwermetallen über das Sickerwasser in frühen Stadien der Deponie kommt primär durch Komplexbildung mit organischen und nicht-organischen Verbindungen, sowie durch die Anlagerung von Metallen an Kolloidteilchen zustande [11]. Kupfer wird durch die Komplexbildung mit DOC aus dem Trockenschlackenkompartiment ausgetragen und liegt mit Konzentrationen zwischen 4–23 mg/l deutlich über dem in der GSchV definierten Einleitgrenzwert in die öffentliche Kanalisation (1 mg/l), resp. in Oberflächengewässer (0.5 mg/l). Nebst Kupfer werden keine weiteren Schwermetalle im Sickerwasser nachgewiesen. Die Konzentrationen von DOC liegen im Bereich von 120–860 mg/l und ist somit deutlich über dem Einleitgrenzwert in Oberflächengewässer (10 mg/l). Die Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser des Trockenschlackenkompartiments Chrüzlen bewegen sich im üblichen Bereich von Sickerwässern aus jungen Schlackenkompartimenten [12]. Die Auswertung von Sickerwässern von Züricher Schlackendeponien zeigt, dass in den Anfangsjahren der Ablagerung der DOC-Grenzwert um das 15- bis 45-fache überschritten wird und auch nach einigen Jahren Ablagerungsdauer der Einleitgrenzwert für DOC noch um das 3–5-fache überschritten wird. Gemäss einem umfangreichen Datensatz von Schweizer Deponien ist der DOC in Deponiesickerwasser nur zu ca. 25% biologisch abbaubar, 75% des Kohlenstoffs sind refraktär [13]. Unter refraktärem Kohlenstoff werden Kohlenstoffverbindungen verstanden, die einem weiteren biologischen Abbau im vorhandenen Prozess nicht zugänglich ist. Für DOC und auch Ammonium wird meist nur eine sehr langsame Abnahme in der Konzentration mit der Zeit beobachtet, was beide Verbindungen in Bezug auf die Nachsorgedauer einer Deponie in den Fokus rückt.

Kurzfristige Erhöhungen der Sickerwassermengen spielen bei der Deponiedynamik und damit auch für die langfristige Entwicklung eine wichtige Rolle. Die kontinuierliche Messung der Leitfähigkeit zeigt, dass ein erhöhter Sickerwasseraustrag mit einer kurzfristigen Abnahme der Leitfähigkeit von 35–40 mS auf 10–15 mS verbunden ist (Abbildung 18). Im Gegensatz dazu führt ein erhöhter Sickerwasseraustrag zu einer Temperaturzunahme von ca. 20°C auf ca. 27°C. Die Betrachtung der Konzentrationsentwicklung bei unterschiedlichen Durchflussmengen zeigt, dass ein kurzfristig erhöhter Durchfluss aufgrund von Niederschlagsereignissen zu einer Erhöhung des pH-Werts, DOC, Kupfers und Ammoniums führt. Die erhöhte Temperatur und Schadstoffkonzentration im Sickerwasser sind ein Indiz dafür, dass partiell gesättigte Zonen aus dem Schlackenkörper gewaschen werden. Diese Zonen hatten Zeit, um mit dem Material zu reagieren (langsame Kinetik), was die erhöhten Konzentrationen von pH, DOC, Kupfer und Ammonium sowie die erhöhte Temperatur erklärt.

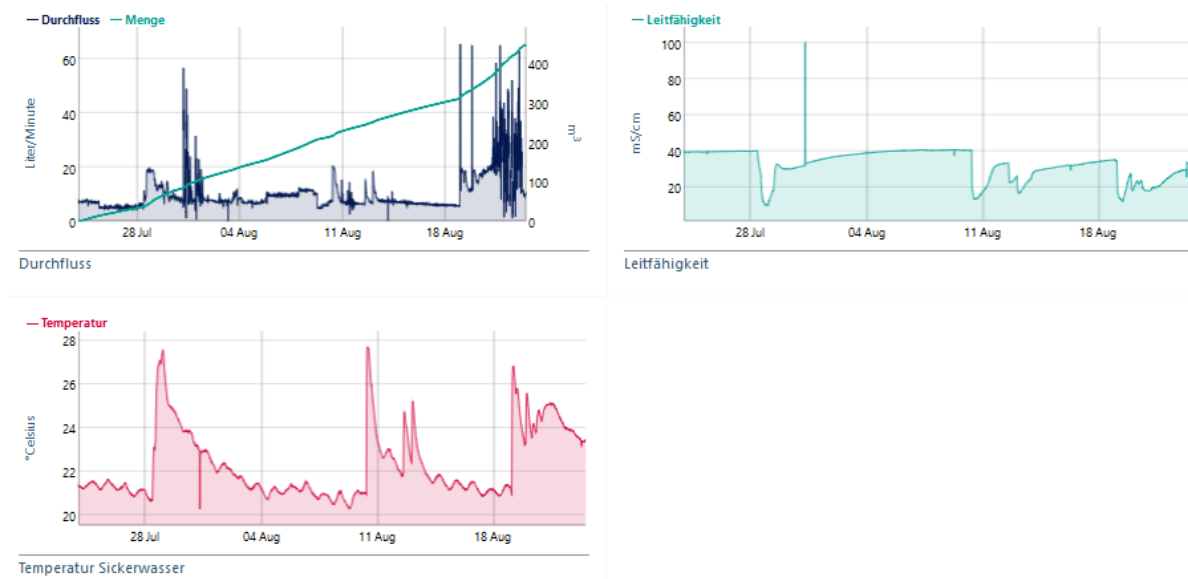


Abbildung 18: Abhängigkeit von Durchfluss, Leitfähigkeit und Temperatur im Sickerwasser des Trockenschlackenkompartiments.

3.6. Sickerwassermengen

Nebst der Betrachtung der Konzentrationen ist es wichtig die effektiven Frachten zu betrachten. Aus diesem Grund wurde monatlich während eines Jahres der Wasserinput und -output aus dem Trockenschlackenkompartiment berechnet und zusätzlich die Dynamik von acht Niederschlagsereignissen analysiert. Die beiden Betrachtungen «Zeitperiode» und «Ereignis» werden im Anhang im Detail erläutert.

3.6.1. Betrachtung Zeitperiode

Innerhalb eines Jahres seit Oktober 2018 sind 1'244 mm Niederschlag gefallen. Dies entspricht bei einer offenen Kompartimentsfläche von 4'500 m² einem Wassereintrag von 5'600 m³. Im gleichen Zeitraum sind 3'070 m³ Sickerwasser aus dem Kompartiment exfiltriert. Dies ergibt für das Trockenschlackenkompartiment eine durchschnittliche Sickerrate von 55%. In den Wintermonaten liegt die Sickerrate teilweise über 100%, was mit der Schneebedeckung und der Schmelzwasserbildung erklärt werden kann. In den Frühlings- und Sommermonaten ist die Sickerrate zwischen 30–50%, was auf die Evaporation zurückzuführen ist. Auftreffender Niederschlag evaporiert im Sommerhalbjahr zu grossen Teilen und infiltriert nicht in das Kompartiment.

Bis im September 2019 wurden ca. 120'000 t Schlacke A deponiert, welche für den Transport mit 6.4% Wasser benetzt wurde. Somit wurde insgesamt ca. 8'000 m³ Wasser zusätzlich in das Kompartiment eingebaut.

Tabelle 8: Wassereintrag durch Niederschlag und Austrag durch Sickerwasser innerhalb eines Jahres seit Inbetriebnahme des Monitorings.

Parameter	Einheit	2018			2019									Summe
		Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sept	
Niederschlag	mm	57	16	167	79	36	60	71	184	105	198	143	129	1'244
Niederschlag*	m ³	255	72	751	354	161	272	321	826	473	893	642	580	5'600
Sickerwasser	m ³	67	72	242	363	185	143	146	255	198	479	467	453	3'070
Sickerrate (%)		26	101	32	103	115	53	46	31	42	54	73	78	55

*unter Einbezug einer offenen Deponiefläche von 4'500 m²

3.6.2. Betrachtung Ereignis

Während der betrachteten Zeitperiode eines Jahres wurden acht grössere Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Dauer detailliert betrachtet (Tabelle 8, Abbildung 19). Die Auswertung von einzelnen Niederschlagsereignissen verdeutlicht die Dynamik im Wasserhaushalt des Kompartiments. Trotz stark unterschiedlicher Dauer und Stärke der Niederschläge resultieren relativ ähnliche Sickerraten, meist im Bereich von 30 bis maximal 55%. Die durchschnittliche Sickerrate von 35% liegt im Bereich von Literaturwerten für Schlackendeponien [14]. Der relativ hohe Infiltrationsanteil ist durch den aktiven Betrieb und der dadurch offenen Deponie bedingt. Nach der Abdeckung des Kompartiments ist von einem deutlich reduzierten Sickerwasseranfall auszugehen.

Tabelle 9: Ausgewählte Ereignisse mit Wassereintrag durch Niederschlag und Austrag durch Sickerwasser.

Niederschlag							
Ereignis	Start	Ende	Dauer (h)	Niederschlag (mm)	Niederschlag (m ³)		
1	01.10.2018 00:00	01.10.2018 19:40	19.7	16.6	75		
2	27.10.2018 04:00	30.10.2018 23:30	91.5	35.3	159		
3	02.12.2018 08:00	10.12.2018 23:30	207.5	78.2	352		
4	21.12.2018 12:00	24.12.2018 13:00	73.0	73.8	332		
5	05.01.2019 09:30	18.01.2019 10:30	313.0	72.2	325		
6	18.05.2019 19:00	22.05.2019 04:00	81.0	104	468		
7	01.07.2019 21:30	02.07.2019 08:00	10.5	56.5	254		
8	14.07.2019 18:00	15.07.2019 03:00	9.0	52.8	238		
Sickerwasser							
Ereignis	Start	Peak	Ende	Start-Peak (h)	Zeit (%) bis Peak	Abfluss Sickerwasser (m ³)	Sickerrate (%)
1	01.10.2018 02:30	01.10.2018 09:30	02.10.2018 10:00	7.0	36	19	26
2	29.10.2018 20:40	30.10.2018 00:20	02.11.2018 19:00	3.7	4	14	9
3	02.12.2018 18:00	03.12.2018 03:00	16.12.2018 17:30	9.0	4	94	27
4	23.12.2018 13:30	24.12.2018 11:00	31.12.2018 07:30	21.5	29	112	34
5	12.01.2019 18:30	14.01.2019 07:40	20.01.2019 13:00	37.2	12	153	47
6	20.05.2019 07:00	21.05.2019 09:00	27.05.2019 19:00	26.0	32	148	32
7	01.07.2019 22:50	02.07.2019 06:00	09.07.2019 12:00	7.2	68	133	52
8	14.07.2019 19:00	15.07.2019 04:00	18.07.2019 11:00	9.0	100	130	55
Mittelwert Sickerrate							35

