

Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel»

Report**Author(s):**

Frehner, Monika; Huber, Barbara; Gubelmann, Päivi; Zürcher-Gasser, Nora; Zimmermann, Niklaus E.; Braun, Sabine; Scherler, Martin; Zischg, Andreas; Burnand, Jacques; Carraro, Gabriele; Bugmann, Harald; Psomas, Achilleas

Publication date:

2019-04

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000341108>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im
Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel»

Teil 2: «Quantifizierung der Lage von
Standortstypen im Ökogramm»

Monika Frehner, Sabine Braun, Martin Scherler



April 2017

Autoren

Monika Frehner¹, Sabine Braun², Martin Scherler³

¹ Forstingenieurbüro, Sixerstrasse 9, 7320 Sargans

² IAP, Sandgrubenstr. 25/27, 4124 Schönenbuch

³ WSL, Zürcherstr. 111, 8903 Birmensdorf

Ein Projekt-Schlussbericht aus dem Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» von BAFU und WSL (www.wsl.ch/wald_klima).

Projektlaufzeit: 1.12.2014 bis 30.04.2017.

Zitierung

Frehner, M., Scherler, M. & Braun, S., 2017. Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel», Teil 2: Quantifizierung der Lage von Standortstypen im Ökogramm. Sargans. 39 S.

Im pdf-Format zu beziehen über www.wsl.ch/wald_klima

Dank

Wir möchten uns beim Forschungsprogramm Wald und Klimawandel und beim BAFU bedanken für die Finanzierung des Projektes. Sabine Augustin und Peter Brang von der Programmleitung haben das Projekt sehr eng begleitet und viel zu dessen Gelingen beigetragen.

© Forstingenieurbüro Frehner, Sargans, 2017

Inhalt

Zusammenfassung.....	2
Summary	4
1 Einleitung	5
1.1 Ökogramm, NaiS-Standortstypen und ihr Bezug zum Klima	5
1.2 Erkenntnisse aus dem Forschungsprogramm Wald und Klimawandel zum Ökogramm	10
1.3 Projektziele.....	10
2 Modellvergleich WaSiM-ETH und Coup-Modell sowie Evaluation von Trockenheitsindices	11
2.1 Ziele	11
2.2 Methoden.....	11
2.2.1 Untersuchte Indizes.....	12
2.2.2 Modellvergleich.....	13
2.2.3 Durchgeführte Analysen	17
2.3 Resultate des Indexvergleichs.....	18
2.3.1 Resultate des Modellvergleichs	19
2.4 Diskussion.....	22
2.4.1 Kalibrierung / Parametrisierung.....	22
2.4.2 Validierung	22
2.4.3 Transpiration / Evaporation / Interzeption.....	23
2.4.4 Probleme der Modelle	23
2.4.5 Fazit	23
3 Vergleich der Feuchteachse qualitativ mit Trockenheitsindices	25
3.1 Statistische Analyse der Feuchteachse	25
3.2 Graphische Darstellung der Profilstandorte «Trockenheitsindizes vs. NaiS-Standortstypen».....	31
3.3 Diskussion.....	35
4 Ausblick	36
5 Literatur.....	37

Inhalt Anhang (in separatem Dokument)

- Anhang A: Wasser-Submodel von ForClim
- Anhang B: Vergleich der Modelle Coup und WaSiM-ETH
- Anhang C: Trockenheitsindikatoren und Feuchteachse der Ökogramme
- Anhang D: Boxplots und Medianwerte von verschiedenen Trockenheitsindices für NaiS- Standortstypen mit Profilen aus der WSL-Bodendatenbank
- Anhang E: Vergleich der Achse trocken-nass vom qualitativen und quantitativen Ökogramm
- Anhang F: Veränderung des Trockenheitsindex AT/PWU, Vergleich mit zwei methodischen Ansätzen

Zusammenfassung

Waldstandorte werden auf der Grundlage der Vegetationszusammensetzung und von Bodenmerkmalen in Standortstypen eingeteilt. Diese werden entsprechend der gesamthaften Bewertung der Zeigerwerte der Vegetation und mit Hilfe von Eigenschaften des Bodens in Ökogrammen mit den Achsen sauer-basisch (Nährstoffachse) und nass-trocken (Feuchteachse) dargestellt. Für Schweizer Wälder wurden Ökogramme für verschiedene Vegetations-Höhenstufen und Standortsregionen konzipiert, wobei letztere klimatisch/geologisch definierte geographische Einheiten darstellen. Diese Höhenstufen und Regionen waren bislang qualitativ voneinander abgegrenzt worden. Im Teil 1 des Projektes «Adaptierte Ökogramme» wurden diese Grenzen quantitativ mit vorwiegend klimatischen, aber auch geologischen Parametern beschrieben. Darauf aufbauend wurde die Verschiebung der Grenzen bis Ende des 21. Jahrhunderts bei zwei Klimazukünften berechnet. Wechselt nun ein bestimmter Waldstandort infolge dieser Grenzverschiebung die Höhenstufe, bedeutet dies, dass er in einem anderen Ökogramm («Ziel-Ökogramm») liegt. Offen war aber die Frage, ob sich auch dessen Position auf der Feuchteachse ändert.

In Teil 2 des Projektes «Adaptierte Ökogramme» wurde daher diese Frage untersucht: Wird ein heutiger Standort nicht nur in einem anderen Ökogramm, sondern dort auch an einer anderen Position auf der Feuchteachse liegen, was bei Baumartenempfehlungen zu berücksichtigen wäre? Zur Untersuchung dieser Frage wurde die Feuchteachse in qualitative Stufen eingeteilt (von 1 = nass bis 5 = sehr trocken) und statistisch mit Klima- und weiteren Standortparametern modelliert. Als Standortparameter wurden dazu auch zahlreiche Trockenheitsindizes geprüft.

Die im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» verwendeten Trockenheitsindizes wurden deshalb zunächst verglichen und analysiert, um Unterschiede und Gemeinsamkeiten festzustellen. Dies beinhaltete auch einen Vergleich der Modelle WaSiM-ETH und Coup-Modell sowie eine Evaluation mehrerer anderer Trockenheitsindizes, wozu rund 1000 Bodenprofile der WSL und des IAP verwendet wurden. Dann wurde die Feuchteachse mit einer statistischen Analyse untersucht und zudem wurden auf der Grundlage der Coup-Modellierung der 1000 WSL-Profile statistische Masse des Index ATP/PT nach Standortsregionen und Höhenstufen dargestellt (= grafischer Ansatz).

Die statistische Analyse erklärte maximal 60% der Variation der Feuchtestufe der Standortstypen in den Ökogrammen und ergab ökologisch plausible Zusammenhänge. Die wichtigsten Einflussfaktoren waren die Topographie, der Bodenwasserspeicher, die Vernässungsstufe und das Dampfdrucksättigungsdefizit der Luft. Die geprüften Trockenheitsindizes hatten demgegenüber nur einen geringen zusätzlichen Einfluss. Die statistische Analyse und der grafische Ansatz ergaben zudem übereinstimmend, dass Höhenstufe und Standortsregion die Position von Standortstypen auf der Feuchteachse ebenfalls beeinflussen.

Bei Anwendung des statistischen Modells auf die rund 1000 Bodenprofile, bei Annahme von zwei Klimazukünften, zeigte sich, dass die Verschiebung der Höhenstufe die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Position von Standortstypen im Ökogramm weitgehend abbilden kann. Die statistische Modellierung mit den Standortfaktoren ergab nämlich, dass bei Anwendung des A1B-Szenarios/CLM-Modells die weitere Verschiebung der Standortstypen entlang der Feuchteachse im Durchschnitt 0.34 Einheiten bis Ende des 21. Jahrhunderts betrug, beim A1B-Szenario/RegCM3-Modell 0.10 Einheiten, in beiden Fällen in Richtung trockener Verhältnisse. Je nach lokalen Verhältnissen / Standortstypen kann die Verschiebung grösser oder kleiner sein. Die mittleren mit dem A1B-Szenario/CLM-Modell berechneten Verschiebungen von

Waldstandorten entlang der Feuchteachse sind zu gering, um im Ökogramm der «neuen» Höhenstufe die Baumarten des nächsttrockeneren Standortstyps zu empfehlen. Im Ziel-Ökogramm liegt daher der Standortstyp grundsätzlich am gleichen Ort wie im Ausgangs-Ökogramm. Befinden sich im Ziel-Ökogramm an der Stelle des ursprünglichen Standortstyps im Ausgangs-Ökogramm mehrere Standortstypen, soll der trockenere Standortstyp gewählt werden.

Summary

Site types are classified based on vegetation composition and soil characteristics. Based on an integrated evaluation of plant indicator values and soil parameters, they are depicted in ecograms along two axes, one axis representing nutrient supply (expressed as soil reaction from acid to alkaline), the other representing the site humidity (from humid to arid). In Switzerland, such ecograms have been defined for different ecoregions and altitudinal vegetation belts. To date, the altitudinal limits of these regions and belts were defined qualitatively. In the first part of the project 'Adapted Ecograms' these limits were modelled quantitatively based on primarily climatic but also geological variables. Shifts of the altitudinal vegetation belt limits towards the end of the 21st century caused by climate change were estimated using two projections of the future climate. If a certain site type changes its altitudinal vegetation belt according to these estimations, this means it is then located in the respective ecogram ('target ecogram'). The question remained whether its position along the humidity axis in the new ecogram changes as well, compared to the position in the initial ecogram.

The aim of the second part of the project 'Adapted Ecograms' was therefore to investigate if a site type will be subject to a shift along the humidity axis in future climates, in addition to its future location in another ecogram. If so, the recommendation for the species composition of this site type would change as well. To answer this question, the qualitatively defined humidity levels (1 = humid to 5 = arid) of site types were statistically modelled based on climate and other site factors. This involved testing a suite of drought indices as site factors.

The drought indices used in the research programme 'Forests and Climate Change' were first of all analysed to detect similarities and differences. This included the comparison of the two simulation models 'WaSim-ETH' and 'Coup-Model', as well as the evaluation of several other drought indices. Around 1000 soil profiles of WSL and IAP were used for the analysis. Subsequently, the humidity axis was analyzed statistically. In addition, the statistical parameters of the ATP/PT index of the 'Coup model' were plotted according to ecoregion and altitudinal belt (= graphical approach).

The statistical models explained at most 60 % of the variation of the humidity level of a site type in the ecograms and revealed ecologically plausible patterns. The most important factors were topography, soil water storage capacity, degree of soil wetness and vapour pressure deficit of the air. All drought indices investigated had only a minor additional influence. Furthermore, the statistical analysis and the graphical approach showed that the altitudinal belt and the ecoregion both influence the position of site types along the humidity axis of the ecogram.

Using the statistical model for the ca. 1000 soil profiles, and assuming the two projections of the future climate, it could be shown that the shift of the altitudinal vegetation belt can reflect most of the climate change impact on the position of the site type within the ecogram. The statistical models, which included the site factors, revealed an average shift of 0.34 units, using the A1B scenario / CLM climate model, and a shift of only 0.10 units if the A1B scenario / RegCM3 climate model was used. In both cases, a shift towards drier conditions was calculated. The magnitude of the shift varied depending on local conditions and site type. The mean shift modelled with the CLM model is too small to base species recommendations for a certain site type on the adjacent drier site type in the future altitudinal belt. In the 'target ecogram' a site type should therefore be chosen at the same position in the ecogram. If several site types exist at the position in the target ecogram, then the drier one should be chosen.

1 Einleitung

1.1 Ökogramm, NaiS-Standortstypen und ihr Bezug zum Klima

Unter dem «Standort» eines Baumbestandes verstehen wir die Gesamtheit aller Einflüsse, die auf die Bäume eines Waldbestandes wirken, wie Klima, Geologie, Bodeneigenschaften, Topographie, Lawinen, Steinschlag etc. Diese Einflüsse können sich im Raum kontinuierlich oder abrupt ändern. Da es schwierig ist, ein System mit mehreren Gradienten darzustellen, werden Standortstypen beschrieben, die durch floristische, standörtliche und strukturelle Merkmale charakterisiert sind und in deren Beschreibung ein ähnlicher realer Standort erkannt werden kann (nach Ott et al. 1997).

Die Darstellung verschiedener Standortstypen (Waldgesellschaften) in einem Ökogramm hat eine lange Tradition. Schon in Frehner (1963) ist ein Ökogramm mit den beiden Achsen Wasserversorgung sowie Nährstoffversorgung bzw. Bodenazidität dargestellt. In Ellenberg und Klötzli (1972) wurden zum ersten Mal alle Waldstandorte der Schweiz mit den Nummern 1 – 71 zusammengefasst und in Ökogrammen dargestellt. In den folgenden Jahrzehnten wurden in vielen Kantonen Waldgesellschaften und -standorte in lokalen Schlüsseln beschrieben.

Frey (1995) schreibt: «Ökogramme sind ein wichtiges Hilfsmittel zur Charakterisierung eines Standortes. Obwohl methodisch häufig nicht genau nachvollziehbar (z. B. Ellenberg und Klötzli 1972), sind die darin wiedergegebenen Vorstellungen für eine Felddiagnose von grossem Wert. ... Die Abszisse des Ökogrammes gibt den «Basenreichtum» eines Standortes an und nicht wie in einigen Arbeiten (...) die Nährstoffverfügbarkeit. Der «Basenreichtum» stellt eine Synthese aus organischer Auflage des Bodens und Zustand der mineralischen Bodenhorizonte, insbesondere der Durchmischung des organischen Materials, dar. Die Ordinate gibt ... den Feuchtegehalt des Standortes an. Die genaue Lage [einer Waldgesellschaft] in den Ökogrammen entspricht einer gutachtlichen Gesamt-Interpretation der Zeigerwerte des vorhandenen Aufnahmematerials, der zur Verfügung stehenden Bodenansprachen und den idealtypischen Standortsvorstellungen. Die Achsen, namentlich die Abszisse, sind nicht linear, sie geben lediglich die relative Stellung der Einheiten untereinander wieder. ... Aus der Stellung der Einheiten kann somit nicht direkt auf bestimmte Bodenmerkmale, pH-Verhältnisse, mittlere Zeigerwerte etc. geschlossen werden. ... Aus den Abständen der Kästchen darf nicht a priori auf die ökologische Breite der Einheit geschlossen werden.»

Bei der Erstellung der Wegleitung «Minimale Pflegemassnahmen für Wälder mit Schutzfunktion» (Wasser et al. 1996) wurde klar, dass konkrete Empfehlungen für die Schutzwaldpflege nur in Abhängigkeit vom Standort erarbeitet werden können. Da in den kantonalen Schlüsseln inzwischen die Standorte deutlich vollständiger und differenzierter erfasst waren als in Ellenberg und Klötzli (1972), wurde eine Synthese der kantonalen Schlüssel für Gebirgsstandorte erstellt. In Anhang 2A der Wegleitung NaiS («Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald», Frehner et al. 2009) wurden alle in den kantonalen Schlüsseln der Schweiz beschriebenen Standortstypen NaiS-Standortstypen zugeteilt, mit Ausnahme einiger Spezialstandorte wie der Auenwälder. Im Projekt «NaiS-LFI: Zuordnung der LFI-Stichprobenpunkte zu Waldgesellschaften» (2013 – 2019) werden die NaiS-Standortstypen soweit ergänzt, dass alle LFI-Stichprobenpunkte einem NaiS-Standortstyp zugeordnet werden können. Die NaiS-Standortstypen sind heute deshalb nicht mehr auf den Schutzwald beschränkt, es gibt für jeden Kanton Tabellen mit der Übersetzung der kantonalen Standortstypen in NaiS-Standortstypen, so dass jeweils auch die kantonalen Kommentare und Baumartenempfehlungen verwendet werden können.

Damit die Anzahl NaiS-Standortstypen für den Anwender überschaubar bleibt, wurde die Schweiz in Standortsregionen unterteilt (Abb. 1).