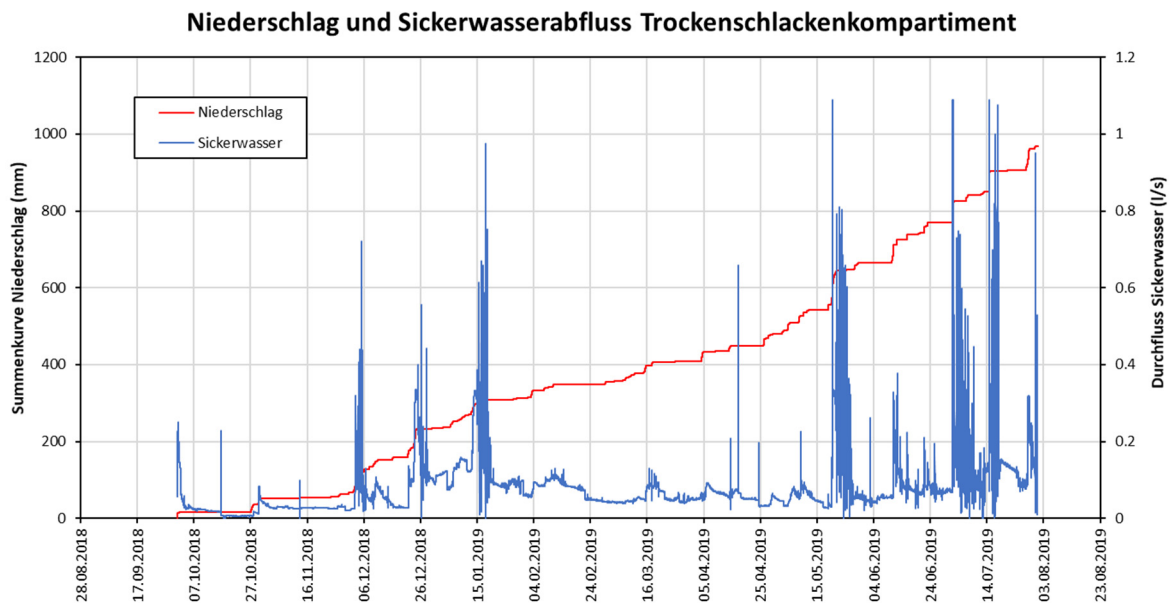


Abbildung 19: Summenkurve des Niederschlags (rot) und Sickerwasserabflusses (blau) des Trockenschlackenkompiments. Die inkonstante Abnahme des Abflusses nach grösseren Niederschlagsereignissen ist auf eine Überlastung des Thomson-Wehrs zurückzuführen, was aber insgesamt zu vernachlässigbaren Fehlmessungen führt.

3.6.3. Ausgetragene Frachten und Massenbilanzen

Der Frachtverlauf ist von der Wasserbilanz und dem Konzentrationsverlauf der Schadstoffe im Sickerwasser abhängig. Da sich das Kompartiment noch im Aufbau befindet und keine Oberflächenabdichtung besteht, wird die anfallende Sickerwassermenge massgeblich durch die lokalen Niederschlagsereignisse beeinflusst. Der Durchfluss wird seit Oktober 2018 online gemessen und seit diesem Zeitpunkt ist eine detaillierte Frachtberechnung möglich.

In diesem Zeitraum wurden 3'070 m³ Sickerwasser mit einem mittleren Durchfluss von 4 l/min aus dem Trockenschlackenkompartment ausgetragen. Hochrechnungen über die gesamte Ablagerungsperiode (Oktober 2016 bis Oktober 2019) zeigen, dass bisher ca. 9'210 m³ Sickerwasser ausgetragen wurden (Tabelle 10). Seit Beginn der Ablagerung wurden beachtliche Mengen an Chlorid und Sulfat und stickstoffhaltige Komponenten wie Nitrat, Nitrit und Ammonium sowie 2'126 kg DOC aus dem Kompartiment via Sickerwasser ausgetragen. Mit dem DOC wurde auch eine signifikante Menge an Kupfer ausgetragen (78 kg), wogegen andere Schwermetallausträge kaum relevant sind.

Tabelle 10: Mittelwert der gemessenen Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser und Berechnung der ausgetragenen Frachten unter Einbezug der angefallenen Sickerwassermengen.

	Mittelwert Konzentration		Fracht	
	1 Jahr Okt 18–Okt 19	3 Jahre Okt 16–Okt 19	1 Jahr Okt 18–Okt 19	3 Jahre Okt 16–Okt 19
Sickerwassermenge (m³)	-	-	3'070	9'210
	mg/l	mg/l	kg	kg
Chlorid	8'940	8'377	27'446	77'151
Sulfat	3'648	2'786	11'200	25'656
Nitrat	1'110	949	3'409	8'738
DOC	172	231	527	2'126
Nitrit	49	118	151	1'088
Ammonium	38	78	118	722
Kupfer	6.6	8.5	20	78
Bor	4.4	3.17	14	29
Molybdän	2.0	1.82	6.3	17
Nickel	0.08	0.10	0.24	0.95
Mangan	0.10	0.09	0.30	0.78
Eisen	0.04	0.07	0.13	0.63
Blei	0.02	0.03	0.05	0.29
Arsen	0.02	0.02	0.06	0.16
Zink	0.02	0.03	0.06	0.23
Chrom	0.02	0.02	0.05	0.14
Kobalt	0.01	0.02	0.04	0.15
Kadmium	0.00	0.00	0.00	0.00
Quecksilber	<0.0002	<0.0002	–	–

Die ermittelten Transferkoeffizienten der im Sickerwasser analysierten Stoffe zeigen, dass sich der Grossteil der abgelagerten Schadstoffe noch im Deponiekörper befindet (Tabelle 11). 99.7% des TOC und mehr als 99.9% der Schwermetalle sind aktuell noch im Deponiekörper vorhanden. Einzig in Bezug auf Chlor kann ein relevanter Austrag beobachtet werden, hier wurden innerhalb von 3 Jahren bereits 14.1% der abgelagerten Menge über das Sickerwasser ausgetragen. Durch den Austrag von gelösten Stickstoffverbindungen wurde bisher 6.2% des der gesamten Stickstoffmenge mobilisiert.

Tabelle 11: Absolute Mengen ausgewählter Parameter welche seit Oktober 2016 auf dem Trockenschlackenkompartiment abgelagert und in diesem Zeitraum prozentual via Sickerwasser mobilisiert wurden.

Oktober 2016–Oktober 2019					
Parameter	Schlacke A (120'000 t)			Sickerwasser	
	Mittelwert Konzentration		Abgelagert t	Mobilisiert t	Anteil mobilisiert %
	mg/kg	kg/t			
Chlorid	4'547	4.5	546	77	14
Schwefel	4'443	4.4	533	8.6	1.6
N (NH₄, NO₃, NO₂)	384	0.4	46	2.9	6.2
Nitrat-N	384	0.4	46	2.0	4.3
Ammonium-N	384	0.4	46	0.6	1.2
TOC	5'883	5.9	706	2.1	0.3
Kupfer	4'793	4.8	575	0.1	0.0
Eisen	32'971	33.0	3'956	0.0	0.0
Zink	3'596	3.6	432	0.0	0.0
Blei	1'632	1.6	196	0.0	0.0
Mangan	963	1.0	116	0.0	0.0
Chrom	497	0.5	60	0.0	0.0
Nickel	199	0.2	24	0.0	0.0
Kobalt	89	0.1	11	0.0	0.0
Arsen	27	0.0	3.2	0.0	0.0
Kadmium	4.5	0.0	0.5	0.0	0.0

4. Emissionsprognose

Für die Gefährdungsabschätzung wird zusätzlich zur Aufnahme des Ist-Zustandes einer Deponie auch die Erstellung einer Prognose der Entwicklung der Emissionen verlangt. Dabei gilt es die kritischen Parameter zu identifizieren, welche die Einleitung des unbehandelten Sickerwassers in Oberflächengewässer limitieren. Abhängig von den physikalischen (Abflussregime, Wasserpermeabilität, Einbaudichte) und chemischen Parametern (Verfügbarkeit des Schadstoffs, pH-Wert, Redoxpotential, Temperatur) im Kompartiment laufen diverse Alterationsprozesse ab und Schadstoffe werden entsprechend mobilisiert oder zurückgehalten.

4.1. Abschätzungen der Mobilisierung anhand von Laborversuchen

4.1.1. Batchtests

Standardisierte Laborversuche haben den Vorteil, dass das Verhalten von verschiedenen Materialien verglichen werden kann. Es wird generell unterschieden in statische und dynamische Tests. Statische Tests (Batchtests) dienen zur Ermittlung der Auslaugung der verfügbaren Konzentrationen von Stoffen unter definierten Bedingungen. Batchtests sind weniger zeitaufwändig und werden hauptsächlich für die Deponiezuordnung angewendet. Die VVEA verlangt für die Zulassung von Abfällen auf Deponien unter anderem, dass im Eluat gewisse Grenzwerte nicht überschritten werden und schreibt entsprechende 24h-Batchtests vor (siehe Kapitel Methoden im Anhang). Diese Batchtests werden mit einem Flüssig/Feststoff-Verhältnis (L/S-Verhältnis) von 10 durchgeführt und die analysierten Konzentrationen entsprechen kumulativen Gehalten.

Der Mittelwert der 24h-Batchtests aus dem Schlackenmonitoring der ZAV-Recycling AG für die Fraktionen der Schlacke A zeigen, dass die Feinfraktion 0.3–2 mm eine deutlich höhere Leitfähigkeit und höhere Schadstoffkonzentration aufweist im Vergleich zur Grobfraktion 2–12 mm. Mit Ausnahme von Kupfer (0.5 mg/l) und Zink (0.7 mg/l) werden aus beiden Fraktionen kaum Schwermetalle mobilisiert (Tabelle 12). Insbesondere die Konzentration von Ammonium und DOC sind bei der Feinschlacke 2–4x höher und liegen bei beiden über dem Grenzwert für Deponie-Typ B. Werden die Eluat-Konzentrationen anteilmässig für die Schlacke A berechnet ergibt dies eine DOC-Konzentration von 21 mg/l. Ein guter Ausbrand des Abfalls führt zu tiefen TOC-Werten in der Schlacke was wiederum zu geringeren DOC-Werten im Sickerwasser führt. Der Zielwert von 0.5% TOC soll bewirken, dass eine DOC-Konzentration im VVEA-Eluattest <20 mg/l erreicht wird und dadurch eine zeitliche Verkürzung der Nachsorge der abgelagerten Schlacke erzielt werden kann. Durchschnittlich liegt die TOC-Konzentration für die Schlacke A bei 0.59%, wobei der Feinanteil auch hier mit 0.96% im Vergleich zum Grobanteil mit 0.47% eine deutlich höher ist (Tabelle 3). Bis auf Kupfer (0.5 mg/l) und Zink (0.7 mg/l) werden in beiden Fraktionen mittels Eluattest kaum Schwermetalle mobilisiert.

Tabelle 12: Mittelwert der Konzentrationen im 24h-Eluat aus dem Schlackenmonitoring der Einzelfraktionen der ZAV-RE und die gewichteten Werte für die Schlacke A.

		Aufbereitete Schlacke 0.3–2 mm	Aufbereitete Schlacke 2–12 mm	Schlacke A	VVEA Typ B	VVEA Typ C
Leitfähigkeit	μS/cm	11'133	3'662	5'530	–	–
Trockenrückstand	mg/l	3'595	1'252	1'838	500	3000
pH-Wert (Test 1)	pH	6.3	5.0	5.4	–	–
pH-Wert (Test 2)	pH	12	9.6	10.3	–	6–12
DOC	mg/l	48	12	21	20	20
Ammonium	mg/l	6.1	1.9	3.0	–	–
Ammonium-N	mg/l	5.1	1.6	2.5	0.5	5.0
Fluorid	mg/l	1.1	0.5	0.6	2.0	10
Nitrit	mg/l	0.2	0.2	0.2	1.0	1.0
Phosphat	mg/l	0.02	0.01	0.01	–	10 (P)
Phosphat-P	mg/l	0.01	<0.005	0.01	–	10
Cyanid	mg/l	0.1	0.02	0.05	0.02	0.1
Sulfid	mg/l	<0.01	<0.01	<0.01	–	0.1
Sulfit	mg/l	0.9	0.6	0.7	–	1.0
Aluminium	mg/l	0.07	<0.05	0.06	–	10
Arsen	mg/l	0.01	0.01	0.01	–	0.1
Barium	mg/l	0.6	0.9	0.8	–	5.0
Blei	mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	–	1.0
Kadmium	mg/l	<0.0001	<0.0001	<0.0001	–	0.1
Chrom	mg/l	0.02	0.01	0.01	–	2.0
Chrom-VI	mg/l	0.1	0.2	0.17	–	0.1
Kobalt	mg/l	0.01	0.01	0.01	–	0.5
Kupfer	mg/l	0.2	0.6	0.5	–	0.5
Nickel	mg/l	0.03	0.04	0.04	–	2.0
Quecksilber	mg/l	<0.0002	<0.0002	<0.0002	–	0.01
Zink	mg/l	1.0	0.7	0.7	–	10
Zinn	mg/l	<0.002	<0.002	<0.0002	–	2.0

4.1.2. Säulentests

Im Gegensatz zu Batchversuchen wo die gemessene Konzentration einer kumulativen Anreicherung entspricht, liefern dynamische Säulentests Konzentrationswerte in Abhängigkeit eines zunehmenden L/S-Verhältnisses (L/kg). Da die Gewässerschutzverordnung auf Konzentrationsgrenzwerten basiert, liefern Säulentests wichtige Hinweise zur Konzentrationsentwicklung spezifischer Stoffe im Sickerwasser. Mit Säulentests nach der europäischen Norm CEN/TS 14405 wurden über eine Dauer von 27 Tagen sieben Eluatfraktionen generiert und

analysiert. Die Resultate der beiden einzelnen Fraktionen und der anteilmässig daraus berechneten Schlacke A für alle analysierten Parameter sind im Anhang angefügt. Aus den zeitlichen Entwicklungen wird ersichtlich, dass für die meisten Stoffe kurz- bis mittelfristig mit abnehmenden Emissionsverläufen zu rechnen ist. Während der gesamten Testphase bewegt man sich in einem stark alkalischen Milieu ($\text{pH} > 11$) und die Leitfähigkeit entwickelt sich von initial hohen Werten von 30–80 mS mit zunehmender Durchströmung zu Werten < 10 mS (Abbildung 20).

Hinsichtlich Deponienachsorge sind DOC sowie die Stickstoffkomponenten Nitrat und Ammonium kritische Parameter, denn sie werden im Sickerwasser des Trockenschlackenkompartiments in erhöhten Konzentrationen nachgewiesen (Abbildung 16) und unterliegen strengen Grenzwerten für die Einleitung in Oberflächengewässer [10]. Die Werte für DOC und Ammonium zeigen auch bei den Säulentests initial hohe Konzentrationen (Abbildung 20). Trotz abnehmender Trends werden diese Stoffe über längere Zeiträume (Jahrzehnte) die Einleitgrenzwerte nicht erfüllen. Die Säulentests erlauben eine Extrapolation der Konzentrationsverläufe und es zeigt sich generell, dass eine sehr rasche Freisetzung der Schadstoffe erfolgt. Bereits nach einem L/S-Verhältnis von ca. 1.5 (Durchströmung von 1.5 L Wasser pro 1 kg Schlacke) sind $> 90\%$ der über den gesamten Zeitraum verfügbaren Schadstoffmenge mobilisiert. Die Betrachtung der Konzentrationsverläufe zeigt weiter, dass nach einem L/S-Verhältnis von 2 die DOC-Konzentrationen für beide Fraktionen der Schlacke A bei ca. 20 mg/l liegen. Nach einem L/S von 10 werden für beide Fraktionen der zulässige Einleitgrenzwert in Oberflächengewässer von 10 mg/l eingehalten. Für die stickstoffhaltigen Komponenten gilt ein Einleitgrenzwert von 2 mg/l (Summe von Ammonium-N und Nitrat-N), welcher bei der Grobfraction 2–12 mm nach einem L/S von 2 und bei der Feinfraktion 0.3–2 mm erst nach einem L/S von 10 unterschritten wird.

Werden die Konzentrationen einzelner Eluate aufsummiert, erreicht man für die Schlackenfraktionen bei einem L/S-Verhältnis von 10 (äquivalent zu den 24h-Batch-Tests) ähnliche Konzentrationen für DOC und Ammonium wie mit den Batchtests (Tabelle 6, Abbildung 20). Basierend auf den Säulentests kann weiter der mobilisierbare Anteil eines Schadstoffs im betrachteten Zeitraum abgeschätzt werden. Für die Schlacke A wird für den TOC ein mobilisierbarer Anteil von 5% in Form von DOC ermittelt. Bei den Stickstoffkomponenten werden ca. 10% des gesamten Stickstoffs als Ammonium mobilisiert und ca. 0.6% in Form von Nitrat. Weiter zeigen die Säulentests, dass die leichtlöslichen Chloride und Sulfate relativ rasch mobilisiert werden (alle Resultate siehe Anhang). Insgesamt werden ca. 45% des im Feststoff der Schlacke A vorhandenen Chlorids bis zum Ende des Tests (L/S 10) mobilisiert, wogegen sich diese Werte für Schwefel (13%), Natrium (5%) oder Kalium (5.7%) auf deutlich tieferem Niveau bewegen. Die Metallfreisetzung erfolgt, mit Ausnahme des amphoteren Aluminiums, bei den vorherrschenden alkalischen Bedingungen auf einem sehr tiefen Niveau. Einige wenige Elemente wie die Erdalkalimetalle Kalzium, Barium und Strontium weisen hingegen mit steigendem L/S zunehmende Konzentrationen auf. Den Gründen für diese zunehmende Löslichkeit muss noch nachgegangen werden. Das Erdalkalimetall Magnesium wird dagegen während dem ganzen Säulentest kaum mobilisiert und liegt in den Eluaten immer unter der Nachweisgrenze von 0.05 mg/l.

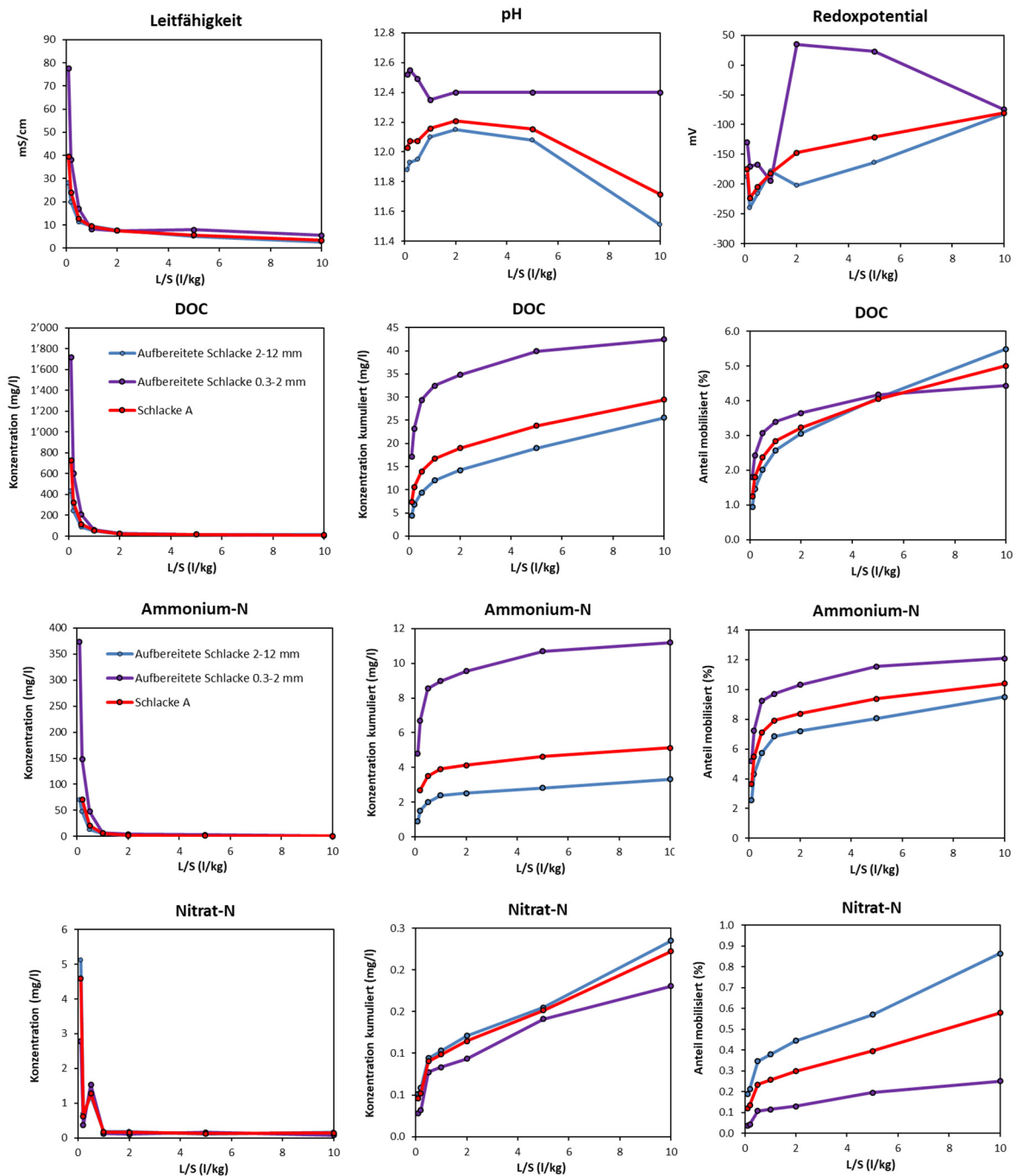


Abbildung 20: Konzentrationsverlauf (mg/l), kumulierte Konzentration (mg/l) sowie mobilisierbarer Anteil (%) der Parameter DOC, Ammonium-N und Nitrat-N aus Säulentests (CEN/TS 14405).