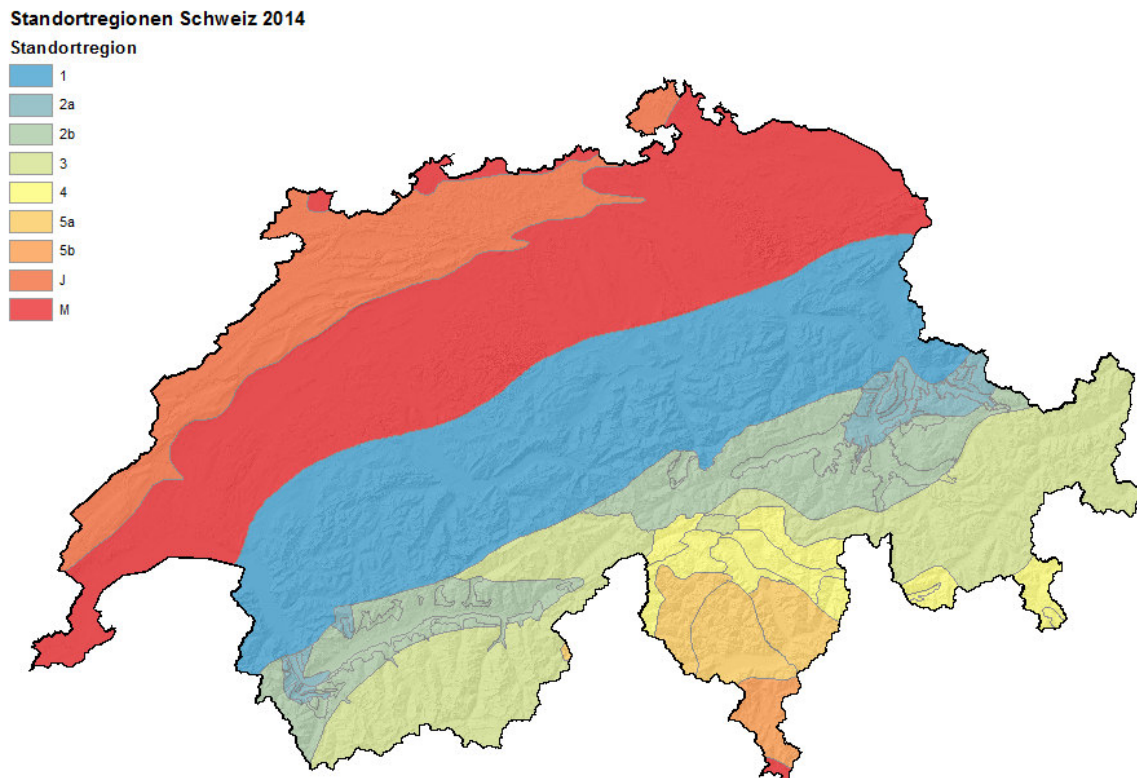


Abb. 1: Überarbeitete Karte der NaiS-Standortsregionen. Legende: 1 = Nördliche Randalpen, 2a = Nördliche Zwischenalpen mit Buche, 2b = Nördliche Zwischenalpen ohne Buche, 3 = Kontinentale Hochalpen, 4 = Südliche Zwischenalpen, 5a = Südliche Randalpen mit Fichte/mit Fichtenvorposten, 5b = Südliche Randalpen ohne Fichte, J = Jura, M = Mittelland. Anmerkung: In Regionen 3 und 4 keine Buchenvorkommen. Quelle: Huber et al. (2015).

Die Grenze Jura - Mittelland folgt der geologischen Grenze zwischen Jura und Molasse. Die Grenze zwischen dem Mittelland und den nördlichen Randalpen wurde so gelegt, dass im Mittelland keine subalpinen Höhenlagen auftreten. Die 3 Standortsregionen Jura, Mittelland und nördliche Randalpen weisen alle einen ozeanischen Klimatyp auf. Die nördlichen Zwischenalpen weisen einen ozeanischen bis kontinentalen Klimatyp auf, an der Grenze von 2a zu 2b kommt die Buche klimatisch an ihre Grenze. Die Grenze zwischen den nördlichen Zwischenalpen und den kontinentalen Hochalpen wurde so gelegt, dass in den kontinentalen Hochalpen keine colline Höhenstufe auftritt. Die kontinentalen Hochalpen weisen einen kontinentalen Klimatyp auf. Die südlichen Zwischenalpen weisen einen insubrischen bis kontinentalen Klimatyp auf, die südlichen Randalpen einen insubrischen Klimatyp, die Grenze zwischen diesen beiden Standortsregionen liegt an der klimatischen Grenze der Buche. Je nach Standortsregion treten unterschiedliche Höhenstufen auf (Abb. 2).

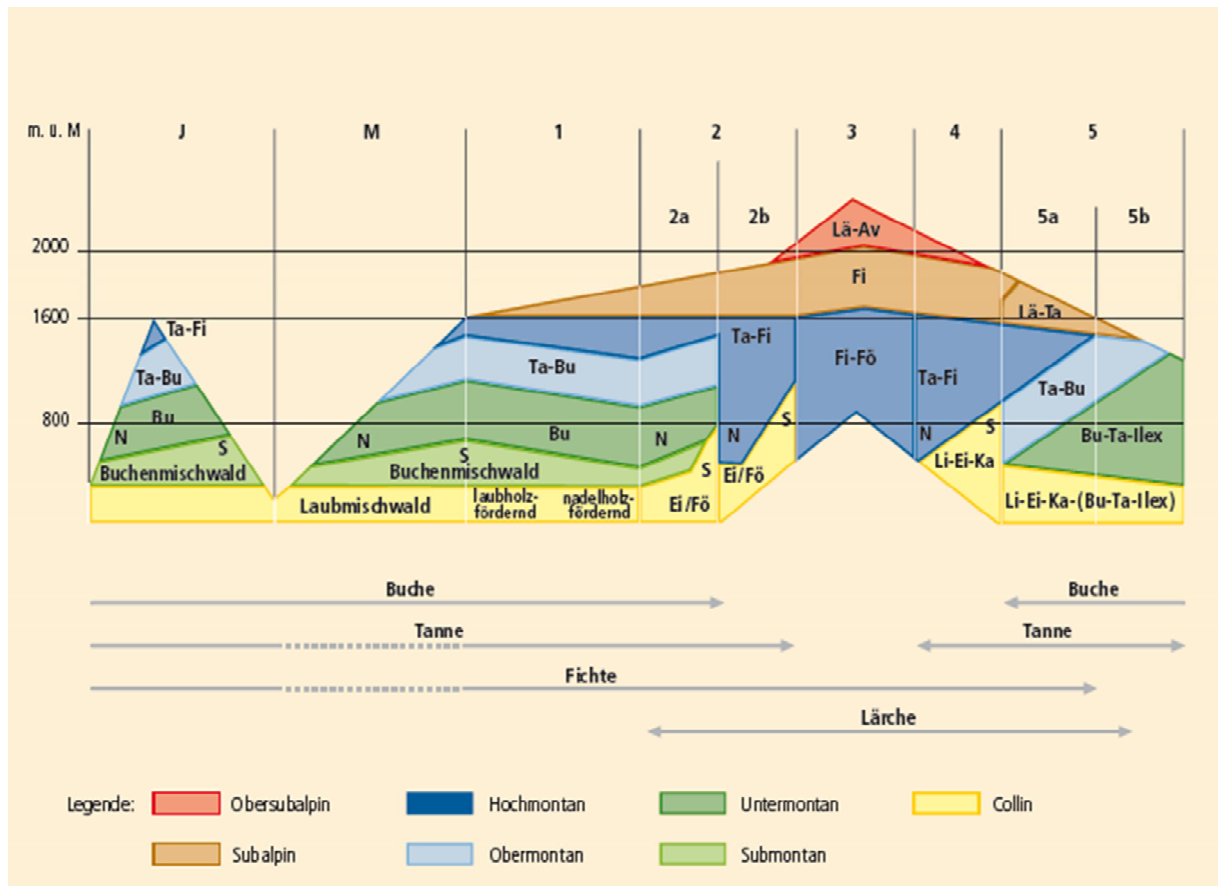


Abb. 2: Höhenstufen in den verschiedenen Standortsregionen, aus Frehner et al. (2009).

Die Grenzen der Höhenstufen werden durch das Wuchsverhalten von Baumarten definiert (Abb. 3).

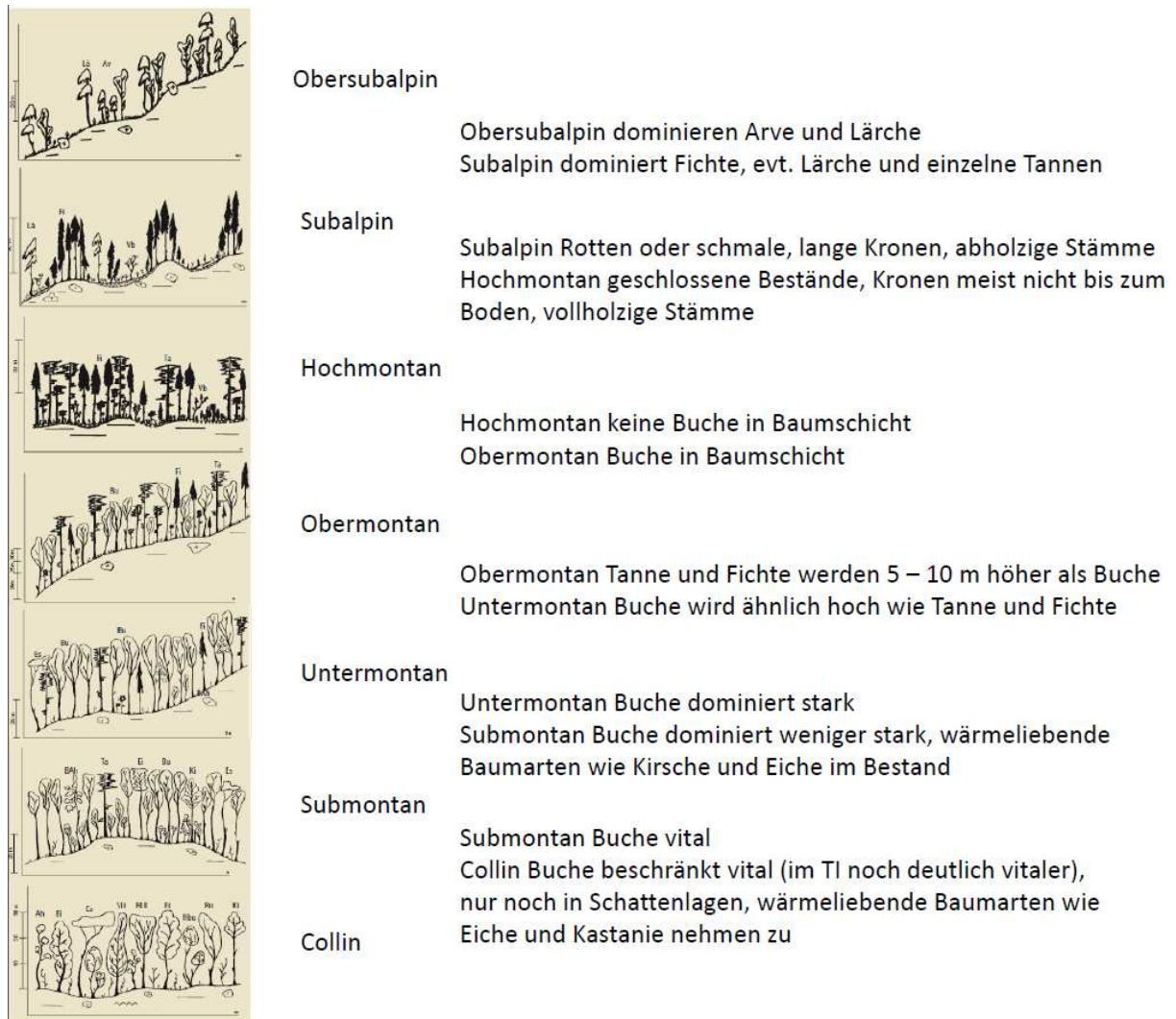


Abb. 3: Kriterien für die Abgrenzung der Höhenstufen auf wüchsigen Standorten, die idealisierten Bestandesprofile sind von H. U. Frey (in Frehner et al. 2009) gezeichnet.

Im Projekt «Mit welchen Klimaparametern kann man Grenzen plausibel erklären, die in NaiS verwendet werden um Ökogramme auszuwählen?» (Huber et al. 2015) wurden einige Grenzen zwischen Standortsregionen und die Höhenstufengrenzen mit klimatischen Parametern beschrieben. Es zeigte sich ein deutlicher Zusammenhang mit der Temperatur, in den unteren Lagen (z. B. Grenze collin – submontan auf der Alpennordseite) besteht auch ein deutlicher Zusammenhang zum Trockenheitsindex ET_a/ET_p (aktuelle zu potentielle Evapotranspiration). Damit ist es nun möglich, diese Grenzen mit Klimaszenarien in die Zukunft zu projizieren.

Pro Standortsregion und Höhenstufe ist bei den NaiS-Standortstypen ein Ökogramm definiert, ein Beispiel ist in Abb. 4 dargestellt.

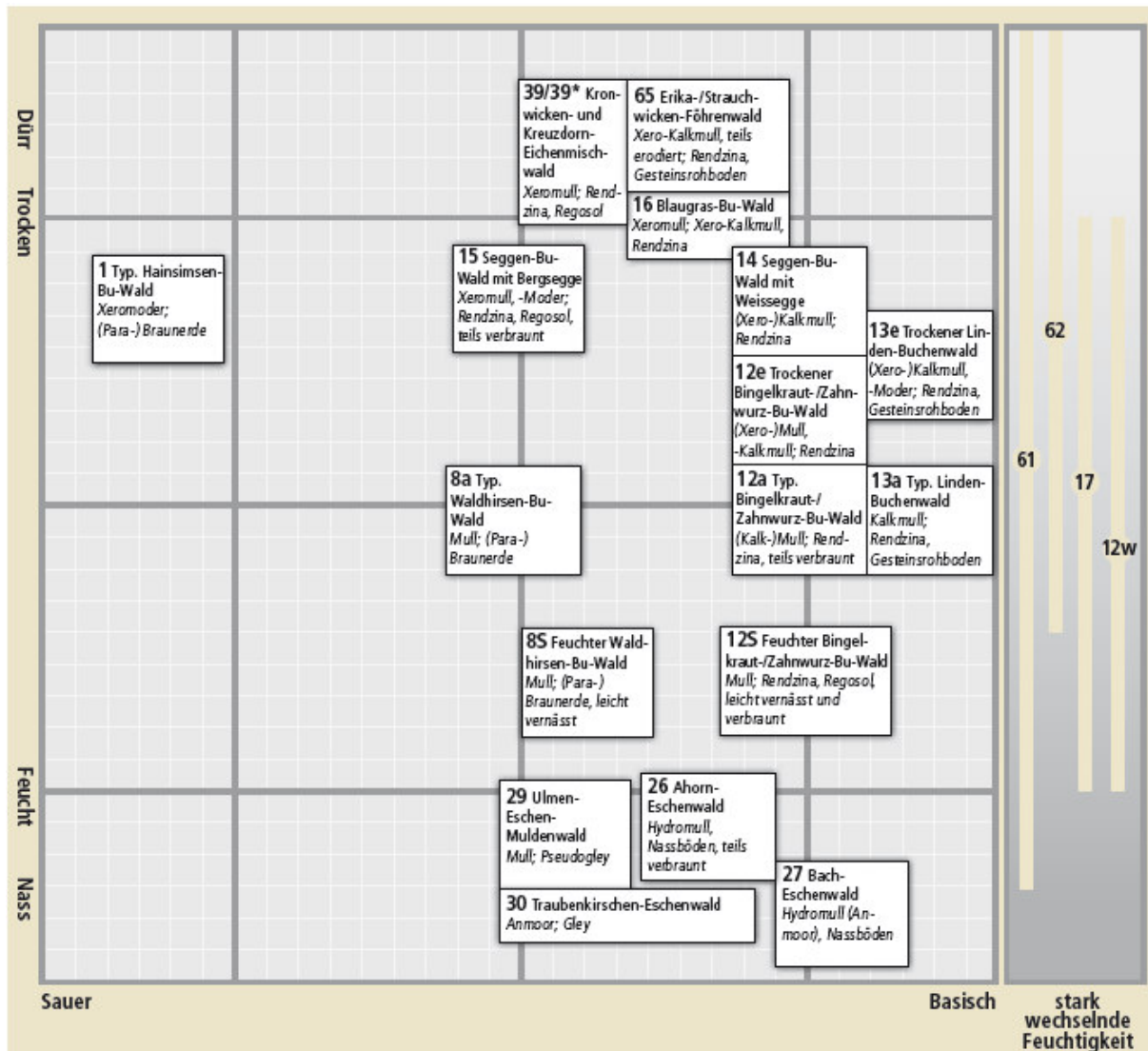


Abb. 4: Ökogramm mit NaiS-Standortstypen für die untermontane Stufe der Region Jura aus Frehner et al. (2009), inzwischen wurden noch folgende zusätzliche Standorte erfasst: 2, 8d, 8* und 41*.