4.2. Abschätzungen der Mobilisierung anhand von Monitoringdaten

Die Säulentests erlauben eine dynamische Emissionsprognose basierend auf der durchströmten Wassermenge in Bezug auf die abgelagerte Menge Schlacke, jedoch ohne zeitliche Einordnung des Emissionsverlaufs. Hinsichtlich der Ermittlung der Nachsorgedauer von Deponien ist es deshalb notwendig, die Resultate der Säulentests mit realen Deponiedaten zu vergleichen.

4.2.1. L/S-Verhältnis und Fließregime

Damit die gemessenen Sickerwasserkonzentrationen und die berechneten Frachten des Trockenschlackenkompartiments den Säulentests gegenübergestellt werden können, müssen die hydraulischen Bedingungen des Kompartiments in L/S-Verhältnisse umgerechnet werden. Der Parameter L/S, bzw. die Menge an Sickerwasser in Bezug auf die Menge Schlacke, hat einen signifikanten Einfluss auf das verbleibende Schadstoffpotential einer Deponie. Durch die fortschreitende Ablagerung auf das Trockenschlackenkompartiment ist die Auswertung des L/S-Verhältnisses zum jetzigen Zeitpunkt mit Unsicherheit behaftet (Tabelle 13). Seit Beginn der Schlackenablagerung im Oktober 2016 sind pro Jahr ca. 1.2 m Niederschlag auf die Deponieoberfläche gefallen. Unter Einbezug der offenen Fläche von 4'500 m² und einer Sickerrate von 35% entspricht dies einer infiltrierten Wassermenge von ca. 1'960 m³ pro Jahr. Unter Berücksichtigung der zunehmenden abgelagerten Schlacke entspricht dies einem L/S-Verhältnis von ca. 0.15 am Ende des Jahres 2019 (Tabelle 13).

Tabelle 13: Berechnung des L/S-Verhältnisses des Trockenschlackenkompartiments unter Berücksichtigung der zunehmenden Menge abgelagerter Schlacke.

Datum	Niederschlag	Sickerrate	Fläche	Niederschlag	Schlacke	Schlacke	L/S
	m	%	m ²	m ³	t	t total	m ³ /t
31.12.2016*	0.31	35	4'500	490	7'222	7'222	0.07
31.12.2017	1.24	35	4'500	1'960	39'718	46'940	0.11
31.12.2018	1.24	35	4'500	1'960	43'448	90'388	0.13
31.12.2019	1.24	35	4'500	1'960	43'000	133'388	0.15

*Ablagerung seit Oktober 2016

Vergleicht man die mobilisierten Anteile aus dem Sickerwassermonitoring beim aktuellen L/S von 0.15 mit dem Säulentest der Schlacke A, so zeigt sich, dass mit dem Labortest ein erhöhter Schadstoffaustrag stattfindet verglichen zur Realität auf dem Trockenschlackenkompartiment (Tabelle 14). Das Kompartiment zeigt v.a. eine tiefere Mobilisierung von TOC, Ammonium-N, Chlorid oder Schwefel. Diverse weitere Matrixelemente wie Kalzium oder Natrium wurden im Umfang des Sickerwassermonitorings nicht analysiert und können deshalb nicht mit dem Säulentest verglichen werden. Schwermetalle wurden sowohl auf dem Kompartiment wie auch mit dem Säulentest beim aktuellen L/S von 0.15 keine mobilisiert. Auffällig ist die hohe Nitrat-N Menge, welche bisher aus dem Kompartiment ausgewaschen wurde (4.3%) verglichen zur Säule (0.1%). Es müssen im Schlackenkompartiment Prozesse ablaufen, welche in einer erhöhten Nitrat-N Mobilisierung resultieren und noch im Detail verstanden werden müssen.

Um das Abflussverhalten des Trockenschlackenkompartiments möglichst realistisch beschreiben zu können, werden Informationen zum Fließregime und dem dynamischen Wasserrückhaltevermögen benötigt. Eine wesentliche Rolle für den Schadstoffaustrag spielt der Anteil der Deponie, welcher tatsächlich mit eindringendem Wasser in Kontakt kommt und daher zum Emissionsgeschehen beitragen kann. Da sich das Kompartiment im offenen Zustand befindet können grosse Anteile des Niederschlags in den Deponiekörper infiltrieren, allerdings fließt ein beträchtlicher Teil des Wassers entlang präferenzierter Fließwege ab und tritt dadurch nicht in intensiven Kontakt mit der abgelagerten Schlacke. Eine einfache

Abschätzung zum durchströmten Anteil des Deponiekörpers liefert der Vergleich der ausgetragenen Frachten des Kompartiments verglichen zum Säulentest beim aktuellen L/S von 0.15. In der Tabelle 14 sind die mobilisierten Mengen für das Trockenschlackenkompartiment sowie für den Batch- und Säulentest der Schlacke A zusammengefasst. Der Säulentest zeichnet sich durch ein homogenes Fließregime aus mit einer von unten nach oben fließender, gesättigter Wassersäule (Upflow-Percolation). Es wird deshalb angenommen, dass mit der Säule die maximal mobilisierbare Schadstofffracht ausgetragen wird («Worst Case Szenario»). Mit der Berechnung des prozentualen Anteils der effektiv mobilisierten Fracht basierend auf den Sickerwasserdaten kann der durchströmte Anteil des Kompartiments abgeschätzt werden.

Tabelle 14: Vergleich der ausgetragenen Frachten des Trockenschlackenkompartiments mit den Resultaten des Säulentests und VVEA 24h-Batchtests.

Parameter	Schlacke A			Sickerwasser	Kompartiment (L/S 0.15)	Säule (L/S 0.15)	Säule (L/S 10)	24h-Eluat (L/S 10)	Anteil durchströmt
	Mittelwert Monitoring	Abgelagert	120'000 t						
	mg/kg	kg/t	t	t	%	%	%	%	%
	Mobilisiert								
Chlorid	4'547	4.5	546	77	14	24	45	n.a	60
Schwefel	4'443	4.4	533	8.6	1.6	2.0	13	n.a	82
TOC	5'883	5.9	706	2.1	0.3	1.5	5.0	3.6	20
Ammonium-N	384	0.4	46	0.6	1.2	4.6	10	6.5	27
Nitrat-N	384	0.4	46	2.0	4.3	0.1	0.6	n.a	–
N (NH₄, NO₃, NO₂)	384	0.4	46	2.9	6.2	n.a	n.a	n.a	–
Kupfer	4'793	4.8	575	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	–
Kadmium	4.5	0.0	0.5	0.0	0.0	0.2	11	0.0	–
Kobalt	89	0.1	11	0.0	0.0	0.0	0.6	0.1	–
Chrom	497	0.5	60	0.0	0.0	0.0	0.1	n.a	–
Eisen	32'971	33	3'956	0.0	0.0	0.0	0.0	n.a	–
Mangan	963	1.0	116	0.0	0.0	0.0	0.1	n.a	–
Nickel	199	0.2	24	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	–
Blei	1'632	1.6	196	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	–
Zink	3'596	3.6	432	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	–

Basierend den Matrixkomponenten Chlorid und Schwefel wird ein durchströmter Anteil des Kompartiments von ca. 70% ermittelt (Tabelle 14), wogegen sich der Wert basierend auf dem TOC und Ammonium-N gerechnet nur bei ca. 23% bewegt. Dies hängt primär mit der Tatsache zusammen, dass Chlorid und Sulfat rasch mobilisierbar sind und deshalb beim Kontakt mit eindringendem Wasser sofort ausgewaschen werden. Wird neue Schlacke darüber abgelagert, überlagert der schnellere Prozess den der darunter liegenden Schlacke. Die Mobilisierung von TOC als DOC, resp. des Stickstoffs als Ammonium verläuft kinetisch langsamer und die der daraus ermittelte durchströmte Anteil von 23% widerspiegelt wahrscheinlich eher dem tatsächlichen Fließregime des Trockenschlackenkompartiments.

Nebst den ausgewaschenen Mengen zum aktuellen Zeitpunkt der Deponie bei L/S 0.15, sind in Tabelle 15 zudem die Daten des Säulen- und Batchtests bei einem L/S von 10 dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt ist ungefähr die Hälfte des vorhandenen Chlorids in der Schlacke durch den Sickerwasseraustrag mobilisiert. Detaillierte Resultate zur Dynamik und den mobilisierbaren Anteilen aller analysierten Schadstoffe ist aus den Grafiken der Säulentests im Anhang zu entnehmen.

4.2.2. Prognosemodell für die Sickerwasserentwicklung

Die Daten aus dem Monitoring des Trockenschlackenkompartiments erlauben neben der Erfassung des heutigen Zustands auch Trendanalysen zur Entwicklung der Schadstoffkonzentrationen in der Zukunft. Mit zunehmendem Alter des Kompartiments wird sich die Zusammensetzung der abgelagerten Trockenschlacke und das Fließregime des Deponiekörpers (Heterogenität) verändern. Nebst physikalischen Faktoren kommen chemische und biologische Veränderungen wie pH-Wert Absenkung durch das Aufbrauchen des Säurepuffers hinzu, was zur Freisetzung von Schwermetallen führen wird. Die durchgeführten Säulentests (Kapitel 4.1.2), für die Abschätzung der künftig zu erwartenden Emissionen der Schlacke A, zeigten kaum Veränderungen im pH-Wert und dem Redoxpotential und bilden somit nur das kurz- bis mittelfristige Emissionsverhalten ab (Abbildung 20). In Bezug auf die Durchführung einer Gefährdungsabschätzung ist je nach Schadstoff eine Emissionsprognose unter Berücksichtigung der sich ändernden Bedingungen durchzuführen.