Die Achse sauer – basisch wird vor allem von den Eigenschaften des Bodens inkl. dem geologischen Ausgangsgestein und der Topografie beeinflusst. Im Feld wird sie mit Hilfe von Zeigerpflanzen, Humusform, Karbonatgehalt von Skelett und Feinerde sowie pH der Feinerde bestimmt.

Die Achse nass - trocken beschreibt summarisch die Wasser-Verfügbarkeit an einem Standort. Sie wird vor allem von den Eigenschaften des Bodens und der Topografie beeinflusst. Die Niederschlagsverhältnisse spielen demgegenüber wahrscheinlich eine geringere Rolle. Im Feld wird diese Achse mit Hilfe von Zeigerpflanzen inkl. Wüchsigkeit der Bäume und vor allem im unteren Teil des Ökogrammes auch mit Hilfe von Bodeneigenschaften (Vernässungsmerkmalen) bestimmt.

1.2 Erkenntnisse aus dem Forschungsprogramm Wald und Klimawandel zum Ökogramm

Die beiden Projekte «Böden und Wasserhaushalt von Wäldern und Standorten der Schweiz unter heutigem und zukünftigem Klima (BOWA-CH)» von Walthert et al. (2016) und «Die Eignung verschiedener Trockenheitsindices zur Abschätzung des Trockenheitsrisikos für den Wald und ihre standortspezifische Entwicklung bis 2050/2100» von Braun (2016), die im Rahmen des Forschungsprogramms Wald und Klimawandel bearbeitet wurden, ergaben eine Reihe von Erkenntnissen zur Verortung von NaiS-Standortstypen im Ökogramm.

Gemäss Walthert et al. (2016) bestehen sowohl zwischen dem pH in 0 – 40 cm Tiefe als auch der Basensättigung in 0 – 40 cm Tiefe gute Beziehungen zur Achse sauer - basisch, allerdings werden die Standortstypen in der Mitte der Achse sauer – basisch in der Auswertung schlecht abgebildet. Der Hauptgrund dafür ist, dass die mittleren pH-Bereiche (ca. 4.5 bis 6.0) aufgrund meist geringer Kapazität des vorherrschenden Pufferbereichs schneller durchlaufen werden, weshalb es vergleichsweise weniger Standortstypen in diesen Bereichen gibt. Nach Braun (2015) wird bei der Achse sauer - basisch 65.6% der Varianz durch die Basensättigung erklärt. Im Projekt «Adaptierte Ökogramme» wurde auf eine weitergehende Quantifizierung der Achse sauer – basisch verzichtet.

Aufgrund der Erkenntnisse von Braun (2015) ist zu erwarten, dass es eine statistische Beziehung zwischen der Lage von Standortstypen entlang der Achse trocken – nass (Feuchteachse) und Trockenheitsindizes gibt, dass sie aber nicht sehr eng ausfällt. Massgebend ist vor allem die Vernässung des Bodens.

1.3 Projektziele

Das Hauptziel des Projektes besteht darin, die Ökogrammachse trocken-nass mit Trockenheitsindizes, Klima- und Standortparametern zu beschreiben und zu quantifizieren. Dies ist erforderlich um zu klären, ob und wie sich die NaiS-Standortstypen entlang der Feuchteachse verschieben, wenn sie mit dem Höhenstufenmodell von Abenis (Gubelmann et al., 2019) mit den beiden gewählten Klimazukünften einer «neuen» Höhenstufe zugeordnet werden. Da im Forschungsprogramm Wald und Klimawandel verschiedene Trockenheitsindices verwendet wurden, werden in einem ersten Kapitel diese Trockenheitsindizes, die zudem mit zwei Wasserhaushaltsmodellen (WaSiM-ETH und Coup) berechnet wurden, miteinander verglichen.

In einem weiteren Kapitel wird die Beziehung zwischen der qualitativen Feuchteachse und verschiedenen Trockenheitsindizes untersucht. Es werden zwei Realisationen des Klimaszenarios A1B verwendet («feucht»: RegCM3 und «trocken»: CLM) und jeweils die Klimaperioden 2070 – 2099 sowie 1981 – 2010 nach NaiS-Standortstypen ausgewertet.

2 Modellvergleich WaSiM-ETH und Coup-Modell sowie Evaluation von Trockenheitsindices

2.1 Ziele

Um die Beziehung zwischen der qualitativen Feuchteachse und verschiedenen Trockenheitsindices zu untersuchen, wurden zunächst verschiedene im Forschungsprogramm verwendete Indizes miteinander verglichen. Die Indizes sind von unterschiedlicher Komplexität und berücksichtigen alle die Wasserverfügbarkeit im Boden beziehungsweise das pflanzenverfügbare Wasser, respektive die auf die Pflanze wirkende Trockenheit. Die Indizes lassen sich grob in drei Gruppen einteilen: 1) Indizes basierend auf dem Standortwasserhaushalt, welche die nutzbare Feldkapazität (nFK), den Niederschlag und die potentielle Evapotranspiration berücksichtigen (site water balance [SWB]), 2) Indizes, die auf dem Transpirations- und Evaporationsverhältnis basieren und mittels komplexer Modelle berechnet werden (Wassersättigungsdefizit, soil moisture deficit [SMD]; AT/PT; ETa/ETp), sowie 3) Indices basierend auf Wasserhaushaltsformulierungen geringer Komplexität (ForClim; Bugmann, 1996).

2.2 Methoden

Mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen werden die wichtigsten Komponenten des Wasserhaushalts beschrieben und miteinander verknüpft. Ziel ist, den Fluss des Wassers durch den Wald zu beschreiben, Trockenheit abzuschätzen und Elementbilanzen zu erstellen. Abbildung 5 zeigt die wichtigsten Grössen des Wasserhaushalts von Wäldern.

Grössen, die nicht gut bekannt sind und sich schwer messen lassen, müssen aus bekannten Zusammenhängen hergeleitet und im Modell vereinfacht abgebildet werden. Für gut untersuchte Fallstudien ist die Datenlage meistens gut, für grössere Raumausschnitte entsprechend den vorhandenen Grundlagen oft lückenhaft. Der Grad der Modellkomplexität ist daher je nach Ziel der Modellierung und nach der Datenlage unterschiedlich.

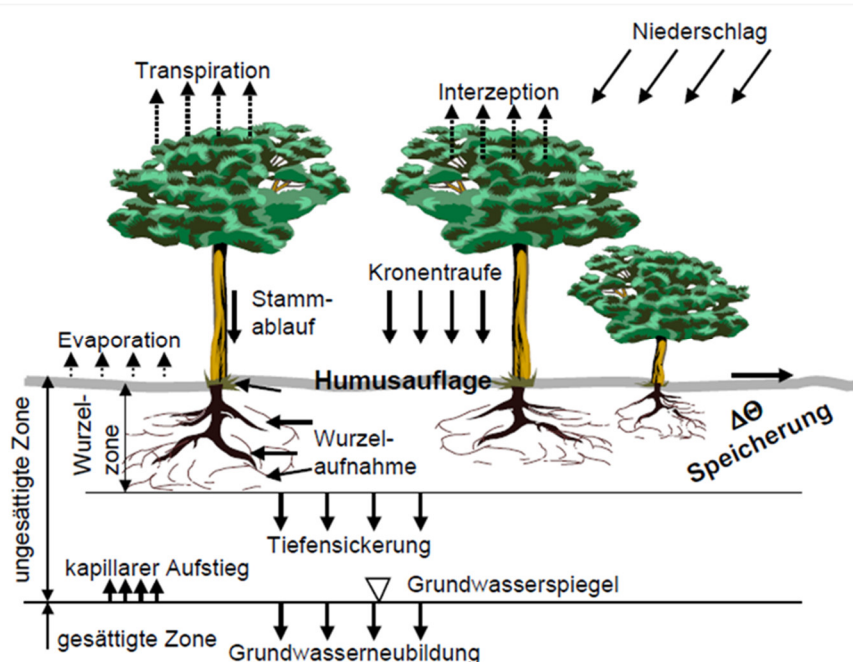


Abb. 5: Die Komponenten des Wasserkreislaufs in einem Waldökosystem (Hörmann et al. 2003).

2.2.1 Untersuchte Indizes

Die Trockenheitsindizes wurden alle für die historische Periode 1981 – 2010 berechnet. Folgende Indizes wurden untersucht:

AT/PWu, auch bezeichnet als AT/PT: Ist das Transpirationsverhältnis basierend auf aktueller Transpiration und potentieller Wasseraufnahme, und widerspiegelt die auf die Pflanze wirkende Trockenheit.

ETa/ETp: Ist das Evapotranspirationsverhältnis gebildet aus aktueller und potentieller Evapotranspiration. Dieser Index ist ein Mass für den gesamten Wasseraustausch zwischen Boden, Pflanze und Atmosphäre.

AT/PT_Q2% / ETa/ETp_Q2%: Das 2% Quantil von AT/PT respektive ETa/ETp wird als Index für maximal von der Pflanze erfahrene Trockenheit verwendet, welche in einem Waldbestand erreicht wird. Betrachtet werden Tageswerte des Zeitraums Mai – August. Wir verwendeten nicht das absolute Minimum von AT/PT respektive ETa/ETp, weil die Verwendung nur eines Wertes fehleranfälliger ist als das 2% Quantil.

AT/PT_Summe / ETa/ETp_Summe: Das Verhältnis der Summen von Tageswerten von AT respektive ETa und PT respektive ETp über einen Zeitraum wird verwendet, um die durchschnittliche Trockenheit zu charakterisieren. Bei AT/PT_Summe und ETa/ETp_Summe wird die in einer bestimmten Periode transpirierte/verdunstete Wassermenge in Relation gesetzt zur potentiell transpirierbaren/verdunstbaren Wassermenge. Betrachtet wird jeweils der Zeitraum Mai – August (Durchschnittsdauer der Vegetationszeit).

Die für die (Evapo-)transpirationverhältnisse verwendeten Evapotranspirationsdaten stammen aus Modellierungen mit Coup, WaSiM-ETH (Schulla 2013) und von Meteotest (Romanenko, 1961; Penman 1948).

Klimatische Wasserbilanz: Niederschlag minus potentielle Evapotranspiration.

SWB: Die «site water balance» ist die klimatische Wasserbilanz, erweitert um das nutzbare Wasserspeichervermögen (nFK = nutzbare Feldkapazität) des Bodens (Grier und Running, 1977). Die Berechnung beginnt im Herbst / Winter, wenn der Speicher gefüllt ist. Gerechnet wird in Tagesschritten, Abfluss findet bei Überfüllung des Speichers statt. Bei Berechnungen aufeinanderfolgender Jahre wird der Bodenwasserspeicher im Herbst/Winter zurückgesetzt, da sich sonst allfällige jährliche Defizite kumulieren. Diese Rücksetzung erfolgte gemäss Zimmermann (2000). Im Folgenden werden die jährlichen Minimalwerte, die Augustwerte und die Differenzen aus August- und Aprilwerten (entsprechen der klimatischen Wasserbilanz) verwendet.

SMD: Soil moisture deficit. Durchschnittliches Wassersättigungsdefizit übers gesamte Jahr, basierend auf der aktuellen Evapotranspiration. Es ist die Differenz «Nutzbare Feldkapazität - Wassergehalt pro Bodenschicht». Das Wassersättigungsdefizit bezieht sich auf die gesamte Profiltiefe bis zum anstehenden Fels oder zur Tiefe des Wasserspiegels oder den Wurzelraum bis max. 1.5 m Tiefe, und es werden tägliche Summen über die Profiltiefe betrachtet. Das durchschnittliche Wassersättigungsdefizit ist ein Mass für die durchschnittliche Austrocknung des Bodens.

Der ForClim Index (uDr) basiert auf einem Evapotranspirationsmodell nach Thornthwaite und Mather (1957). Klimatische Eingangsgrössen sind Temperatur und Niederschlag. Weiterhin werden die nFK, der Breitengrad, die Exposition und die Hangneigung verwendet. Die maximale Evapotranspirationsrate und die Interzeptionsrate werden als Standortseinflüsse verwendet. Der Wasserspeicher ist fix (150 mm) und vollständig pflanzenverfügbar, eine Reduktion der Wasseraufnahme bei zunehmender Entleerung findet nicht statt. Gerechnet wird in

Monatsschritten. Der Index wurde in zwei Varianten berechnet: als Jahresindex und als saisonaler Index (uDrSe) für die Monate April bis Oktober. Eine Beschreibung des Modells findet sich im Anhang A.

2.2.2 Modellvergleich

Die zur Berechnung der Indizes verwendeten Modelle sind in Tabelle 1 aufgeführt und stichwortartig beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Walthert et al. (2015) und Jansson und Karlberg (2007) für das Coup-Modell sowie in Schulla (2013) für WaSiM-ETH.

Die Berechnung der Indizes erfolgte für die Evaluation an einer möglichst repräsentativen Auswahl von 50 Standorten in der Schweiz. Die Auswahl nahm M. Frehner aus einer Grundgesamtheit von 172 Bodenprofilen der WSL Bodendatenbank (Walthert et al., 2004) und Standorten der Interkantonalen Walddauerbeobachtung vor.

Tab. 1: Vergleich der verwendeten Modelle.

	Name des Modells	Coup (Coupled Heat and Mass for Soil – Plant - Atmosphere System)	WaSiM-ETH (Water Balance Simulation Model-ETH)	ForClim	Flächenhafte Modellierung nach Meteotest
Technisch	Modelltyp	Prozessorientiert	Prozessorientiert	Empirisch / Prozessorientiert	Empirisch / Prozessorientiert
	Mathematik	Numerisch; finite Differenzen			
	Zeitschritt/Iterationen pro Tag	96	Auflösung 1 Minute bis 1 Tag	monatlich	ETa/ETp(einfach) = täglich; ETa/ETp(complex) = täglich
	Bodenschichten	Fix=10	1-52	1	1
	Profilmächtigkeit [m]	Max. 4	wählbar	wählbar	wählbar
Einstellungen	Wärmetransport	ja	ja	nein	nein
	Grundwasser	ja	ja	nein	nein
	Wasserfluss	Richards (1931)	Richards (1931)	nein	Speichermodell
	Schnee	ja	ja	nein	nein
	Frost	ja	ja	nein	nein
	Hydraulische Bodencharakterisierung	Mualem und Van Genuchten (1980)	Mualem und Van Genuchten (1980)	nFK	nFK, 1 m Tiefe (wählbar)
	Vernässung	Parametrisiert nach Hoo-ghoudt (1940)	Tonschicht kann speziell definiert werden, ansonsten hydraulische Leitfähigkeit der einzelnen Bodenschichten	nein	nein
	Vegetation	1 Schicht; LAI parametrisiert nach Schleppi et al. (2011); 5 Modellwälder	Bestandesaufnahme, mehrere Schichten, wählbar	?	1 Schicht; LAI parametrisiert nach Schleppi et al. (2011); 5 Modellwälder
	Maximale Durchwurzelungstiefe [m]	1,5	wählbar	?	wählbar
	Wurzelverteilung	Exponentiell	Konvex, linear oder konkav (wählbar)	nein	nein
	Evaporationsberechnung: potentielle Evapotranspiration	Penman-Monteith (Monteith 1965)	Penman-Monteith	Mather und Thorntwaite 1957	für ETa/ETp(einfach)=Romanenko; für ETa/ETp(komplex)=Shuttleworth

	Name des Modells	Coup (Coupled Heat and Mass for Soil – Plant - Atmosphere System)	WaSiM-ETH (Water Balance Simulation Model-ETH)	ForClim	Flächenhafte Modellierung nach Meteotest
	Evaporationsberechnung: aktuelle Evapotranspiration	kann nicht in einem Stichwort beschrieben werden. Verweis auf Walthert et al. (2015) und Jansson und Karlberg (2011)	Einschränkungen der potentiellen Evapotranspiration durch Bodenfeuchte		ETa/ETp(einfach) = Reduktion entspr. Bodenspeicher; ETa/ETp(komplex) = ET(Boden + Interzept. + Baum)
	Interzeptionsberechnung	Aufgrund LAI	aufgrund LAI und Interzeptionsverdunstung	Interzeptionsrate	nach Gash 1979
	Oberflächenwiderstand	Lohammar (1980)	WaSiM-Manual (Schulla 2013)	nein	
	Beginn Reduktion ETa/ETp	Beginn Transpirationsreduktion bei 400 hPa	wählbar	keine	ab 60% der nFK
Input	Input dynamisch	Tagesmittel: Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, kurzweilige Einstrahlung, Niederschlag	Tagesmittel: Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, kurzweilige Einstrahlung oder Sonnenscheindauer, Niederschlag, Windgeschwindigkeit	Monatsmitteltemperatur, Monatsniederschlagssumme	Tagesmittel: Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, kurzweilige Einstrahlung oder Sonnenscheindauer, Niederschlag, Windgeschwindigkeit
	Eingabeparameter	Temperaturamplitude; Windgeschwindigkeit, langweilige Einstrahlung, Bewölkung: Verläufe modellintern aus Parametern generiert	Bodeneigenschaften und Zusammensetzung der Vegetation	Exposition, Neigung, nFK, Breitengrad, maximale Evaporationsrate, Interzeptionsrate	
Output		Transpiration potentiell und aktuell; Evaporation potentiell und aktuell; Interzeptionsverdunstung; Wassergehalt; Saugspannung; Bodentemperatur; Abfluss (oberflächlich sowie Grundwasser)	Evapotranspiration potentiell und aktuell, Transpiration potentiell und aktuell (pro Vegetationsschicht), Interzeptionsverdunstung pro Vegetationsschicht, Wassergehalt, Saugspannung, Oberflächenabfluss, Grundwasserabfluss u.a.	Potentielle Evapotranspiration, Wassergehalt, Trockenheitsindex (uDr)eingabeparameter	tägliche Bilanzwerte, nach Bedarf wählbar
Kalibrierung		Saugspannung; Interzeptionsverdunstung; Differenz Freiland - Kronendurchlass (LWF-Flächen); Hydromorphie; Skelettgehalt	Saugspannung, Wassergehalt		
Plausibilisierung		Atlas Hydrologie: Abflüsse; Baumhöhen	Hydrolog. Atlas		nFK-Herleitung: Profile Solothurn; Vergleich mit Ergebnissen anderer Ansätze (BZE)

	Name des Modells	Coup (Coupled Heat and Mass for Soil – Plant - Atmosphere System)	WaSiM-ETH (Water Balance Simulation Model-ETH)	ForClim	Flächenhafte Modellierung nach Meteotest
Validierung		Saugspannung	Messungen von Saugspannung und Wassergehalt in 40 Beobachtungsflächen		
Indikatoren		Ta/Tp; ETa/ETp, SWB, SMD; jeweils verschiedene Varianten und Zeitperioden möglich	ETa/ETp; SWB; SMD, jeweils verschiedene Varianten und Zeitperioden möglich	uDrSe, uDrAn (ETa/ETp nach Thorntwaite & Mather 1957)	ETa/ETp; SWB; jeweils verschiedene Varianten und Zeitperioden möglich

Die hier verwendeten Modelle weisen zum Teil sehr unterschiedliche Detaillierungsgrade bezüglich der abgebildeten Prozesse sowie der Beschreibung von Vegetation und Boden auf. Die komplexesten Modelle sind die prozessbasierten Modelle Coup und WaSiM-ETH, welche die Wasserflüsse zwischen Boden, Pflanze und Atmosphäre simulieren. Beide Modelle verwenden hierzu hydraulische Bodeneigenschaften in einem geschichteten Bodenprofil, parametrisiert nach Van Genuchten (1980) (Tabelle 1). In Coup wird die Transpiration ab einer Saugspannung von -400 hPa reduziert, in WaSiM-ETH ist dieser Schwellenwert pro Vegetationsschicht definierbar, es wurde mit -350 hPa gerechnet.

Als Vegetation wurden im Coup-Modell und für die flächenhafte Berechnung (Meteotest) standardisierte Modellwälder verwendet. Die Maximalwerte des Blattflächenindex (LAI) für die 5 Waldtypen wurden aus Schleppi et al. (2011) hergeleitet.

Tab. 2: Beschreibung der Waldtypen im Coup-Modell.

	Waldtyp 1	Waldtyp 2	Waldtyp 3	Waldtyp 4	Waldtyp 5
	Laubmischwald	Mischwald	Nadelwald	Nadelwald	Nadelwald
Baumarten	100% Buche	50% Laubholz 50% Nadelholz	50% Fichte 50% Tanne	100% Fichte	50% Arve 50% Lärche
Höhenlage (m ü.M.)	< 800	800-1300	1300-1600	1600-1900	> 1900
Bestandeshöhe	30	30	27	25	18
Durchwurzelungstiefe (m)	max. 1.5	max. 1.5	max. 1.5	max. 1.5	max. 1.5
LAI (max.)	6.0	5.5	Nach m ü. M.: 1300-1600: 5.0 1600-1900: 4.0	Nach m ü. M.: 1300-1600: 5.0 1600-1900: 4.0	3.0

Aufgrund der Komplexität dieser Modelle ergeben sich Unterschiede sowohl in der Parametrisierung und der zeitlichen Auflösung als auch in der Kalibrierung (s. 2.4.1). Eine Validierung beider Modelle an gemeinsamen Waldstandorten konnte im Rahmen dieses Projekts nicht durchgeführt werden (s. 2.4.2 «Validierung»). Der Output der Modelle kann für die Berechnung verschiedener Trockenheitsindizes in wählbaren Zeitabschnitten verwendet werden (AT/PT, ETa/ETp, SWB, SMD). In den prozessorientierten Modellen wird die potentielle Evapotranspiration nach Penman-Monteith (Monteith 1965) berechnet.

2.2.3 Durchgeführte Analysen

Alle Analysen wurden mit den 50 ausgewählten Profilen durchgeführt. Es wurde die Korrelation der evaluierten Trockenheitsindizes untersucht.

Zum Vergleich der Modelle Coup und WaSiM-ETH wird eine deskriptive Analyse erstellt. Bei Coup wird immer mit der Modellvegetation gerechnet. Bei WaSiM-ETH wird grundsätzlich mit der aktuellen Vegetation gerechnet. Für den Vergleich mit der Coup-Modellierung wurden die Berechnungen zusätzlich mit der Modellvegetation durchgeführt. Über einen Zeitraum von 30 Jahren wurden die Mittelwerte der jährlichen und sommerlichen Wasserflüsse sowie das Transpirations- und Evapotranspirationsverhältnis mit beiden Modellen für die Modellvegetation berechnet und dargestellt. Ebenfalls mit der Modellvegetation wurde mit beiden Modellen die Differenz August-April der SWB berechnet und dargestellt und es wurden Histogramme der Dichteverteilung erstellt. Zudem wurden die Mittelwerte von verschiedenen Wasserhaushaltsparametern mit WaSiM-ETH (aktuelle Vegetation und Modellvegetation) und Coup (Modellvegetation) berechnet und in einer Tabelle dargestellt.

Weitere Analysen zum Vergleich der verwendeten Modelle Coup und WaSiM-ETH sind im Anhang B aufgeführt.

2.3 Resultate des Indexvergleichs

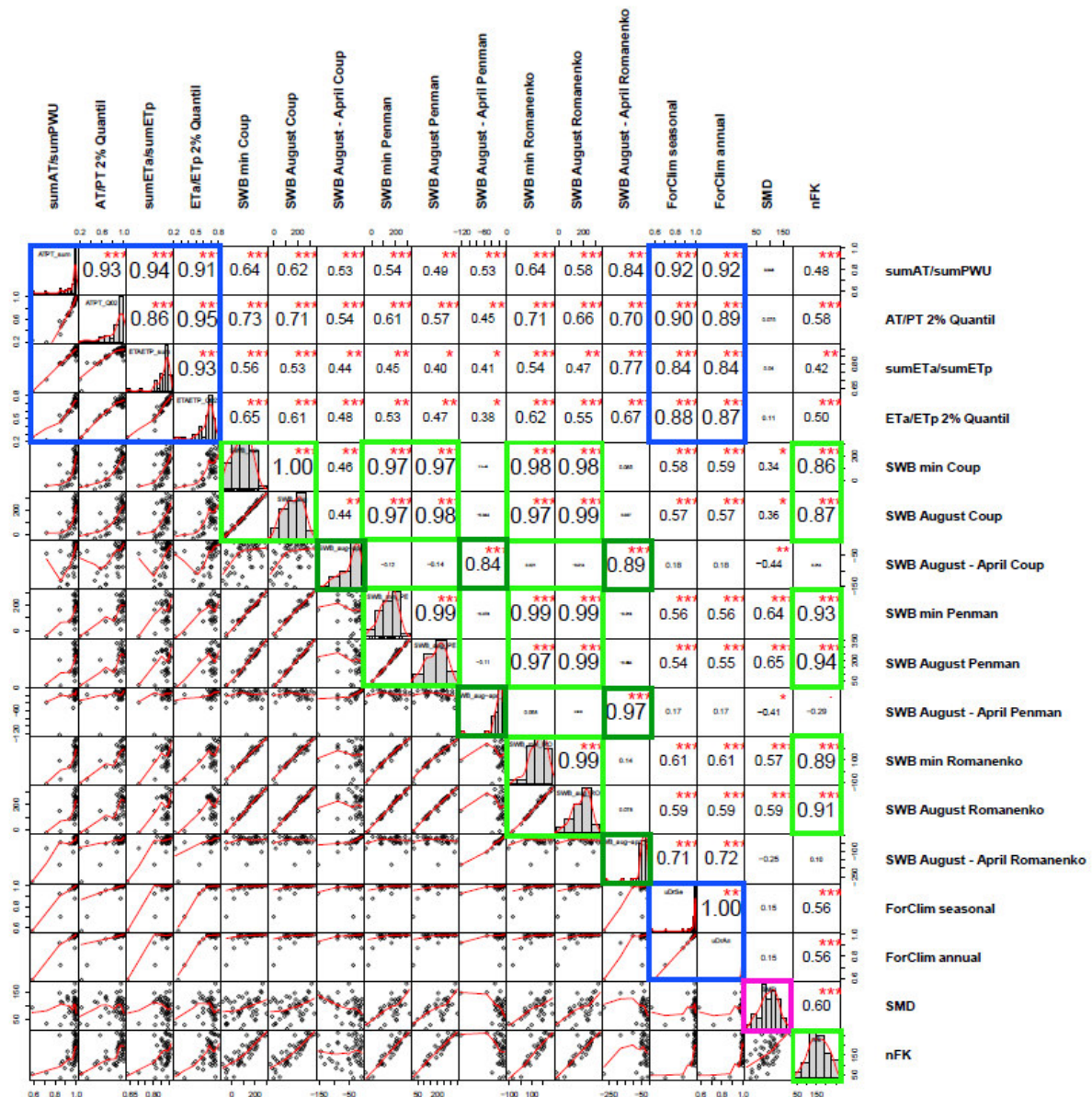


Abb. 6: Korrelationsmatrix aller berechneten und evaluierten Indizes. Die Zahlen stellen den Korrelationskoeffizienten dar. Mittelwerte der Periode 1981 – 2010 pro Bodenprofil). Stark korrelierte Indizes sind farblich hervorgehoben. 50 Profile. SumAT/sumPWU und AT/PT 2% Quantil wurden mit Coup gerechnet. SWB min Penman, SWB August-April Penman mit WaSiM-ETH.

Die in Abbildung 6 dargestellte Matrix der Korrelationen der Trockenheitsindizes der 50 Profile zeigt drei Indexgruppen.

Die Indizes, die aus AT/PT und ETa/ETp gebildet wurden (blauer Rahmen in Abb. 6), korrelieren stark ($r \geq 0,84$), da beide die Transpiration enthalten, welche einen grossen Anteil an den gesamten Wasserflüssen hat. Im Index ETa/ETp werden noch Bodenverdunstung und Interzeptionsverdunstung mit eingerechnet, was die Wasserverluste für das Ökosystem Wald genauer abbildet (zur Interzeption s.a. Meesenburg et al. 2014). Ob AT/PT oder ETa/ETp verwendet werden, hängt von der Datenverfügbarkeit und dem Ziel der Modellierung ab. So verwenden Klap et al. (2000) AT/PT als Trockenheitsindikator, da dies den Trockenstress der Pflanze besser wiedergebe. Ein Vergleich verschiedener Trockenheitsindizes zeigte, dass für verschiedene

Effekte verschiedene Indikatoren geeignet sind (Braun 2016). Wichtig ist, dass die Beziehungen zu Effekten bekannt sind und eine Auswahl möglich ist. Die ForClim Indizes korreliert zwar gut mit AT/PT und ETa/ETp (blauer Rahmen in Abb. 6), was aber vor allem daran liegt, dass viele Werte bei 1 oder sehr nahe bei 1 liegen.

Die hohe Korrelation zwischen SWB August, SWB minimum und nFK (grüner Rahmen in Abb. 6) zeigt, dass die SWB stark durch die nFK geprägt ist (vgl. hierzu Grier und Running, 1977). Das Wassersättigungsdefizit SMD (roter Rahmen in Abb. 6) scheint wenig Gemeinsamkeit mit den anderen untersuchten Indizes aufzuweisen. Die Verwendung dieses Indexes scheint auch problematisch, da auch geringmächtige Böden ein kleines Defizit aufweisen können, gleichzeitig jedoch wenig Wasser zur Verfügung stellen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Wassersättigungsdefizit eine absolute Grösse ist (mm) und folglich bei geringmächtigen Böden nie ähnlich hohe Werte erreichen kann wie bei tiefgründigen (siehe dazu auch Kapitel 2.2). Die Differenzen der SWB August - April entsprechen weitgehend der klimatischen Wasserbilanz in diesem Zeitraum, die nFK spielt hier keine Rolle, sie bilden ebenfalls eine eigene Gruppe (dunkelgrüner Rahmen in Abb. 6).

2.3.1 Resultate des Modellvergleichs

Abbildung 7 zeigt Mittelwerte über 30 Jahre (1981-2010) der jährlichen und sommerlichen Wasserflüsse sowie das Transpirations- und Evapotranspirationsverhältnis aus den Modellen Coup und WaSiM-ETH. Es wurde jeweils mit den 5 Modellwäldern gerechnet. Es ist festzustellen, dass die Transpirationsflüsse in Coup im Mittel höher sind als in WaSiM-ETH (siehe auch Tabelle 3). Dass die Maxima in WaSiM-ETH beobachtet wurden, hängt damit zusammen, dass bei Coup hohe Transpirationswerte gekappt werden. Es fällt ausserdem auf, dass sowohl die aktuelle wie die potentielle Transpiration in WaSiM-ETH an einigen Waldstandorten sehr nahe bei Null liegen. Die Transpirations- und Evapotranspirationsverhältnisse sind zwischen den beiden Modellen nur schwach korreliert.

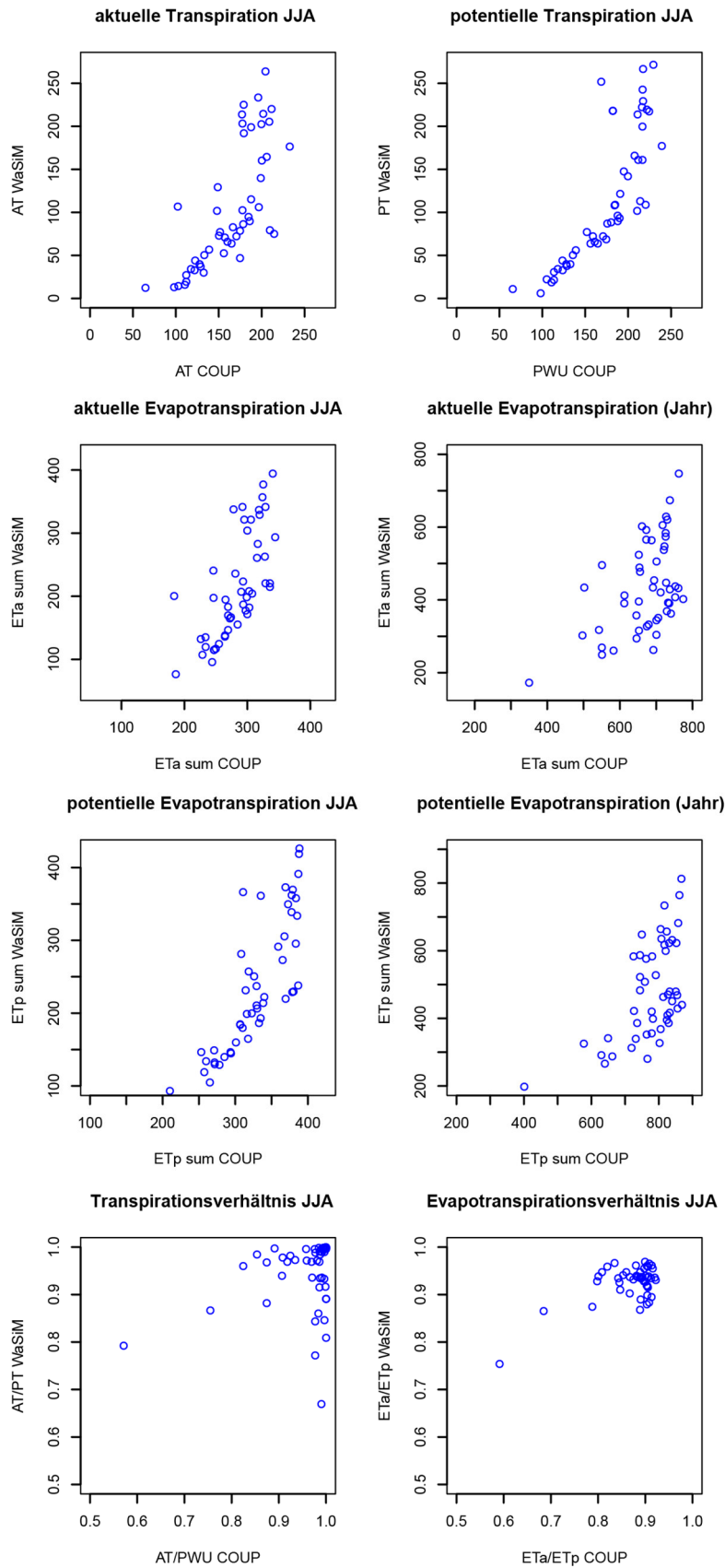


Abb. 7: Aktuelle und potentielle Transpiration und Evapotranspiration sowie deren Verhältnis in den untersuchten Modellen Coup und WaSiM-ETH. Dargestellt sind die Mittelwerte über 30 Jahre pro Station (1981 – 2010) basierend auf historischen Klimadaten.