Grundsätzlich gibt es zwei Modellansätze:

- Physikalisch-chemische Emissionsmodelle, welche keine Änderungen im pH-Wert, der Temperatur, den Redoxverhältnissen und der Sorption berücksichtigen. Dabei wird nur die Zusammensetzung der abgelagerten Schlacke, die Heterogenität und verschiedene deponietechnische Faktoren (Schütthöhe, Einbautechnik) einbezogen. Ein bekannter Ansatz ist das Modell von Lauer et al. (2011; SKUDENA-Projekt), welches auf Grundlagen von Belevi und Baccini, 1989 basiert [15]. Solche Modelle eignen sich gut für kurz- bis mittelfristige Emissionsprognose fast aller Schadstoffe sowie für Langzeitprognosen von Schadstoffen wie DOC oder Ammonium, welche wenig von den Deponiebedingungen abhängig sind. Wie sich bei den Laborversuchen gezeigt hat, sind gerade das Verhalten von DOC und Ammonium entscheidend für die Nachsorgedauer einer Deponie.

$$c_a(t) = c_0 \times e^{-\left(\frac{c_0}{m_v} \times \Delta \frac{L}{S} \times h\right) \times t}$$

$c_a(t)$: Mittlere jährliche Sickerwasserkonzentration nach t Jahren (mg/l)

c_0 : Anfangskonzentration aufgrund direkter Auswaschung nach Einstellen eines abnehmenden Trends (mg/l)

m_v : Durch Auswaschung mobilisierbare Stoffkonzentration (mg/kg TS)

$\Delta L/S$: Mittlere Änderung des Wasser/Feststoff-Verhältnisses pro Jahr (l/kg TS/Jahr)

h : Heterogenitätsfaktor der Wasserströmung im Deponiekörper (-)

T : Zeit nach Einstellen eines stabilen Trends (Jahre)

- Reaktive Transportmodelle wie Phreeqc [16], welche Änderungen im Feststoff und im Sickerwasser (pH, Temperatur, Redox und Sorption) berücksichtigen. Solche Modelle dienen für die Erstellung von Langzeitprognosen wo v.a. die Schwermetallmobilisierung nach dem Aufbrauchen des Säurepufferst im Bereich >1000 Jahre von zentraler Bedeutung wird.

Die Nachsorgedauer für Schlackendeponien von 50 Jahren gemäss VVEA geht davon aus, dass ab dann die Konzentrationsgrenzwerte unterschritten werden. Durch die Veränderung des Fließregimes (=Verlagerung präferentieller Fließwege und Durchströmung neuer Bereiche) in der Deponie kann es zur Mobilisierung verbliebener Stoffpotentiale kommen, was zu erhöhten Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser führt. Im Umfang der Erstellung von Langzeitprognosen gilt es nebst der Beurteilung der Einhaltung von Einleitgrenzwerten in Oberflächengewässer deshalb auch das verbleibende Schadstoffpotential im Deponiekörper zu ermitteln und die Stofffrachten in Relation mit Industrieabwässern und Landwirtschaftszahlen zu bringen.

5. Fazit und Ausblick

Nach einem Jahr intensiven Monitorings des Trockenschlackenkompartiments Chrüzlen kann ein erstes positives Fazit gezogen werden. Die verbauten Installationen liefern zuverlässige Messdaten und es kam zu keinen nennenswerten Störungen des Betriebs. Aufgrund der kurzen Ablagerungsdauer und des kontinuierlichen Einbaus nur eines Teilstroms der Trockenschlacke sind allgemeine Aussagen zum Ablagerungsverhalten der Gesamtschlacke basieren auf den vorhandenen Monitoringdaten schwierig. Vieles deutet darauf hin, dass das Ablagern aller vier Restschlackenfraktionen der ZAV Recycling AG einen positiven Effekt auf die Stabilität und Nachsorgedauer eines Trockenschlackenkompartiments hat. Die magnetische Schlacke mit einem Anteil von ca. 30% zeigt die tiefsten Schadstoffemissionen aller Fraktionen und das Beimischen des Schlackenstaubs (ca. 10%) trägt zu einer zusätzlichen Stabilisierung und höheren Einbaudichte bei.

Aus dem flächen- und zeitaufgelöste Ammoniakmonitoring der Umgebungsluft im nahen Umfeld des Kompartiments in Chrüzlen wird ein positives Fazit gezogen. Die gemessenen Konzentrationen bewegen sich im Zentrum des Kompartiments im Bereich <15 ppm Ammoniak mit einer deutlichen Konzentrationsabnahme am Rand der Deponie. Neben der Trockenschlacke konnten zudem Pferdestallungen als Ammoniakquelle identifiziert werden. Die durchgeführte Anwohnerumfrage zeigte, dass einzig in nordöstlicher Richtung des Trockenschlackenkompartiments, je nach Windverhältnissen, eine Geruchsbelästigung auftritt. Es ist davon auszugehen, dass mit dem Abschluss des Schlackeneinbaus und der Rekultivierung des Kompartiments sich die Situation deutlich verbessern wird.

Beim Schadstoffaustrag via Sickerwasser ist die Erkennung von Konzentrationstrends aufgrund des geringen Alters des Kompartiments schwierig. Durchschnittlich werden 35% des infiltrierten Niederschlags als Sickerwasser ausgetragen und ein abnehmender Trend für die Konzentrationen von Ammonium, Nitrit, Kupfer und DOC ist bereits erkennbar. Die gemessenen DOC-Konzentrationen im Sickerwasser entwickeln sich seit 2016 von sehr hohen Jahresmittelwerten von ± 600 mg/l hin zu Werten von durchschnittlich 180 mg/l im Jahr 2019. Dieser Verlauf entspricht einer normalen Entwicklung von jungen Deponien wie man es von Nassschlackenkompartimenten her kennt. Aufgrund der initial hohen Konzentrationswerte und der tiefen Grenzwerte für die Einleitung in Oberflächengewässer (DOC 10 mg/l) ist der DOC und auch die Stickstoffverbindungen Ammonium und Nitrat im Sickerwasser entscheidend für die Nachsorgedauer von Schlackenkompartimenten. Da es sich bei Trockenschlacke um einen Stoffstrom handelt für welchen längere Zeitreihen von Deponiedaten fehlen, ist ein Vergleich der Resultate dieser Studie mit Daten von nass ausgetragener Schlacke wichtig. Ein bis Ende 2019 erwarteter technischer Bericht zur Qualitätsentwicklung von Schweizer Schlacken (Dissertation Andreas Glauser, Universität Bern) wird die mittelfristige Sickerwasserentwicklung diverser aufbereiteter Schlackenfraktionen (u.a. auch alle der ZAV-Recycling AG) basierend auf Batch- und Säulentests detailliert thematisieren.

In Bezug auf die Durchführung von Gefährdungsabschätzungen von Schlackendeponien werden bis im Sommer 2020 längere Zeitreihen von Deponiedaten ausgewertet und physikalisch-chemische Modellansätze für Emissionsprognosen getestet und weiterentwickelt. Im Fokus des Projekts steht dabei die Ermittlung von Auswirkungen veränderter Bedingungen durch das fortschreitende Alter der Deponie auf die Freisetzung spezifischer Schadstoffe. Im Umfang der Erstellung von Langzeitprognosen gilt es nebst der Beurteilung der Einhaltung

von Einleitgrenzwerten in Oberflächengewässer auch das verbleibende Schadstoffpotential im Deponiekörper zu ermitteln. Um die Schadstoffdynamik und die effektiven Frachten detaillierter zu ermitteln sind des Weiteren Sickerwasserbeprobungen bei unterschiedlichem Sickerwasseranfall, z.B. nach Niederschlagsereignissen und nach längeren Trockenperioden durchzuführen.

Bei der Stiftung ZAR laufen aktuell Versuche zur Qualitätsverbesserung der Restschlacke aus der Trockenschlackenaufbereitung im Hinblick auf eine nachsorgereimere Ablagerung. Erste Versuche die Restschlacke auf einer Bodenwaschanlage zu behandeln haben sich als sehr vielversprechend herausgestellt. Im Hinblick auf den Bau einer Pilotanlage, werden in einer Vorstudie zurzeit geeignete Korngrößenfraktionen für eine Wäsche ermittelt und Möglichkeiten für die Behandlung des anfallenden Waschwassers abgeklärt.

6. Literatur

1. Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen. 2016: p. 1–46.
2. Amt für Abfall Wasser Energie und Luft (AWEL), Massnahmenplan Abfall- und Ressourcenwirtschaft 2019_2022. 2019: p. 1–63.
3. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Gefährdungsabschätzung bei Deponien (Entwurf). 2019: p. 1–66.
4. Cultrone, G., et al., Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing. *European Journal of Mineralogy*. 2001. 13(3): p. 621–634.
5. Cassina, E., Geotechnik Restschlacke. 2017: p. 1–13.
6. Speiser, C., Exothermer Stoffumsatz in MVA-Schlackendeponien: Mineralogische und geochemische Charakterisierung von Müllverbrennungsschlacken, Stoff- und Wärmebilanz. Technische Universität München. 2001: p. 1–262.
7. Baccini, P., Bader, H.P., Belevi, H., Ferrari, S., Gamper, B., Johnson, A., Kersten, M., Lichtsteiger, T., Zeltner, Ch., Deponierung fester Rückstände aus der Abfallwirtschaft. 1993: vdf.
8. Saffarzadeh, A., Arumugam, N., Shimaoka, T., Aluminium and aluminium alloys in municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash: A potential source for the production of hydrogen gas. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. 41: p. 820–831.
9. Forschungsstelle für Umweltbeobachtung, Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz 2000–2017. 2018: p. 1–74.
10. Gewässerschutzgesetz (GSchV). 1998. 814.201.
11. Kjeldsen, P., et al., Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2002: 32(4), p. 297–336.
12. Amt für Abfall Wasser Energie und Luft (AWEL), Qualität von Sickerwasser aus Züricher Schlackekompartimenten. 2010: p. 1–30.
13. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Anforderungen an die Einleitung von Deponiesickerwasser. Vollzugshilfe. 2012: p. 1–64.
14. Laner, D., Fellner, J., Brunner, P.H., Standortbezogene Kriterien zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Deponieemissionen unter dem Aspekt der Nachsorgedauer (Projekt SKUDENA), TU Wien. 2011: p. 1–506.
15. Belevi, H., Baccini, P., Long-Term Behavior of Municipal Solid Waste Landfills. *Waste Manag Res*. 1989. 7(1): p. 43–56.
16. Parkhurst, D.L. and C.A.J. Appelo, Description of input and examples for PHREEQC version 3 — A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*. 2013: Book 6, p. 497.

7. Anhang

7.1. Methodik

Die Resultate aus dem Sickerwasser- und Schlackenmonitoring stammen von der Bachema AG. Die Bestimmung der Hauptchemie und -mineralogie sowie die Säulentests wurden am Institut für Geologie der Universität Bern durchgeführt.

7.1.1. Hauptchemie

Die chemische Zusammensetzung der Restschlackenfraktionen wurde mittels Röntgenfluoreszenzanalyse auf einem PANalytical Omnia WD-XRF an der Universität Fribourg bestimmt. Dazu wurden 6.00 g der gemahlene Schlacke mit 1.44 g Bindemittel (Hoechst Wachs) vermengt und zu einer Pulverpille gepresst.