Die Differenz der klimatischen Wasserbilanz zwischen August und April weist, berechnet nach Coup oder WaSiM-ETH, ein sehr ähnliches Muster auf, da sie als Differenz aus Niederschlag und potentieller Evapotranspiration durch beide und damit auch durch den in beiden Ansätzen verwendeten Niederschlag geprägt ist (Abbildung 8). Die Werte aus WaSiM-ETH zeigen eine stärkere Häufung bei 0 und einen breiteren Wertebereich in Richtung negativer Bilanzen. Deutlich zu sehen ist die Kappung der Werte im Coup-Modell bei -300mm.

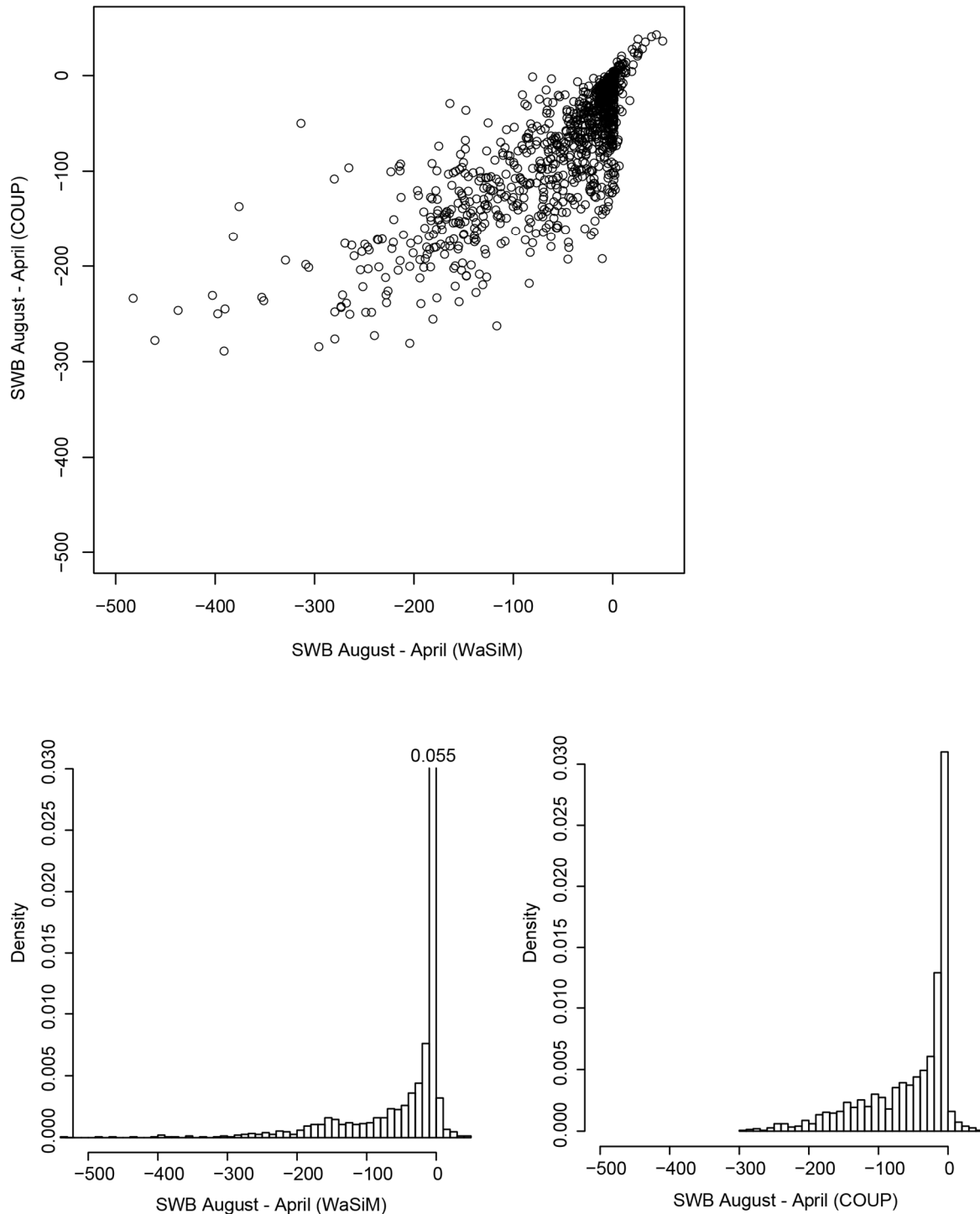


Abb. 8: Vergleich der August – April Differenz der site water balance (SWB) berechnet aus Niederschlag und potentieller Evapotranspiration aus beiden Modellen (oben). Unten dargestellt sind die Histogramme der Dichteverteilung der SWB (links: WaSiM-ETH, rechts: Coup).

Tab. 3 zeigt eine Übersicht über die mittleren Wasserhaushaltsparameter für die 50 Profile, diese wurden mit WaSiM-ETH, jeweils mit aktueller und Modellvegetation berechnet und mit Coup mit Modellvegetation. Bei der aktuellen Transpiration ist die Übereinstimmung bei WaSiM-ETH zwischen aktueller und standardisierter Vegetation Zufall. Die Werte der einzelnen Jahre sind nicht gleich.

Tab. 3: Mittelwerte über die Vegetationsperiode (Transpiration, Wasserbilanz) bzw. über das ganze Jahr (Evapotranspiration und Interceptverdunstung). Zeitraum 1981 – 2012.

Parameter	Zeitperiode	WaSiM-ETH		Coup
		Aktuelle Vegetation	Modell-Vegetation	Modell-Vegetation
potentielle Evapotranspiration [mm]	ganzes Jahr	535	481	760
aktuelle Evapotranspiration [mm]	ganzes Jahr	457	436	671
Verdunstung Intercept [mm]	ganzes Jahr	172	108	257
potentielle Evapotranspiration [mm]	Vegetationsperiode	386	335	485
aktuelle Evapotranspiration [mm]	Vegetationsperiode	324	305	418
Verhältnis aktuelle/potentielle Evapotranspiration [1]	Vegetationsperiode	0.891	0.928	0.767
aktuelle Transpiration [mm]	Vegetationsperiode	166	166	236
potentielle Transpiration [mm]	Vegetationsperiode	207	177	301
Verhältnis aktuelle/potentielle Transpiration [1]	Vegetationsperiode	0.889	0.947	0.942
Wassersättigungsdefizit ganzes Profil [mm]	ganzes Jahr	69	72	30
potentielle Evaporation [mm]	ganzes Jahr	77	138	91
aktuelle Evaporation [mm]	ganzes Jahr	72	116	84
minimale Standortwasserbilanz [mm]	ganzes Jahr	30	59	114
Standortwasserbilanz August-April [mm]		-53	-28	-50

2.4 Diskussion

2.4.1 Kalibrierung / Parametrisierung

Beide hier verwendeten Modelle (WaSiM-ETH, Coup) wurden manuell kalibriert. Die für die Kalibrierung von Coup verwendeten Parameter und Zielgrößen sind in Walthert et al. (2015) aufgelistet. Im Falle von Coup wurden ausserdem Werte aus der Literatur herangezogen, um die maximale Evapotranspiration (~800 mm/a) und die maximale Transpiration (~400 mm/a) in einem realistischen Bereich zu halten (Walthert et al., 2015).

Da die Kalibrierung sehr zentral für die Güte der Modellergebnisse ist, muss bei manuellem Vorgehen eine gewisse Subjektivität, respektive die Erfahrung des Modellierers in Betracht gezogen werden (Holländer et al., 2009). Zudem unterscheiden sich die Modelle in ihrem Aufbau und können in verschiedener modularer Struktur verwendet werden (s. Jansson und Karlberg, 2011; Schulla und Jasper, 2007).

2.4.2 Validierung

Die Validierung der Modellresultate aus Coup erfolgte anhand von Saugspannungsmessdaten (LWF-Flächen) und Abflussraten (Hydrologischer Atlas). Die Übereinstimmung von Modell und Messung wurde an den meisten untersuchten Standorten als gut beurteilt (Walthert et al., 2015). WaSiM-ETH wurde mit Messungen von Saugspannung und volumetrischem Wassergehalt in 40 Beobachtungsflächen des Interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogramms validiert, mit sehr guter Übereinstimmung.

Ein Vergleich beider Modelle (Coup und WaSiM-ETH) im Sinne einer Validierung anhand gleicher Datensätze war im Rahmen dieses Projekts zeitlich nicht möglich. Für einen fundierten Vergleich müssten Messdaten zu Saugspannung/Wassergehalt sowie zu Wasserflüssen (Transpiration, Evaporation, Abfluss) an mehreren Standorten vorliegen. Auf diese Weise könnte die diese Zielgrößen betreffende Performance beider Modelle verglichen werden. Solche Daten liegen für wenige Standorte vor, es war innerhalb des Projektes aber nicht mehr möglich, den Vergleich durchzuführen.

2.4.3 Transpiration / Evaporation / Interzeption

Die unterschiedliche Parametrisierung der Vegetation in den Modellen (einlagig / zweilagig, konstante / variable Vegetationsperiode, unterschiedlicher LAI) führt ebenfalls zu Unterschieden in den Evaporations-, Transpirations- und Interzeptionswerten. Die mit WaSiM-ETH berechneten Unterschiede zwischen einer aktuellen Vegetation und einer nach Höhenstufe zugeordneten Modellvegetation sind in Tab. 3 aufgelistet. Die Berechnungen für den Vergleich WaSiM-ETH - Coup wurden allerdings mit der gleichen Modellvegetation wie für Coup durchgeführt. Damit kann dieser Punkt keine Unterschiede der Modellresultate erklären.

Potentielle Evapotranspiration und potentielle Transpiration sind in Coup im Durchschnitt höher als in WaSiM-ETH, wobei die höchsten simulierten Werte in WaSiM-ETH auftraten, da bei Coup durch Definition eines Max.Wertes bei der Kalibrierung darauf geachtet wurde, dass die Evapotranspiration in einem realitätsnahen Bandbereich liegt. Die Ursachen hierfür liegen wahrscheinlich in der oben genannten Parametrisierung der Vegetation (Blattleitfähigkeit und Oberflächenwiderstand) und des Bodens (Oberflächenrauigkeit).

Zur relativ hohen Korrelation der transpirationsbasierten Indizes (ET_a/ET_p , AT/PT und $ForClim$ uDr) muss erwähnt werden, dass viele Werte in beiden Indizes sehr nahe bei 1 (im Falle von uDr genau bei 1) liegen, was das r^2 erhöht, aber eine gute Beziehung nur vortäuscht. Standardmässig wird in ForClim mit einer nFK von 150 mm für alle Standorte gerechnet. Falls dieser Index weiterverfolgt würde, müssten entweder die nFK angepasst werden oder die Trockenheitsgrenzen im Modell, um eine ausreichend gute Differenzierung zwischen den einzelnen Profilen zu erhalten.

2.4.4 Probleme der Modelle

Ein Problem bei der Berechnung von ET_p in Coup ist, dass der Wert aus den Komponenten Transpiration, Evaporation und Interzeption aufsummiert werden muss. Dies kann an Tagen mit Niederschlag zu leichten Verzerrungen in den ET_p führen. Umgekehrt müssen bei WaSiM-ETH die potentiellen Transpirationswerte (PT) durch Subtraktion gewonnen werden (siehe Anhang B).

Beim Vergleich des Verlaufs des Transpirationsverhältnisses werden Unterschiede bei der Modellierung der Transpiration zwischen WaSiM-ETH und Coup sichtbar. So sind an ca. der Hälfte der 50 untersuchten Standorte un stetige Verläufe und über längere Zeit andauernde konstante Werte festzustellen (Beispiele in Abbildung 10 im Anhang B). Ursache dafür könnten numerische Instabilitäten im Modell sein (z.B. zu wenige Iterationen pro Tag). Dies müsste noch genauer untersucht werden.

2.4.5 Fazit

Ein fundierter Vergleich beider Modelle war im Rahmen dieses Teilprojekts aus Zeitgründen nicht möglich. Zur Validierung werden Daten zu Saugspannung/Wassergehalt sowie zu Wasserflüssen (Transpiration, Evaporation, Abfluss) an mehreren Standorten benötigt. Auf diese

Weise könnte die diese Zielgrössen betreffende Performance beider Modelle verglichen werden.

Die Aussagekraft von aus den jeweiligen Modellen abgeleiteten Trockenheitsindizes könnte zudem anhand von Wachstums- und Vitalitätsdaten geprüft werden. Eine solche Prüfung erfolgte im Rahmen des Projektes Braun (2016) anhand von Fichten- und Buchenflächen des Interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogramms. Die Ergebnisse zeigten, dass alle Parameter, die auf der klimatischen oder der Standortwasserbilanz beruhen, gut geeignet sind. Bei den (Evapo-)transpirationsverhältnissen waren ET_a/ET_p im Frühjahr bzw. verschiedene Minima davon entscheidend. Weitere Prüfungen wären wünschenswert.

3 Vergleich der Feuchteachse qualitativ mit Trockenheitsindices

Ein Hauptziel des Teilprojekts «Quantifizierung der Lage von Standortstypen im Ökogramm» besteht darin, die Feuchteachse des Ökogramms mit quantitativen Parametern zu beschreiben. Hiermit kann dann ermittelt werden, in welcher Feuchtestufe sich ein bestimmter Standortstyp künftig befindet – entweder im selben Ökogramm einer bestimmten Standortsregion und Höhenstufe, oft aber in einem solchen einer tiefer gelegenen Höhenstufe dieser Standortsregion.

3.1 Statistische Analyse der Feuchteachse

Anhand des Datensets mit 1000 Profilen der WSL-Datenbank wurden Beziehungen gesucht zwischen der Lage von Standortstypen entlang der Feuchteachse der Ökogramme einerseits und verschiedenen Klimavariablen, topografischen Eigenschaften sowie der Vernässung andererseits. Die Feuchteachse der Ökogramme wurde zu diesem Zweck als kontinuierliche Variable formatiert (Details dazu siehe Anhang C) und mit einem gemischten Modell unter Verwendung von Splines ausgewertet, mit Region und Höhenstufe als Cluster.