7.1.2. Hauptmineralogie

Die kristallinen Phasen der getrockneten und gemahlene Schlackenproben wurden mittels Röntgendiffraktion (XRD) bestimmt. Dabei wurde 20 gew.-% Korund (Al_2O_3) als interner Standard beige-mischt und die Proben hochauflösend von $5-75^\circ$ 2Theta auf einem XPert-Pro MPD von Panalytical gemessen. Die relativen Anteile der kristallinen Phase (inkl. Korund) wurden mittels Rietfeldverfeinerung bestimmt, die absoluten Gehalte der Mineralphasen und die amorphen Anteile wurden über den «Sollwert» des internen Standards berechnet.

7.1.3. 24h-Batchtests nach VVEA

Beim statischen VVEA-Eluattest handelt es sich um zwei Versuche welche mit einem Feststoff-Wasser-Verhältnis von 1:10 durchgeführt werden:

- Test 1: In die Suspension aus Wasser und Feststoff werden 50ml/min CO_2 während 24h eingeblasen. Im Anschluss wird die Probe gefiltert und Kationen (v.a. Schwermetalle) werden analysiert.
- Test 2: Die Suspension aus demineralisiertem Wasser und Feststoff wird während 24 h überkopfgeschüttelt. Im Anschluss wird die Probe gefiltert und Anionen und organische Bestandteile (z.B. Chromat oder DOC) werden analysiert.

7.1.4. Säulentests nach CEN/TS 14405

Bei diesem dynamische Eluattest nach der europäischen Norm CEN/TS 14405 wird Feststoff in mehreren Schichten in einer Glassäule mit 5 cm \varnothing eingebracht und verdichtet bis 30±5cm Feststoff in der Säule eingebaut sind. Der eigentliche Test erfolgt in 3 Schritten:

- Saturierung: Die Säule wird von unten nach oben (Upflow Perkolation) mit 12 ml/h mit deionisiertem Wasser durchströmt.
- Equilibrierung: Die mit Wasser gesättigte Säule ruht während 72 h, damit sich ein Gleichgewicht einstellt.

- Elution: Nach der Equilibrierung wird das Material kontinuierlich mit 12 ml/h durchströmt und das Eluat wird bei definierten L/S-Verhältnissen gesammelt. Es werden insgesamt 7 Fraktionen mit einem kumulierten L/S von 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5 10 gesammelt, filtriert und anschliessend analysiert.

Die Eluate wurden mit HNO₃ 1% verdünnt und die Kationen mittels ICP-OES (Varian 720-ES) analysiert. Dabei wurde die Elemente Al, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti und Zn gemessen. In einer weiteren wässrigen Verdünnung der Eluatfraktionen wurden die Parameter NH₄, F, Cl, Br, NO₃⁻, PO₄³⁻ und SO₄²⁻ mittels eines Metrohm 850 Professional Ionenchromatographen bestimmt.

7.1.5. Deponiegas

Die Methode der Passivsammler erlaubt die Detektion von sehr geringen Ammoniakkonzentrationen (0.5 µg/m³), wobei kumulative Monatsmittelwerte generiert werden. Wasserstoff und Schwefelwasserstoff wurden bisher mit den Passivsammlern kaum detektiert und deshalb wurde ab Herbst 2017 auf weitere Messung verzichtet.

Im Gegensatz zu den Passivsammlern basiert das Monitoring mit dem DOL 53 Gerät auf dem Prinzip der elektronischen Nase. Diese erlaubt die kontinuierliche Aufzeichnung von Messwerten im Bereich von 0–100 ppm Ammoniak.

Tabelle 15: Eingesetzte Methoden für das Ammoniak-Monitoring auf dem Trockenschlackenkompartiment.

Passivsammler (Passam AG)	Elektrochemische-Ammoniakmessung (Dol-53)
Passive Diffusion der Ammoniak-Moleküle auf das Adsorbiermaterial (Phosphorsäure)	Basierend auf dem Prinzip einer E-Nase. Ammoniakmoleküle erzeugen Spannung
Durchschnittliche Ammoniakkonzentration über Expositionszeit in µg/m ³	Kontinuierliche Aufzeichnung der Messwerte in ppm (ml/m ³)
0.5–400 µg/m ³ (2 Wochen Expositionszeit)	0–70'000 µg/m ³ (0–100 ppm)
0.5–200 µg/m ³ (4 Wochen Expositionszeit)	
Kostengünstig, einfache Installation	Höhere Investitionskosten, Stromversorgung
Januar 2017 bis Dezember 2018	September 2018 bis auf weiteres

7.1.6. Verbau der Temperatursensoren

Vierzehn Sensoren (108 Temperature Probe Campbell Scientific) wurden redundant auf 7 Ebenen in ein Geotextil verbaut. Um die Lebensdauer der Sensoren zu erhöhen, wurden die Sensoren einzeln in Schutzschläuche (PE-LD 7x9 mm, Semadeni) verpackt und mittels Kabelverschraubungen (M16x1.5, Distlrec) verschlossen. Im Bereich der Sensoren wurde auf einer Länge von einem Meter das Geotextil mit Quarzsand verfüllt. Die restlichen Abschnitte zwischen den Sensoren wurden mit Compactonit aufgefüllt. Diese Abdichtung zwischen den einzelnen Horizonten verhindert eine «Verschmierung» des Temperaturprofils. Nach Abschluss der Bohrung wurde das vorbereitete Geotextil in das Bohrloch gelegt und auf den jeweiligen Höhen mit Quarzsand oder Compactonit verfüllt.

7.1.7. Wasserbilanz

Für die Berechnung der Wasserbilanz des Trockenschlackenkompartiments wurden zwei Betrachtungsvarianten angewendet:

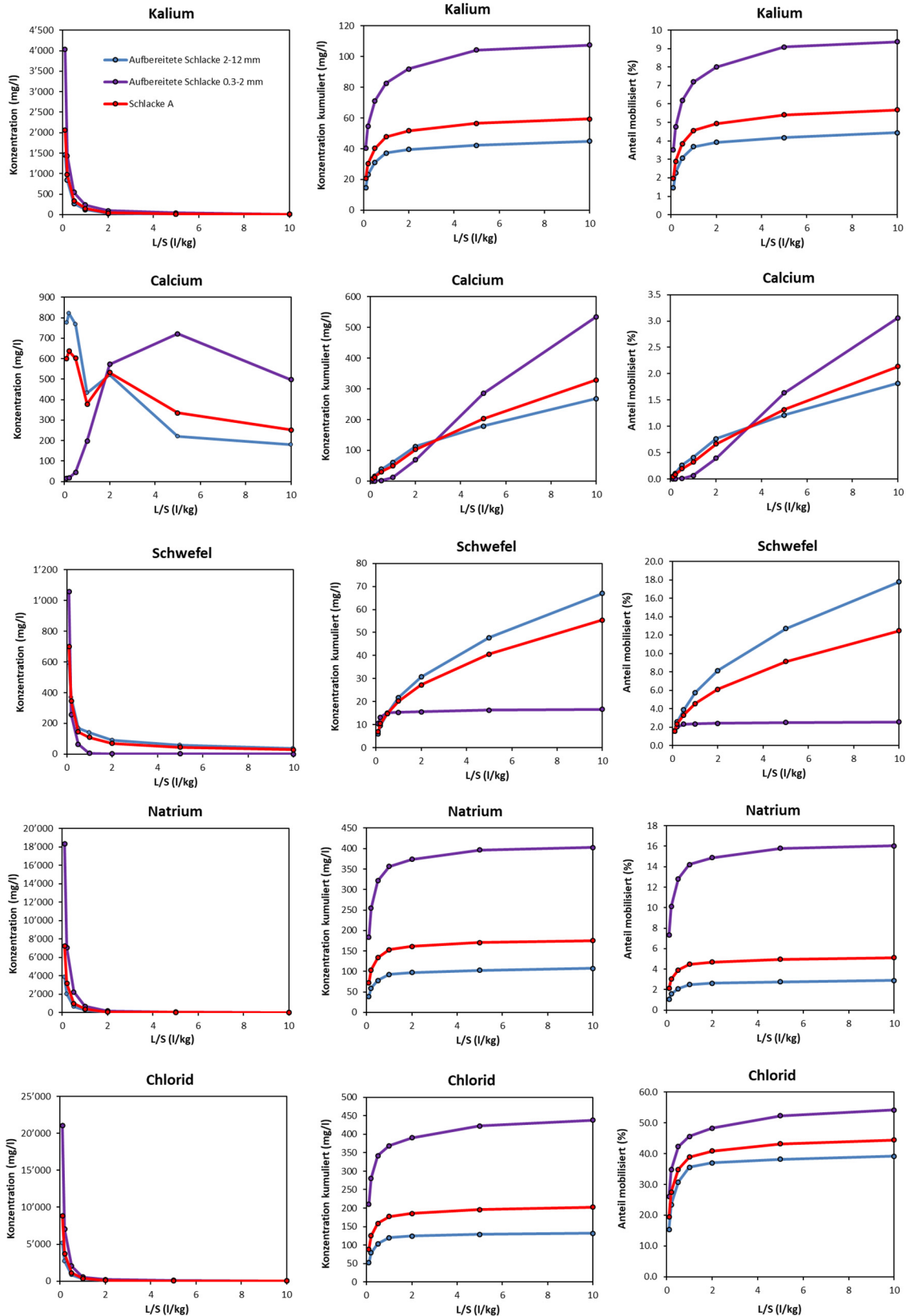
Betrachtung Zeitperiode:

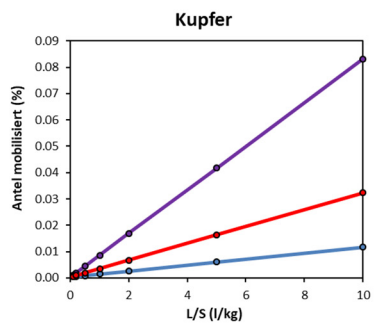
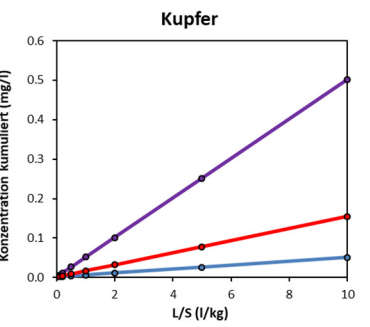
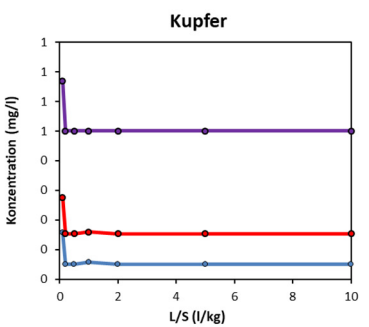
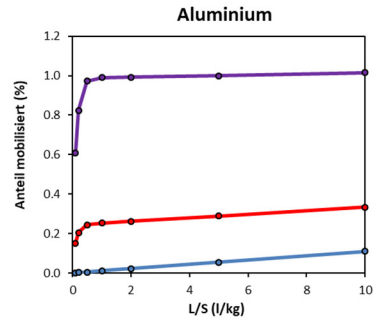
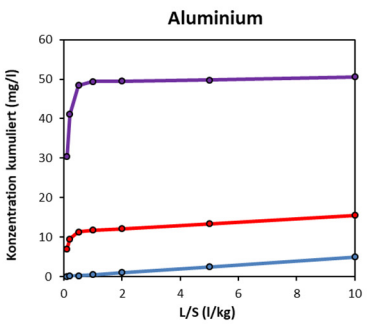
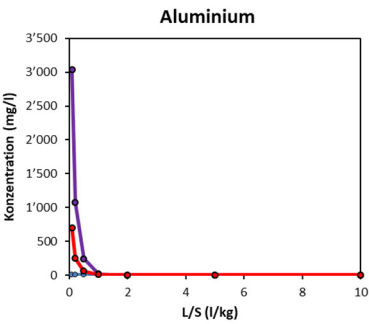
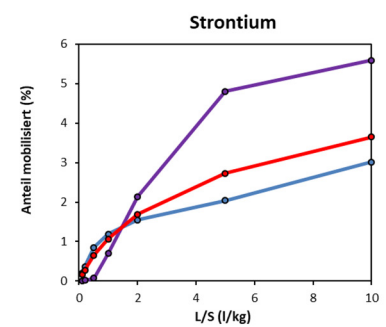
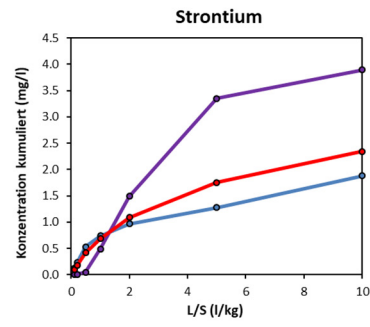
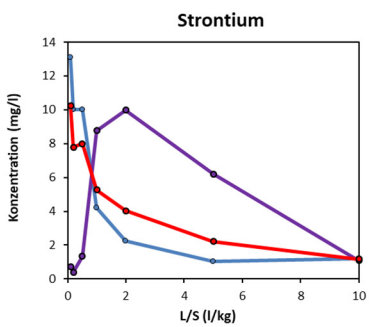
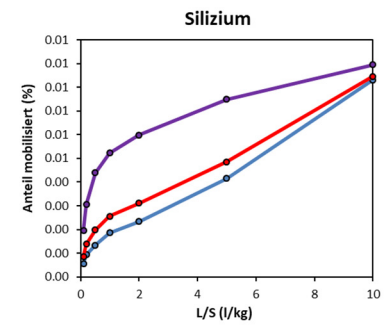
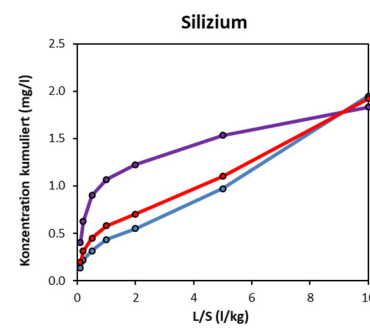
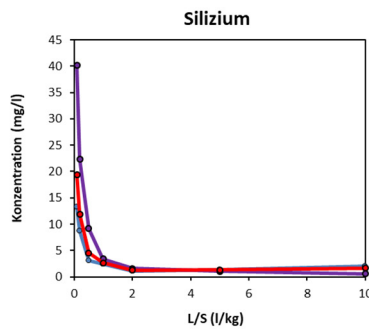
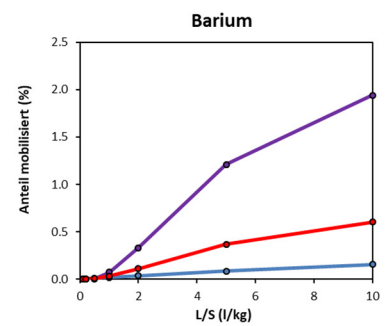
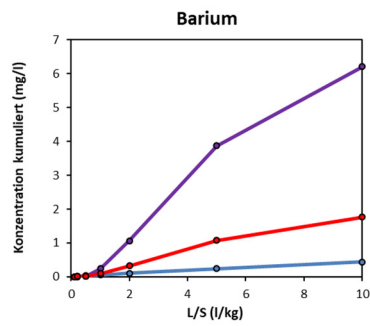
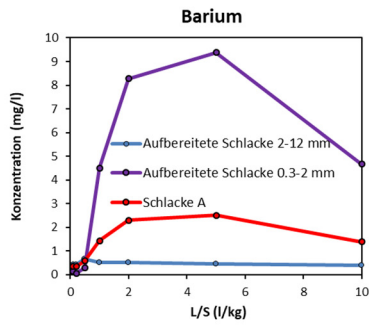
Der technisch einfachere der beiden Ansätze besteht im Aufsummieren der hydrologischen Parameter über eine bestimmte Zeitperiode. Die dadurch erhaltenen Volumina können miteinander verglichen und deren prozentuale Anteile am Niederschlagsvolumen festgestellt werden. Der Nachteil dieses Ansatzes liegt jedoch darin, dass zum Teil nicht korrelierte Abfluss- und Niederschlagsvolumen miteinander verglichen werden. So werden zu Beginn der Periode Abflüsse in die Bilanz miteinbezogen, welche durch ausserhalb des Zeitintervalls liegende Niederschläge ausgelöst wurden. Und umgekehrt werden gegen Ende der Zeitperiode Niederschläge erfasst, die keine Auswirkungen mehr auf die in der Periode liegenden Abflüsse haben.

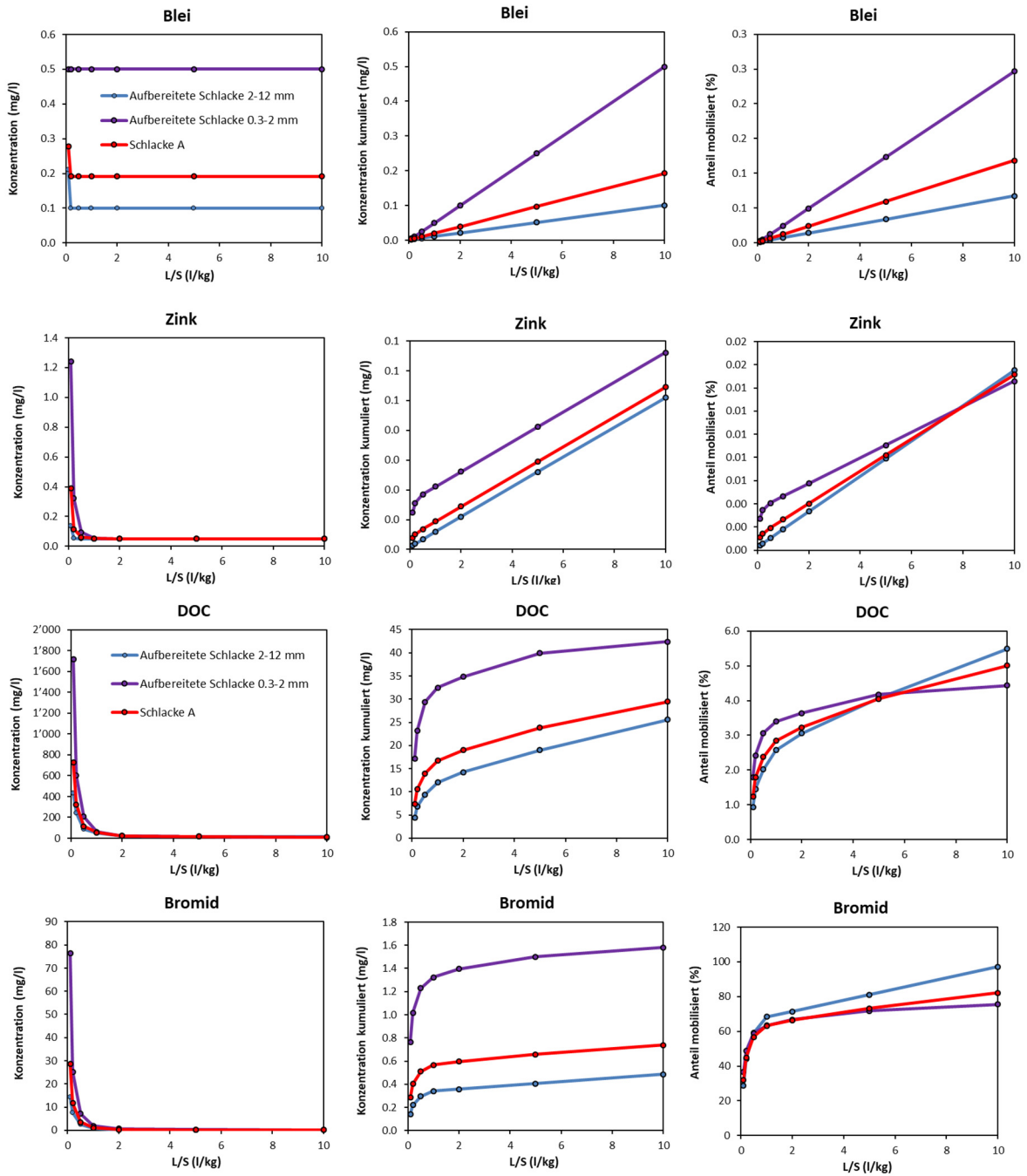
Betrachtung Ereignis:

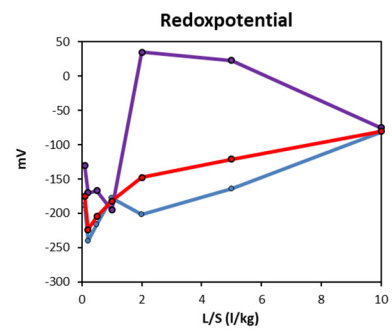
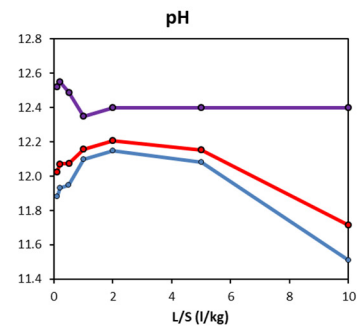
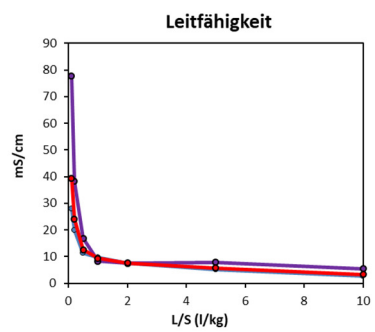
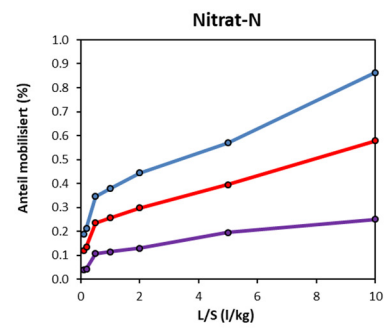
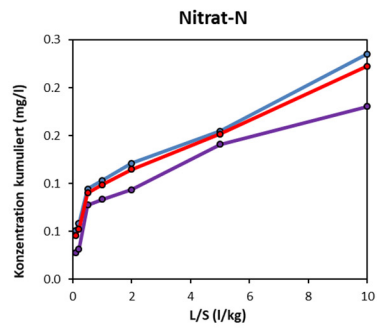
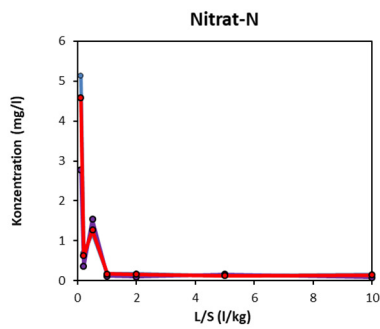
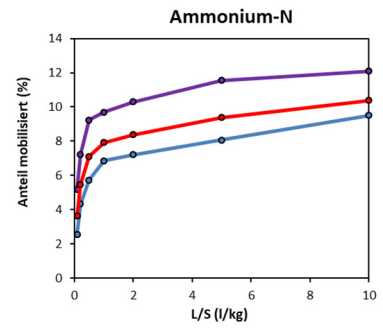
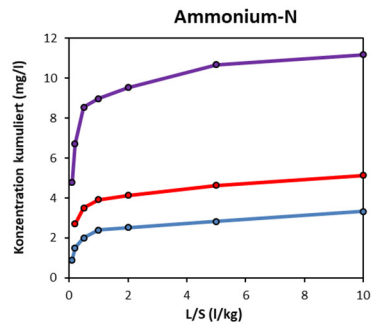
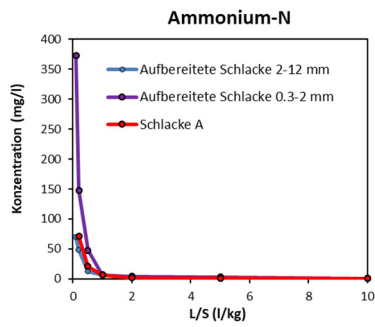
Als Ereignis wird der während einer bestimmten Zeitdauer beobachtete Niederschlag definiert. Mit diesem Ansatz wird jeweils nur ein einzelnes Niederschlagsereignis und der dadurch ausgelöste Abfluss miteinander verglichen. Dazu muss dieser Abfluss einerseits über die Zeitdauer, während der er gemessen wurde, hinaus extrapoliert, andererseits von den, durch vor- und nachherige Ereignisse ausgelösten Abflüssen getrennt werden. Mit diesem Ansatz wurden 8 Niederschlagsereignisse analysiert, welche sich zwischen dem 01. Oktober 2018 und dem 14. Juli 2019 erstrecken.

7.2. Resultate Säulentests nach DIN CEN/TS 14405









7.3. Anwohnerprotokolle Geruchsbelästigung

Wiler Wolfenriet, Esslingen:

Datum	Uhrzeit	Intensität	Art des Geruchs	NH3 (ppm)	Windrichtung ("Grad)	Windrichtung	Windentwicklung	Windgeschw. (km/h)	Niederschlag (mm)	Niederschlags- summe (mm)	Feuchte (%)	Temperatur (°C)
18.01.2019	20.00	stark	Ammoniak	0.38	268	W	Ab 18.00 von N zu W/SW	0.4	0	2.6	87.6	-2.5
25.01.2019	19.00	mittel	Ammoniak	0.23	196	SSW	ganzer Tag SW/SSW	8	0	0	62.7	-3
27.01.2019	19.00	stark	Ammoniak	0.24	270	W	S, ab 18.00 W	4.3	0	0.4	95.8	3.5
29.01.2019	8.00	mittel	Ammoniak	0.23	189	S	W, ab 06.00 S, ab 10.00 N	0.6	0	1	99.9	-1.1
29.01.2019	20.00	stark	Ammoniak	1.59	171	S	W, ab 06.00 S, ab 10.00 N, ab 15.00 SW	2.1	0	1	87.8	-1.9
01.02.2019	9.00	stark	Ammoniak	1.44	172.2	S	S/SW, ab 12.00 N	0.8	0	0	78.3	2.6
04.02.2019	7.15	stark	Ammoniak	0.52	257.1	WSW	N, ab 04.00 W, ab 08.00 N	1.2	0	0.1	100	-3.7
08.02.2019	16.30	stark	Ammoniak	0.53	224.5	SW	ganzer Tag SW	2.2	0	0	69	5.2
09.02.2019	9.00	stark	Ammoniak	0.80	202.7	SSW	ganzer Tag SW	1.1	0	0.3	81.5	4.3
14.02.2019	19.00	stark	Ammoniak	1.61	239.2	SW	SW, ab 09.00 NO, ab 16.00 SW	3.6	0	0	65.1	6
15.02.2019	6.30	stark	Ammoniak	0.52	242.6	WSW	SW, ab 11.00 NO, ab 15.00 SW	1.1	0	0	95.4	0.3
16.02.2019	17.30	stark	Ammoniak	0.54	214	SSW	SSW, ab 08.00 NO, ab 15.00 SW	2.9	0	0	40.7	10.9
17.02.2019	17.30	stark	Ammoniak	1.60	210.7	SSW	SSW, ab 09.00 NO, ab 15.00 SW	1.9	0	0	42.6	10.1
30.03.2019	20.30	stark	Ammoniak	1.25	209.9	SSW	SSW, ab 07.00 NO, ab 20.00 SW	3.8	0	0	29.7	12.4
01.04.2019	21.00	stark	Ammoniak	1.34	240	SW	NW, ab 21.00 SW	2.9	0	0	57.2	12.8
03.04.2019	7.00	stark	Ammoniak	0.54	246.5	WSW	WSW, ab 08.00 N, ab 16.30 W	0.9	0	0	75.5	7.1
01.06.2019	23.00	stark	Ammoniak	2.21	254	WSW	SW, ab 06.00 NO, ab 21.30 WSW	1.5	0	0	53.5	19.4

Datum	Uhrzeit	Intensität	Art des Geruchs	NH3 (ppm)	Windrichtung ("Grad)	Windrichtung	Windentwicklung	Windgeschw. (km/h)	Niederschlag (mm)	Niederschlags- summe (mm)	Feuchte (%)	Temperatur (°C)
18.01.2019	19.30	stark	Ammoniak	0.23	268	W	Ab 18.00 von N zu W/SW	0.4	0	2.6	87.6	-2.5
25.01.2019	19.30	mittel	Organisch	0.48	196	SSW	ganzer Tag SW/SSW	8	0	0	62.7	-3
27.01.2019	18.45	stark	Ammoniak	0.47	270	W	S, ab 18.00 W	4.3	0	0.4	95.8	3.5
29.01.2019	6.45	mittel	Ammoniak	0.23	189	S	W, ab 06.00 S, ab 10.00 N	0.6	0	1	99.9	-1.1
01.02.2019	8.00	stark	Ammoniak	0.53	172.2	S	S/SW, ab 12.00 N	0.8	0	0	78.3	2.6
04.02.2019	7.00	stark	Ammoniak	0.23	257.1	WSW	N, ab 04.00 W, ab 08.00 N	1.2	0	0.1	100	-3.7
08.02.2019	18.00	stark	Ammoniak	1.60	224.5	SW	ganzer Tag SW	2.2	0	0	69	5.2
14.02.2019	18.45	stark	Ammoniak	2.11	239.2	SW	SW, ab 09.00 NO, ab 16.00 SW	3.6	0	0	65.1	6
15.02.2019	6.45	stark	Ammoniak	0.52	242.6	WSW	SW, ab 11.00 NO, ab 15.00 SW	1.1	0	0	95.4	0.3
17.02.2019	18.00	stark	Ammoniak	6.70	210.7	SSW	SSW, ab 09.00 NO, ab 15.00 SW	1.9	0	0	42.6	10.1
01.04.2019	20.30	stark	Ammoniak	1.26	240	SW	NW, ab 21.00 SW	2.9	0	0	57.2	12.8
01.06.2019	22.00	stark	Ammoniak	0.26	254	WSW	SW, ab 06.00 NO, ab 21.30 WSW	1.5	0	0	53.5	19.4

Datum	Uhrzeit	Intensität	Art des Geruchs	NH3 (ppm)	Windrichtung ("Grad)	Windrichtung	Windentwicklung	Windgeschw. (km/h)	Niederschlag (mm)	Niederschlags- summe (mm)	Feuchte (%)	Temperatur (°C)
11.01.2019	-	mittel	Ammoniak	0.80	200	SSW	ganzer Tag S	3	1.6	1.6	98	-1.5
12.01.2019	16.30	mittel	Ammoniak	0.28	138	SE	ganzer Tag S	6.4	0	4.5	100	1.1
15.01.2019	18.30	schwach	Organisch	0.24	180	S	ganzer Tag SW	5.2	0	0.6	95.5	1.4
16.01.2019	15.30	mittel	-	0.35	227	SW	ganzer Tag SW	3.2	0	0	60.5	6
25.01.2019	19.20	schwach	-	0.48	205	SSW	W, ab 06.00 SW	6.9	0	0	67.5	-3.1
27.01.2019	17.45	schwach	-	0.61	136	SE	S, ab 18.00 W	7.7	0	2.5	84.2	4
16.02.2019	20.30	stark	Ammoniak	3.66	261	W	SW, ab 08.00 N, ab 16.30 SW	0.7	0	0	42.6	7.5
17.02.2019	10.00	schwach	Ammoniak	1.61	86.4	E	SW, ab 10.00 N, ab 15.30 SW	1.3	0	0	45.2	7.7
18.02.2019	19.30	schwach	Ammoniak	1.92	214	SSW	SW, ab 09.00 N, ab 15.30 SW	6.1	0	0	42	9.1
20.02.2019	8.00	mittel	Ammoniak	0.80	239	SW	ganzer Tag SW	1.2	0	0	79.2	3.1
31.03.2019	4.00	mittel	-	2.95	223	SW	SW, ab 08.00 SO, ab 10.00 N	2.6	0	0	59.9	7.7