Als Trockenheitsindikatoren wurden folgende Variablen geprüft:

- Regen: mittlerer Jahresniederschlag (REGEN), Regen über die Monate April bis September (REGENVEG) oder über die Monate Juni bis August (REGJJA).
- ETAPSVEG: Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration nach Romanenko. Berechnung durch Meteotest (Remund et al. 2011) und Mittelung über die Vegetationsperiode, zwischen phänologischem Blattaustrieb der Buche und Blattfall gemäss Meteo Schweiz
- Standortwasserbilanz, basierend auf der potentiellen Evapotranspiration gemäss der in WaSiM-ETH verwendeten Gleichung und der über 100 cm aufsummierten nutzbaren Feldkapazität nach Benzler et al. (1982). Minimum pro Jahr, exponentialtransformiert (EKWBNFKKA3).
- Summe der aktuellen Transpiration dividiert durch die Summe der potentiellen Transpiration (Coup-Modellierung, SUMATPT). Berechnet über die Monate Mai bis August
- Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Transpiration, 2-Perzentil-Wert (Coup-Modellierung, ATPT2PZ). Gleiche Quelle wie SUMATPT.
- Mittlere Anzahl Tage, in denen das Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Transpiration den Wert von 0.8 unterschreitet (ATPTC08MEAN). Gleiche Quelle wie SUMATPT.

Neben den Trockenheitsindikatoren waren folgende Kovariablen signifikant (Tab. 4):

- VPD: Dampfdrucksättigungsdefizit als Jahresmittel
- VERNAES: Vernässung
- KEXPO: Exposition (binär: 0= Schatthang, 1= Sonnhang)
- KSLOP2: Neigung (klassiert in ≤ 18 , $>18-36$ und $>36\%$)
- SUMSECTMINUS: Summe der negativen Höhendifferenzen in 8 Sektoren in einem Umkreis von 50 m

- NFK100: nutzbare Feldkapazität (100 cm Tiefe)

Tab. 4: Output der Regression. Abhängige Variable: Wert der Feuchteachse (1-5). Topographie: Variable SUMSECTMINUS gemäss obiger Aufstellung. VPD und Niederschlag als Jahresmittel bzw. -summe.

	Estimate	Std. Error	t value	p-Wert
(Intercept)	3.7620	0.3329	11.300	0.0000
Niederschlag	-0.0002	0.0001	-1.869	0.0616
VPD	0.2687	0.0609	4.410	0.0000
Vernässung des Bodenprofils	-0.2407	0.0142	-16.950	0.0000
Exposition	-0.0494	0.0515	-0.959	0.3374
Neigung	-0.1893	0.0452	-4.184	0.0000
ns(Topographie, df = 2)1	-0.9689	0.3962	-2.445	0.0145
ns(Topographie, df = 2)2	-0.7403	0.1330	-5.566	0.0000
ns(nFK, df = 2)1	-0.8049	0.1454	-5.534	0.0000
ns(nFK, df = 2)2	0.1988	0.1155	1.721	0.0852
Exposition*Neigung	0.2418	0.0380	6.369	0.0000

In Anhang C sind die detaillierten Ergebnisse der Auswertung dargestellt und kommentiert. Die Ergebnisse zeigen, dass Vernässung und Topographie eine wichtige Rolle bei der Erklärung der Feuchteachse spielen. Exposition und Neigung sind vor allem als Interaktion deutlich signifikant, d.h. ein steiler Nordhang unterscheidet sich deutlich von einem steilen Südhang. Je ausgeprägter die Kuppenlage (berechnet als Höhendifferenz zwischen dem Punkt des Profils und im Umkreis von 50 m in acht Himmelsrichtungen), umso höher ist der Trockenwert eines Standorttyps im Ökogramm. Der Trockenwert ist ebenfalls umso höher, je höher das Dampfdrucksättigungsdefizit der Luft ist.

Wegen der Korrelation zwischen den einzelnen Prädiktoren kann der Regressionsoutput nicht direkt verwendet werden, um die Bedeutung der einzelnen Prädiktoren abzuschätzen. Es wurden deshalb verschiedene Modelle berechnet, in denen gezielt einzelne Komponenten weggelassen wurden (Tab. 5). Das dabei erreichte R^2 ist ein Mass für die Bedeutung der eingesetzten Variablen. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass alleine mit den Clustern, d.h. mit den Random-Variablen, 28.6% der Varianz erklärt wird. Mit Bodenphysik und Topographie steigt die Varianz gegenüber dem Random-Modell um 30.1% auf insgesamt 58.7%. Mit dem Dampfdrucksättigungsdefizit allein steigt es um 1.2%, mit dem Regen um 1.2% und mit der Summe von AT/PT allein steigt es um 7.4 auf 36.0%. Zwischen den Gesamtmodellen mit unterschiedlichen Indikatoren des Wasserhaushalts bestehen nur geringe Unterschiede. Das höchste R^2 für die Anzahl Tage mit AT/PT < 0.8 wird allerdings nicht in den AIC-Werten widerspiegelt, dort schneidet die Summe AT/Summe PT am besten ab. Massgebend sind die AIC-Werte, da der R^2 in einem gemischten Modell nur indirekt ermittelt werden kann.

Tab. 5: R² der Modellvarianten, berechnet als Regression der Schätzwerte gegen die abhängige Variable. Die Spalte «Differenz zum Random Modell» gibt an, um wieviel das R² im Vergleich zu einem Modell ohne fixed Variablen steigt (erste Zeile).

Random	Fixed	R ²	Differenz zum Random Modell	AIC
	-	0.286		1877.2
Höhenstufe und Region	Bodenphysik und Topographie	0.587	0.301	1456.7
	Vernässung	0.506	0.220	1566.9
	nur VPD	0.298	0.012	1856.8
	nur Regen	0.298	0.012	1893.9
	nur SUMATPT	0.360	0.074	1802.6
	Bodenphysik, Topographie und VPD	0.593	0.307	1432.1
	Bodenphysik, Topographie, VPD und Regen	0.594	0.308	1444.4
	Bodenphysik, Topographie, VPD und ETa/ETp Romanenko	0.592	0.306	1428.2
	Bodenphysik, Topographie, VPD und SWB	0.592	0.306	1430.9
	Bodenphysik, Topographie, VPD und SUMATPT	0.594	0.308	1403.9
	Bodenphysik, Topographie, VPD und 2-Perzentil von AT/PT	0.587	0.301	1428.4
	Bodenphysik, Topographie, VPD und Tage mit AT/PT <0.8	0.599	0.313	1410.8

In Abb. 9 und Abb. 10 sind die mit dem Modell in Tab. 4 berechneten Schätzwerte für die Feuchteachse gegen die beobachteten Feuchtestufen aufgetragen. Die Abbildungen sind nach Standortsregion (Abb. 1) und Höhenstufen (Abb. 2) gruppiert. Sie illustrieren eine gute Qualität der Regression.

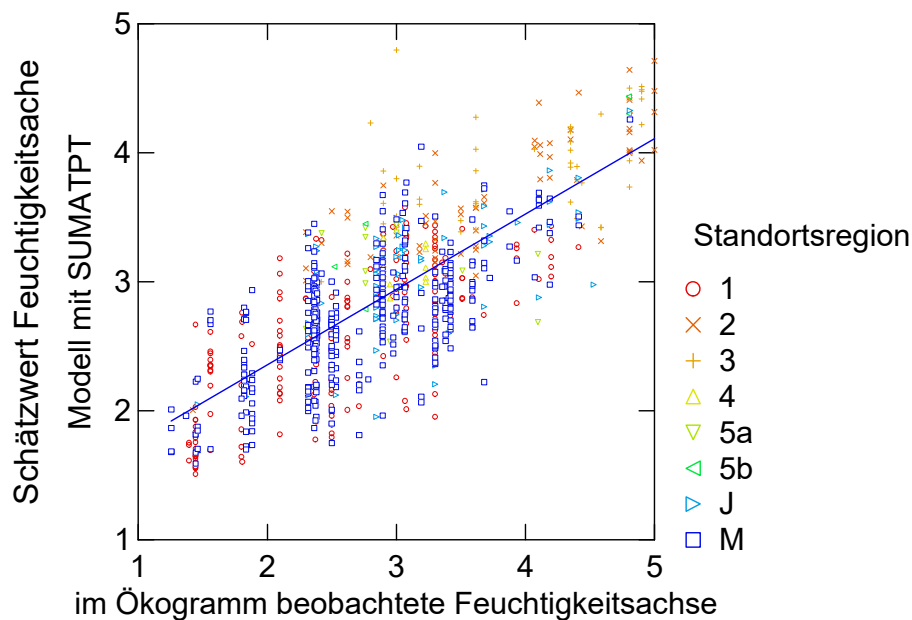


Abb. 9: Schätzwerte der Regression mit SUMATPT in Beziehung zu den Ausgangsdaten, gruppiert nach Region.

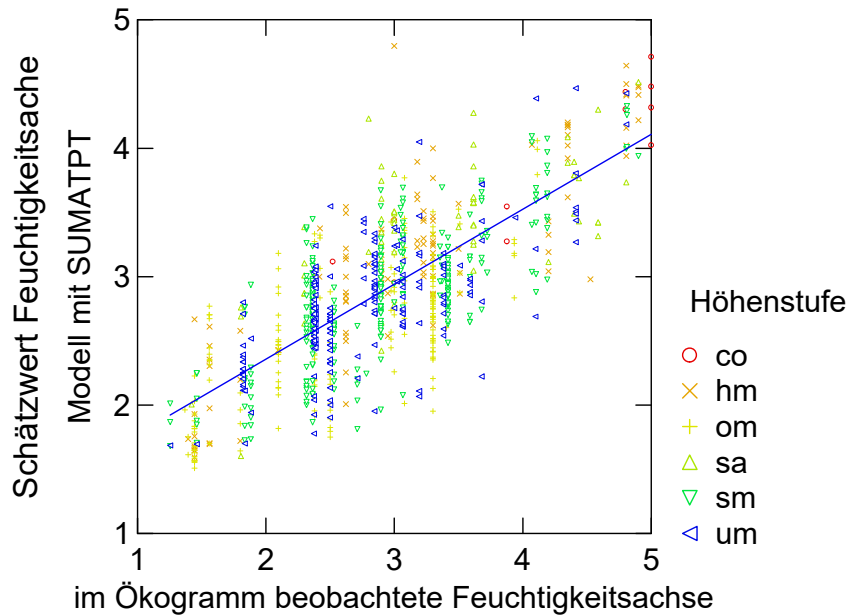
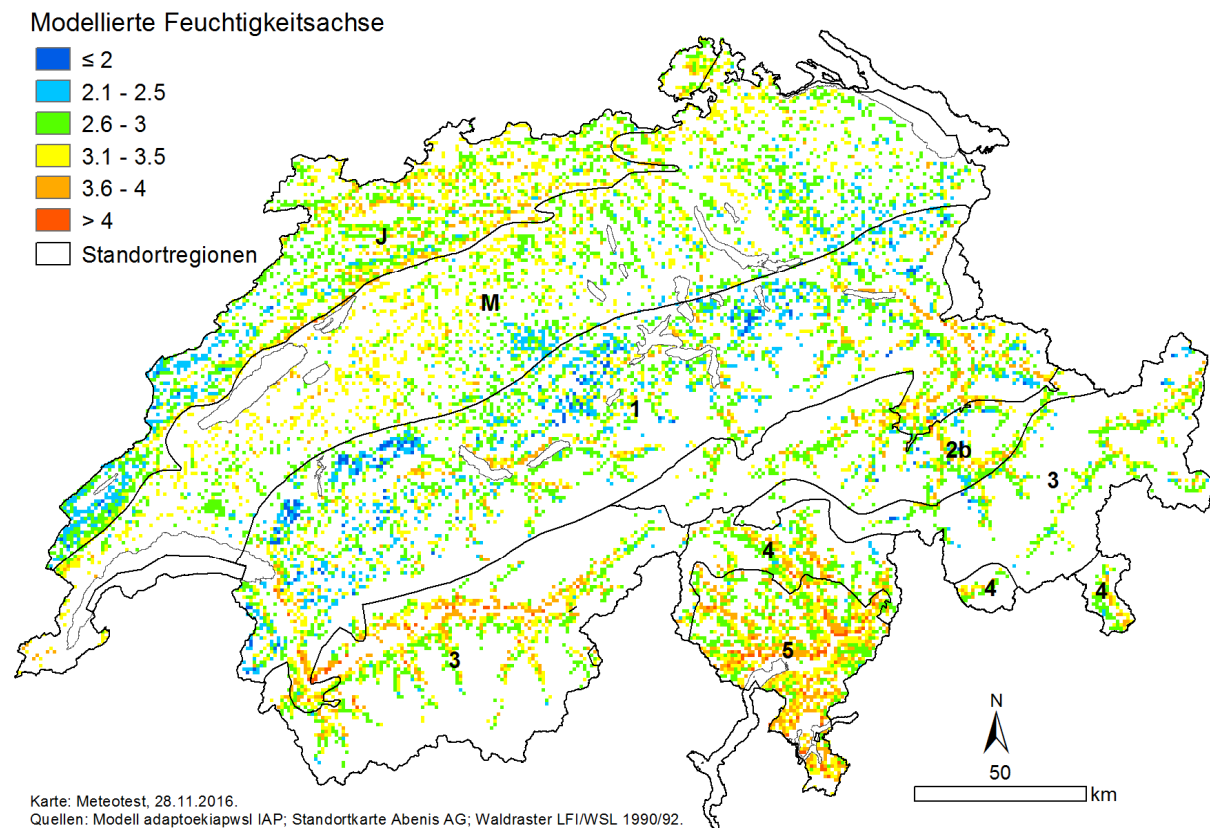


Abb. 10: Schätzwerte der Regression mit SUMATPT in Beziehung zu den Ausgangsdaten, gruppiert nach Höhenstufen.

Mit der gefundenen Beziehung war es möglich, die Feuchtestufen für die Punkte des LFI-Rasters zu berechnen und flächenhaft für das heutige Klima darzustellen (Abb. 11). Eine analoge Berechnung wird es auch ermöglichen, die Feuchtestufe für künftiges Klima zu berechnen.



Karte: Meteotest, 28.11.2016.
 Quellen: Modell adaptoekiapwsl IAP; Standortkarte Abenis AG; Waldraster LFI/WSL 1990/92.

Abb. 11: Mit dem Modell in Tab. 4 berechnete Feuchtestufe (Raster = LFI).

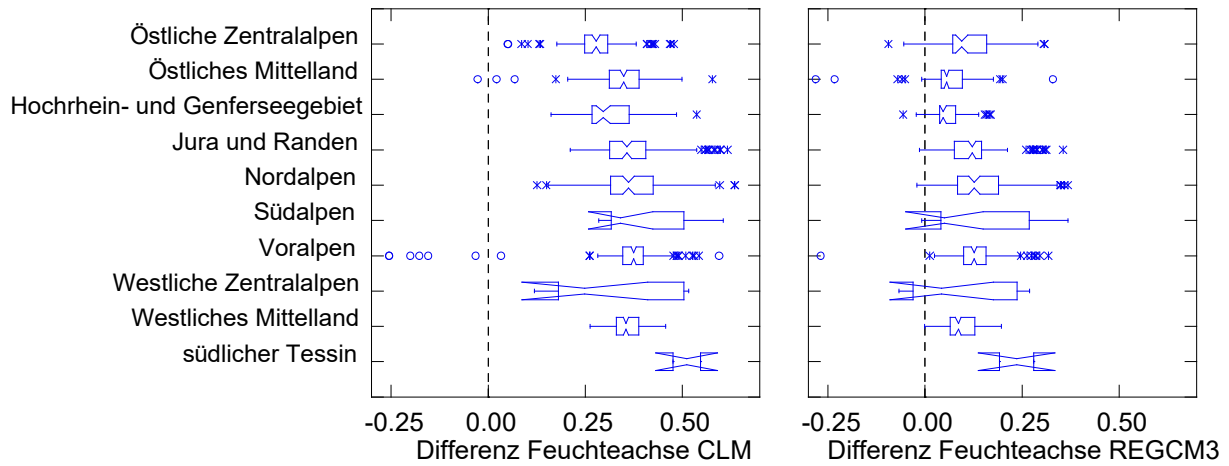


Abb. 13: Differenz zwischen dem für mit dem Klimamodell CLM Feuchteachse für die Zeitperiode 2070 bis 2099 und mit dem heutigen Klima vorausgesagten Werten für die Feuchteachse, aufgeteilt in 10 Regionen. Die Kerben geben den 95%-Vertrauensbereich an.

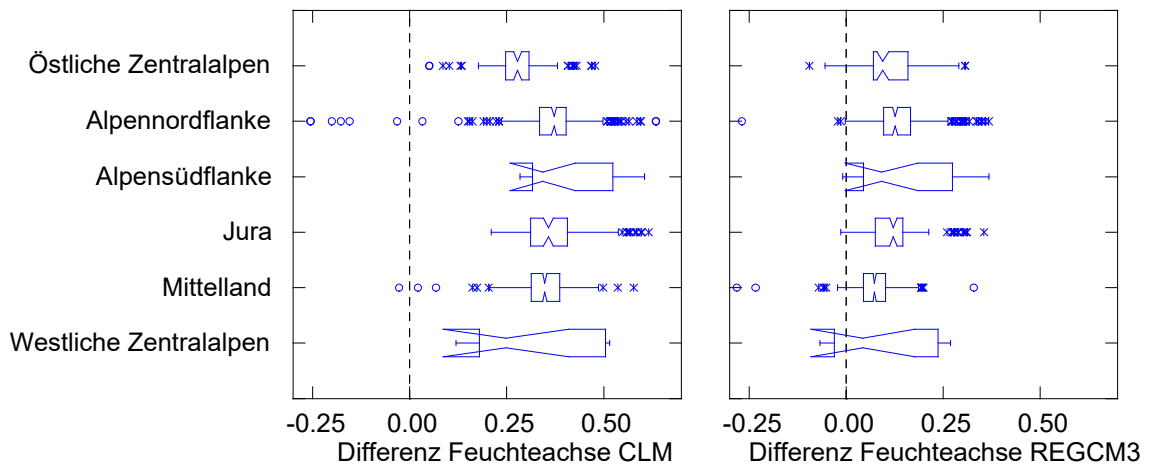


Abb. 14: Differenz zwischen dem für mit dem Klimamodell CLM Feuchteachse für die Zeitperiode 2070 bis 2099 und mit dem heutigen Klima vorausgesagten Werten für die Feuchteachse, aufgeteilt in 6 Regionen. Die Kerben geben den 95%-Vertrauensbereich an.

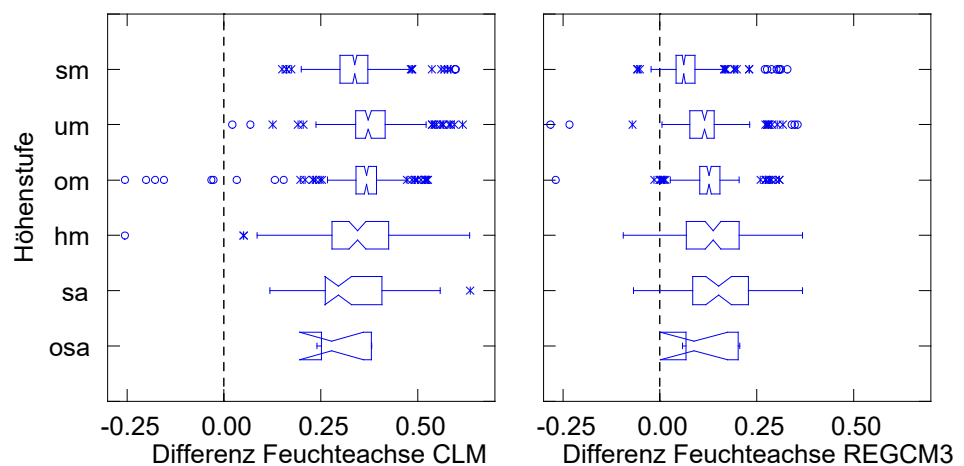


Abb. 15: Differenz zwischen dem für mit dem Klimamodell CLM Feuchteachse für die Zeitperiode 2070 bis 2099 und mit dem heutigen Klima vorausgesagten Werten für die Feuchteachse, aufgeteilt nach Höhenstufe (Höhe von oben nach unten zunehmend). Die Kerben geben den 95%-Vertrauensbereich an.

3.2 Graphische Darstellung der Profilstandorte «Trockenheitsindizes vs. NaiS-Standortstypen»

Pro Höhenstufe und Standortsregion sind in Anhang D die mit Coup-Modell geschätzten Trockenheitsindizes in Boxplots und als Medianwerte dargestellt. Es werden folgende Indizes geschätzt: Transpirationsverhältnis (AT/PWU_Summe, AT/PWU_Q2%), Evapotranspirationsverhältnis (ETa/ETp, Summe ETa/ETp_Q2%) und Wassersättigungsdefizit (SMD mean und SMD Q98), Beispiele: Abb. 16.

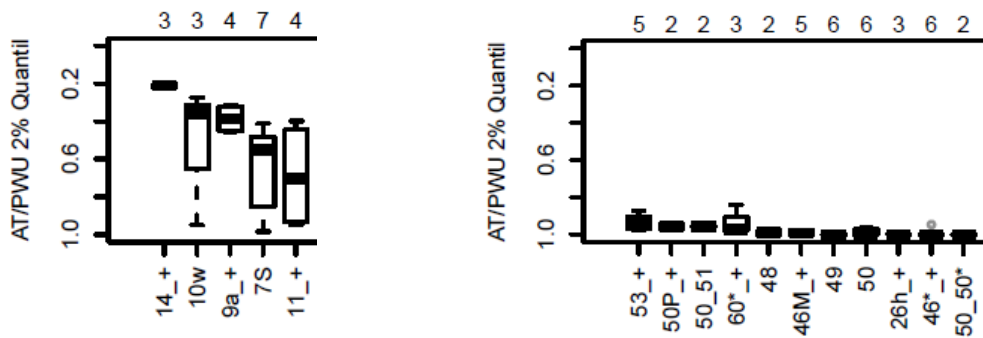


Abb. 16: Beispiele von Boxplots von AT/PWU 2% Quantil, links von Jura submontan, rechts von den nördlichen Randalpen hochmontan. Die Zahlen oben entsprechen der Anzahl Bodenprofile, die Zahlen unten dem NaiS-Standortstyp, bei zwei Zahlen handelt es sich um einen Übergang zwischen zwei NaiS-Standortstypen, bei einer Zahl inkl. + um einen NaiS-Standortstyp inkl. Übergänge.

Im Anhang E werden diese Trockenheitsindizes pro Ökogramm mit der qualitativen Feuchteachse verglichen. Beim Wassersättigungsdefizit ist die Übereinstimmung zwischen qualitativ und quantitativ deutlich schlechter als bei den anderen Indizes. Die anderen 4 Trockenheitsindizes weisen beim Vergleich mit der qualitativen Achse nur kleine Abweichungen in der Reihenfolge auf. Es gibt aber das Problem, dass der Trockenheitsindex häufig kaum differenziert, vor allem in den oberen Lagen weisen die Trockenheitsindizes häufig den gleichen Wert auf. Beim AT/PWU 2% Quantil ist dies am wenigsten der Fall. Dies ist in Abb. 16 gut sichtbar. Die Boxplots zeigen die 30-Jahres-Mittelwerte der oben genannten Indices gruppiert nach NaiS-Standortstypen nach absteigender Feuchtigkeit geordnet. In der submontanen Höhenstufe des Jura differenziert der verwendete Trockenheitsindex recht gut, in der hochmontanen Stufe der nördlichen Randalpen praktisch nicht.

Mit den zur Verfügung stehenden Daten ist die Differenzierung der qualitativen Feuchteachse mit Hilfe des Indexes AT/PWU 2% Quantil (oder anderer Indizes) wie in Tab. 6 dargestellt möglich. Die Beurteilung wird erschwert, da nicht alle Ökogramme gut mit Bodenprofilen abgedeckt sind.

Tab. 6: Güte der Differenzierung der qualitativen Feuchteachse mit Hilfe des Trockenheitsindex AT/PWU 2% Quantil. Blau und orange markierte Felder sind im qualitativen Ökogramm nicht enthalten. Bei dunkelgrün markierten Feldern ist die Feuchteachse gut mit Bodenprofile abgedeckt, bei hellgrün markierten Feldern nur teilweise und bei weissen Feldern schlecht bis gar nicht. Die im Text erwähnten Abweichungen beziehen sich auf die Übereinstimmung der Reihenfolge beim Vergleich qualitativ - quantitativ.

	collin	submontan	untermontan	obermontan	hochmontan	subalpin	obersubalpin
Jura	Stufe nicht vorhanden, mit Klimawandel zu erwarten	Gut von feucht bis sehr trocken	Gut von feucht bis sehr trocken Einzelne Abweichungen	Gut von feucht bis mittel	Keine Profile vorhanden	Stufen wegen zu geringer Meereshöhe heute nicht vorhanden	
Mittelland	Gut von mittel bis trocken	Gut von nass bis trocken Einzelne Abweichungen	Gut von Mittel bis trocken, nicht von nass bis mittel Einzelne Abweichungen	Nicht von feucht bis mittel, wenige Profile	Keine Profile vorhanden	Stufen wegen zu geringer Meereshöhe heute nicht vorhanden	
1 Nördliche Randalpen	Stufe nicht vorhanden, mit Klimawandel zu erwarten	Keine Profile vorhanden	Gut von feucht bis mittel	Nicht von nass bis trocken	Nicht von nass bis trocken	Profile nur für 1 Standort vorhanden	Stufe heute nur auf Spezialstandorten vorhanden
2 Nördliche Zwischenalpen	Nur 1 Standort mit Profilen vorhanden	Gut von mittel bis sehr trocken Einzelne Abweichungen	Nur 1 Standort mit Profilen vorhanden	Keine Profile vorhanden	Gut von mittel bis sehr trocken, nicht von feucht bis mittel	Gut von mittel bis sehr trocken	Profile nur für 1 Standort vorhanden
3 Kontinentale Hochalpen	Stufe nicht vorhanden, mit Klimawandel zu erwarten	Stufen nicht vorhanden, da Buche fehlt			Gut von mittel bis sehr trocken Einzelne Abweichungen	Wenig von mittel bis sehr trocken	Nicht von mittel bis trocken
4 Südliche Zwischenalpen	Keine Profile vorhanden	Stufen nicht vorhanden, da Buche fehlt			Profile nur auf mittleren Standorten vorhanden	Profile nur für 1 Standort	Keine Profile vorhanden
5a Südliche Randalpen mit Fichte	Gut von leicht feucht bis sehr trocken	Stufe nicht vorhanden	Profile nur auf mittleren Standorten vorhanden	Keine Profile vorhanden	Profile nur für 1 Standort vorhanden	Stufen wegen zu geringer Meereshöhe heute nicht vorhanden	
5b Südliche Randalpen ohne Fichte	Nur 2 ähnliche Standorte mit Profilen vorhanden	Stufe nicht vorhanden	Keine Profile vorhanden	Stufe nicht vorhanden	Keine Profile vorhanden	Stufen wegen zu geringer Meereshöhe heute nicht vorhanden	

Die AT/PWU 2% Quantil-Werte am gleichen Ort der qualitativen Feuchteachse weisen je nach Standortsregion und je nach Höhenstufe teilweise unterschiedliche Werte auf, siehe Abb. 17, 19, 20. Im Jura sind die gleichen Standorte allgemein quantitativ trockener als im Mittelland und den nördlichen Randalpen. Standortstypen, die qualitativ ähnlich feucht sind, sind collin trockener als submontan und submontan trockener als untermontan.

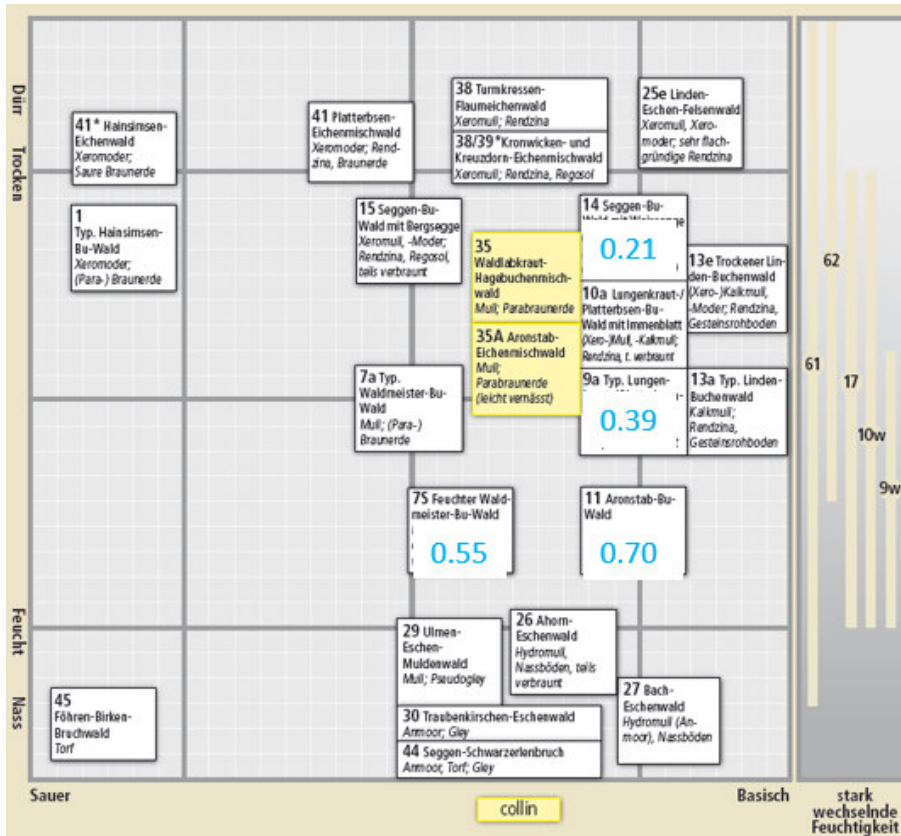


Abb. 17: Ökogramm Jura submontan. Blau eingetragen die Medianwerte des AT/PWU 2% Quantils.

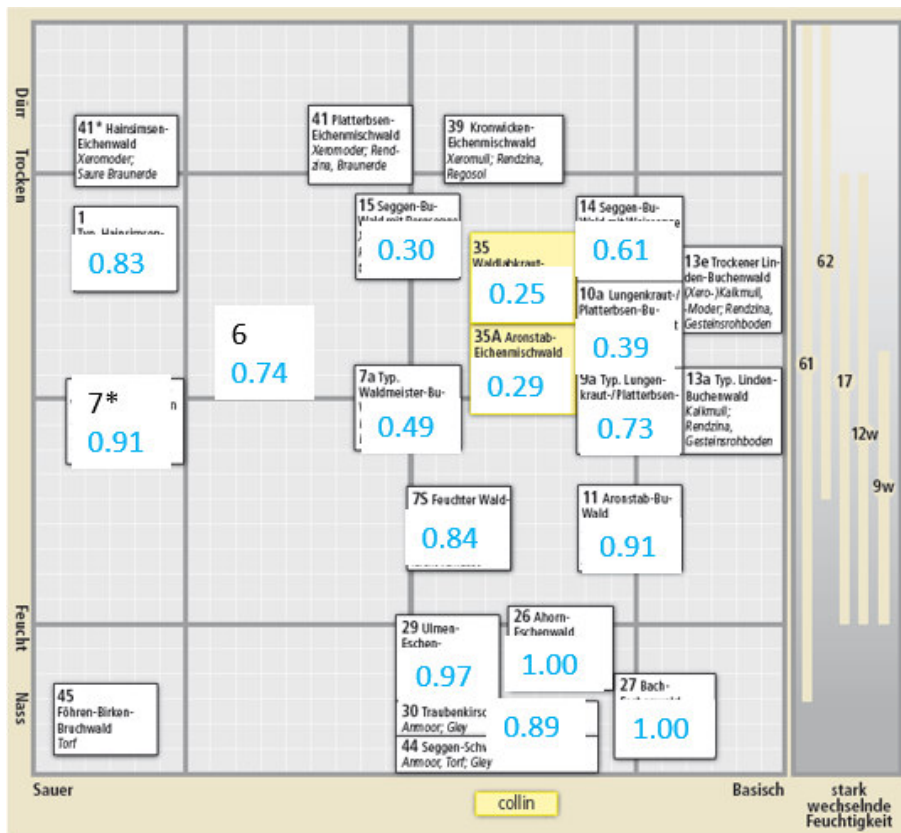


Abb. 18: Ökogramm Mittelland collin und submontan. Blau eingetragen die Medianwerte des AT/PWU 2% Quantils.

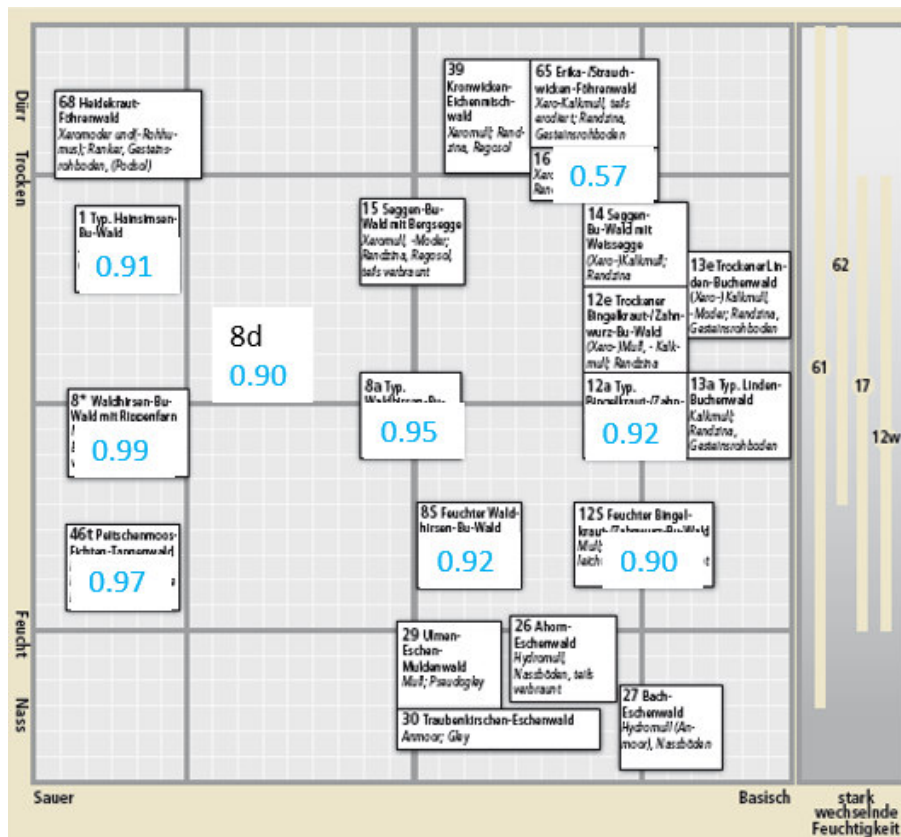


Abb. 19: Ökogramm Mittelland untermontan. Blau eingetragen die Medianwerte des AT/PWU 2% Quantils.

Mögliche Fehlerquellen:

- Zum Teil sind nur wenige Profile pro Standort vorhanden, besonders bei skelettreichen Standorten wechselt die Bodenbeschaffenheit sehr kleinräumig. Es ist möglich, dass einzelne Standortstypen durch die Profile nicht gut repräsentiert werden.
- Die Profile wurden im Büro mit Fotos, Vegetationsaufnahmen und Bodenprofilbeschreibung den NaiS-Standortstypen zugeordnet, einzelne Zuordnungen können falsch sein.
- Die Klimadaten wurden auf 250 m x 250 m interpoliert. Es ist besonders bei Standorten, die kleinflächig wegen extremen Lokalklimas entstehen, mit Fehlern zu rechnen.
- Die Bodenprofile sind max. 1.5 m tief. Bei Spezialstandorten (z. B. Blockschutt, Hangschutt) ist es möglich, dass die Wurzeln deutlich tiefer reichen.

In Anhang F wird die Veränderung der Trockenheitsindices unter Annahme der verwendeten 2 Klimazukünfte mit zwei verschiedenen Verfahren hergeleitet: Einerseits mit direkter Berechnung mit dem Coup-Modell am Bodenprofil mit den zukünftigen Klimadaten, andererseits indem die Höhenstufen mit den zwei Klimazukünften verschoben werden und im Ökogramm, das durch diese Verschiebung erreicht wird, an der gleichen Stelle der Feuchteachse Standortstypen mit Bodenprofilen gesucht werden und diese Werte verwendet werden.

Für diese Auswertung wurden pro Ökogramm die Werte von Standorten auf der gleichen Höhe der Feuchteachse zusammengefasst, indem die Medianwerte mit der Anzahl Bodenprofile gewichtet werden. Sonderwaldstandorte wurden nicht berücksichtigt.

Es wurde jeweils die Summe von AT/PWU dargestellt, da dieser Index bei der statistischen Analyse in Kap. 3.1 der Trockenheitsindex war, der knapp am besten abschnitt.

Mit der Verschiebung der Höhenstufe bleibt der Trockenheitsindex bei RegCM3 und CLM etwa gleich wie mit der direkten Berechnung, ausser wenn es eine Verschiebung in die colline Stufe (nicht analoge Standorte) gibt.

Diese Aussage gilt, falls sich die Hangwasserflüsse, die nasse Standorte verursachen, nicht wesentlich verändern. Leider steht heute kein Modell zu Verfügung, das die unterirdischen Wasserflüsse in kleinen Einzugsgebieten zuverlässig charakterisieren kann.

3.3 Diskussion

Die Hauptfrage des Projekts ist, ob die Ökogrammachse trocken-nass mit Trockenheitsindizes, Klima- und Standortparametern beschrieben werden kann und ob sich die NaiS-Standortstypen entlang der Feuchteachse verschieben, wenn sie mit dem Höhenstufenmodell von Abenis (Gubelmann et al., 2019) mit den beiden gewählten Klimazukünften einer «neuen» Höhenstufe zugeordnet werden.

Untersucht werden konnten vor allem die ozeanisch geprägten Gebiete Jura, Mittelland und nördliche Randalpen, da diese deutlich besser mit WSL-Bodenprofilen abgedeckt sind als die übrigen Gebiete.

Die statistische Analyse (Kap. 3.1) ergibt, dass Standortsregion und Höhenstufe die Feuchteachse beeinflussen, diese wurden als Cluster berücksichtigt. Die Hauptparameter zur Beschreibung der Feuchteachse sind Bodenphysik und Topografie. Die zusätzliche Berücksichtigung von Dampfdrucksättigungsdefizit sowie Trockenheitsindizes ergibt eine leichte Verbesserung des Bestimmtheitsmasses. Die Unterschiede zwischen den Einflüssen bei den verschiedenen Trockenheitsindizes sind gering. Die Anwendung des Regressionsmodells für das Klimamodell CLM ergibt eine Schätzung der Zunahme des Wertes der Feuchteachse um 0.39 Einheiten, ohne colline Standorte um 0.34 Einheiten. Die grössten Veränderungen werden im südlichen Tessin erwartet, die geringsten in den Zentralalpen.

Die graphische Darstellung der Profilstandorte «Trockenheitsindizes vs. NaiS-Standortstypen» (Kap. 3.2) zeigte, dass es eine Beziehung zwischen der Feuchteachse des qualitativen Ökogrammes und verschiedenen Trockenheitsindizes, die mit dem Coup-Modell berechnet wurden, gibt. Die Werte der Trockenheitsindizes an der gleichen Stelle der qualitativen Feuchteachse variieren aber je nach Höhenstufe und Standortsregion. Die mögliche Veränderung der Feuchtestufe unter Annahme der verwendeten 2 Klimazukünfte wurde mit zwei verschiedenen Verfahren hergeleitet: Einerseits mit direkter Berechnung mit dem Coup-Modell am Bodenprofil mit den zukünftigen Klimadaten, andererseits indem die Höhenstufen mit den zwei Klimazukünften verschoben wurden und im Ökogramm, das durch diese Verschiebung erreicht wurde, an der gleichen Stelle der Feuchteachse der Trockenheitsindex von den Bodenprofilen verwendet wurde, der mit dem heutigen Klima berechnet wurde. Solange man sich bei der Verschiebung in gut mit Bodenprofilen abgedeckten Ökogrammen befand, waren die Ergebnisse etwa gleich. Bei einer Verschiebung in Höhenstufen, deren Ökogramm wenig bekannt ist («nicht analoge Standorte»), ist die Lage der Standortstypen im Ökogramm noch nicht klar.

Das Hauptziel des Projektes besteht darin, zu klären, ob und wie sich die NaiS-Standortstypen entlang der Feuchteachse verschieben, wenn sie mit dem Höhenstufenmodell von Abenis (Gubelmann et al., 2019) mit den beiden gewählten Klimazukünften einer «neuen» Höhenstufe zugeordnet werden. Die statistische Analyse und der graphische Ansatz ergeben beide, dass Standortsregion und Höhenstufe die Feuchteachse beeinflussen, das heisst, dass mit der Verschiebung der Höhenstufe auch die Feuchteachse beeinflusst wird. Nach der statistischen Analyse gibt es ohne Berücksichtigung der collinen Standorte bei der Klimazukunft CLM zusätzlich eine Verschiebung von 0.34 Einheiten. Mit dem graphischen Ansatz, basierend auf

Coup-Ergebnissen, konnte im Bereich der gut mit Bodenprofilen dokumentierten Ökogramme keine deutliche Verschiebung festgestellt werden.

Im Ökogramm erstreckt sich die Feuchteachse über 4 Einheiten (1 – 5). Die Feuchteachse ist je nach Ökogramm mit unterschiedlich vielen NaiS-Standortstypen abgedeckt, maximal sind es 8, meistens sind es weniger. Das bedeutet, dass ein NaiS-Standortstyp mindestens 0.5 Einheiten der Feuchteachse umfasst. Die Projektergebnisse zeigen keine Verschiebung entlang der Feuchteachse, die genügend gross ist, um im «Ziel-Ökogramm» der «neuen» Höhenstufe den nächsttrockeneren NaiS-Standortstyp zu wählen. Das heisst, dass im Ziel-Ökogramm der NaiS-Standortstyp am gleichen Ort des Ökogrammes gewählt werden soll. Befinden sich im Ziel-Ökogramm an der Stelle des ursprünglichen Standortstyps mehrere Standortstypen, soll der trockenere Standortstyp gewählt werden. Projektablauf

Das Projekt lief planmässig ab. Die Abgabefrist musste verlängert werden.

4 Ausblick

Da mit den über 1000 Bodenprofilen nur ein Teil der heute in der Schweiz vorkommenden Standortstypen abgedeckt ist, sollten weitere Bodenprofile bei schlecht oder gar nicht abgedeckten Standortstypen gegraben und dokumentiert werden. Diese Bodenprofile sollten gezielt an typisch ausgebildeten Standorten erstellt werden.

Um die Trockenheitsindices, die mit den Wasserhaushaltsmodellen Coup und WaSiM-ETH berechnet wurden, besser vergleichen und beurteilen zu können, sollten diese Modelle mit Daten aus Feldmessungen validiert werden.

Um zu überprüfen, ob bei nassen Standortstypen eine Änderung der Feuchtigkeitsverhältnisse zu erwarten ist, sollte ein Modell entwickelt werden, das die unterirdischen Wasserflüsse in kleinen Einzugsgebieten genügend genau berechnen kann.

5 Literatur

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden: Bodenkundliche Kartieranleitung, Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, 5. Aufl., 438 S.; 41 Abb., 103 Tab., 31 Listen, Hannover 2005.
- Benzler, J. H., Finnern, H., Müller, W., Roeschmann, G., Will, K. H. & Wittmann, O., 1982. Bodenkundliche Kartieranleitung. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 331 S.
- Braun, S., 2015. Erfassung und Behandlung gefährdeter Waldstandorte Bericht 2006 – 2014. Institut für angewandte Pflanzenbiologie Schönenbuch. Auftraggeber BAFU.
- Braun, S., 2016. Die Eignung verschiedener Trockenheitsindices zur Abschätzung des Trockenheitsrisikos für den Wald und standortsspezifische Entwicklung 2050/2100. Schlussbericht eines Projekts im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» von BAFU und WSL. Schönenbuch, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie.
- Bugmann, H. K., 1996. A simplified forest model to study species composition along climate gradients. *Ecology*, 77(7): 2055-2074.
- Ellenberg, H. & Klötzli, F., 1972. Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. *Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchsw.* 23, 5 – 132.
- Frehner, H. K., 1963. Waldgesellschaften im westlichen Aargauer Mittelland. *Beitr. Geobot. Landesaufn. Schweiz* 44, 96 S.
- Frehner, M., Burnand, J., Carraro, G., Frey, H. U. & Lüscher, P., 2009. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Anhang 2A. BUWAL, Bern.
- Frey H. U. 1995. Waldgesellschaften und Waldstandorte im St. Galler Berggebiet. Veröff. Geobotanisches Institut ETH, Stiftung Rübel, Zürich, 126a/b, 280 S.
- Grier, C.G. & Running, S.W., 1977. Leaf Area of Mature Northwestern Coniferous Forests: Relation to Site Water Balance. *Ecology* 58: 893-899.
- Gubelmann, P., Huber, B., Frehner, M., Zischg, A., Burnand, J. & Carraro, G., 2019. Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel», Teil 1: Quantifizierung und Verschiebung der Höhenstufengrenzen sowie des Tannen- und Buchenareals in der Schweiz mit zwei Klimazukünften. Chur, Abenis AG. 194 S.
- Häring, T., Reger, B., Ewald, J., Hothorn, T. & Schröder, B. 2013. Predicting Ellenberg's soil moisture indicator value in the Bavarian Alps using additive georegression. *Applied vegetation Science* 16: 110-121.
- Holländer, H.M., Blume, T., Bormann H., Buytaert, W., Chirico G.B., Exbrayat J.-F., Gustafsson, D., Hölzel, H., Kraft, P., Stamm, C., Stoll S., Blöschl, G., Flüher, H. 2009. Comparative predictions of discharge from an artificial catchment (Chicken creek) using sparse data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13: 2069-2094.
- Hooghoudt, S. B., 1940. Bijdragen tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de ground. No. 7 Versl. Landb. Onderz. 42: 449-541.

- Huber, B., Zischg, A., Frehner, M., Carraro, G. & Burnand, J., 2015. Mit welchen Klimaparametern kann man Grenzen plausibel erklären, die in NaiS (Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald) verwendet werden, um Ökogramme auszuwählen? Schlussbericht November 2015. Chur, Abenis AG. 149 S.
- Jansson, P.-E. & Karlberg, L., 2011. Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. Royal Institute of Technology, Dept of Civil and Environmental Engineering, Stockholm 321 pp. <ftp://ftp.wsl.ch/pub/waldner/CoupModel.pdf>
- Meesenburg, H., Ahrends, B., Kallweit, R., Scheler, B., Wagner, M. & Fleck, S., 2014. Interzeption in Wäldern: eine (zu) wenig beachtete Grösse des Wasserkreislaufs. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 34.14. J.M. Klap, G.J. Reinds, A. Bleeker, W. de Vries, 2000: Environmental stress in German forests: Assessment of critical deposition levels and their exceedances and meteorological stress for crown condition monitoring sites in Germany.
- Monteith J. L. 1965. Evaporation and Environment. Proc. Sympos. Soc. Exp. Biol. 19, 205-234.
- Ott E., Frehner M., Frey H. U. & Lüscher P., 1997. Gebirgsnadelwälder. Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt-Verlag.
- Penman, H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Proc. Roy. Soc. (London, U.K.) A193 (1032), 120–145.
- Remund, J., Frehner, M., Walthert, L., Kägi, M. & Rihm, B., 2011. Schätzung standortspezifischer Trockenstressrisiken in Schweizer Wäldern. Schlussbericht. Meteotest, Bern.
- Richards, L. A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Journal of Applied Physics, 1(5): 318-333.
- Romanenko, V. A., 1961. Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area. In Proceedings. Ukrainian Hydrometeorological Research Institute (No. 3).
- Schleppi, P., Thimonier, A. & Walthert, L., 2011. Estimating leaf area index of mature temperate forests using regressions on site and vegetation data. Forest ecology and management, 261(3): 601-610.
- Schulla J. 2013. Model Description WaSIM (Water balance Simulation Model). Zürich. http://www.wasim.ch/de/products/wasim_description.htm
- Thornthwaite, C. W. & Mather, J. R., 1957. Instructions and tables for computing potential evaporation and the water balance. Publications in Climatology, 10(3).
- Van Genuchten, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898.
- Walthert, L., Zimmermann, S., Blaser, P., Luster, J. & Lüscher, P., 2004. Waldböden der Schweiz. Band 1. Grundlagen und Region Jura. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Bern, Hep Verlag. 768 S.
- Walthert, L., Scherler, M., Stähli, M., Huber, M., Baltensweiler, A., Ramirez-Lopez & L., Papritz, A., 2015. Boden und Wasserhaushalt von Wäldern und Waldstandorten der Schweiz unter heutigem und zukünftigem Klima, BOWA-CH. Schlussbericht. Schlussbericht eines Projekts im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Bern, und der Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. 117 S. <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-010658682>

Wasser B., Frehner M. et al. 1996. Wegleitung Minimale Pflegemassnahmen für Wälder mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt, Hrsg. BUWAL, Bern.

Zimmermann, N., 2000. *swb.aml* Programmcode. <http://www.wsl.ch/staff/niklaus.zimmermann/programs/aml/swb.aml>