



Scopus Indexed Journal

Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz – *Forest Ecology, Landscape Research and Nature Conservation*

www.afsv.de/index.php/waldoekologie-landschaftsforschung-und-naturschutz


Klassifikation oder Kontinuum: Wasserhaushalt in der traditionellen Standortskartierung und neuartigen physiographischen Standortinformationssystemen

Classification or continuum: Water balance in traditional site classification maps and modern physiographic site classification systems

Tobias Mette, Sebastian Osenstetter, Susanne Brandl, Wolfgang Falk & Christian Kölling

Abstract

The assessment of the site conditions is one of the most important preconditions in forestry for the selection of site-adapted tree species. In Bavaria, the traditional site classification on the one hand gathers forestry relevant soil properties in a nominal and ordinal-scaled 3-digit code. The physiographic Bavarian Site Information System BaSIS on the other hand is based on units of the Bavarian Soil Map 1 : 25,000 to which it assigns quantitative soil characteristics from soil profiles within the unit (available soil water capacity, bulk density, volumetric soil skeleton, depth profile of the base saturation, etc.). This study aims to statistically model the field expert's water balance classification (WBC), by means of measured climate and soil data (WBC model). Data basis are 1,349 profiles of the digital soil data base of the Bavarian Environment Agency, which are intersected with the site classification map and climate maps. To understand the significance of the water balance classification with respect to the site-inherent drought-risk, the WBC model is compared with two deterministic drought-stress sizes from water balance models of different complexity. The comparison clearly shows that the transpiration difference TDiff (as one of two deterministic drought-stress sizes and main determinant of the water balance in BaSIS) is much more precipitation-driven than the WBC-model. Finally – motivated by a good performance of the WBC-model – we investigate the potential of the water balance classification to derive the available water capacity as one of the most important soil characteristics. It shows that the consideration of traditional site classification in physiographic site classification systems can improve the parameter estimate. For practical implementation it is recommended to differentiate stronger between soil units or aggregated soil units, and include expert knowledge. In summary, this study establishes a bridge between a traditional and modern site classification system. It procures a

knowledge gain on both sides and supports communication between users of one or the other system.

Keywords: Water balance; forest site classification; site classification system; available water capacity; drought-stress

Zusammenfassung

Die Beurteilung von Standorteigenschaften ist eine der wichtigsten forstwirtschaftlichen Voraussetzungen für eine standörtlich angepasste Baumartenwahl. Die traditionelle Standortkartierung Bayerns klassifiziert forstlich relevante Bodeneigenschaften mit einem nominal- und ordinal-skalierten 3-ziffrigen Standortsschlüssel. Im physiographisch ausgelegten Bayerischen Standortinformationssystem BaSIS hingegen werden Bodeneinheiten der ÜBK 1 : 25.000 (Übersichtsbodenkarte des Bayerischen Landesamts für Umwelt) mit quantitativen Bodenkenndaten aus zugewiesenen Leitprofilen belegt (nutzbare Feldkapazität, Trockenrohddichte, volumetrischer Skelettgehalt, Tiefenverlauf der Basensättigung u. a.). Ziel dieser Studie ist es, den gutachterlichen Entscheidungsprozess der terrestrischen Wasserhaushaltsstufen (WHH-Stufen) der Standortkartierung unter Verwendung klimatischer und bodenkundlicher Größen statistisch nachzubilden. Datengrundlage sind 1.349 Profile des Bodeninformationssystems des Bayerischen Landesamts für Umwelt, die mit der Standortkarte und Klimakarten verschnitten wurden. Um die Aussagekraft der WHH-Stufe bezüglich der standörtlichen Trockenstress-Gefährdung zu verstehen, wird das Erklärungsmodell der WHH-Stufen mit zwei deterministischen Trockenstress-Größen unterschiedlich komplexer Wasserhaushaltsmodelle verglichen. Der Vergleich zeigt klar, dass die Transpirationsdifferenz TDiff als eine der beiden deterministischen Trockenstress-Größen und gleichzeitig Grundlage zur Ansprache des Wasserhaushalts in BaSIS wesentlich stärker niederschlagsgetrieben ist als die WHH-Stufe der Standortkartierung. In einem letzten Schritt wird – ermutigt durch eine relativ erfolgreiche Nachbildung der WHH-Stufen – das Potential der WHH-Stufen zur Schätzung der nutzbaren Feldkapazität als einer der

wichtigsten bodenkundlichen Kennwerte untersucht. Dabei zeigt sich, dass der Einbezug der Standortkartierung in physiographisch basierte Standortinformationssysteme die Schätzung dieser Parameter verbessern kann. Für die Praxis-Umsetzung empfiehlt sich, stärker nach den Bodeneinheiten oder aggregierten Bodeneinheiten zu differenzieren und Expertenwissen einzubeziehen. Zusammengefasst stellt diese Studie einen Brückenschlag zwischen den genannten Systemen her. Sie bringt einen Erkenntnisgewinn auf beiden Seiten und unterstützt die Kommunikation zwischen Nutzern des einen oder anderen Systems.

Schlüsselwörter: Wasserhaushalt; Standortkartierung; Standortinformationssystem; nutzbare Feldkapazität; Trockenstress

1 Einleitung

Die Beurteilung von Standortseigenschaften ist eine der wichtigsten forstwirtschaftlichen Voraussetzungen für eine standörtlich angepasste Baumartenwahl. Wie in den meisten Bundesländern handelt es sich auch in Bayern um einen zweistufigen Ansatz der Standortkunde. In der ersten Stufe werden Wuchsgebiete und -bezirke als regionale ökologische

Einheiten relativ einheitlicher Geologie und Klimas ausgeschieden (GAUER & ALDINGER 2005, WALENTOWSKI et al. 2001, 2006). In der zweiten Stufe werden als lokale ökologische Einheit forstlich relevante Standortseigenschaften mit einem nominal- und ordinal-skalierten 3-ziffrigen Standortsschlüssel erfasst (Tab. 1). „In dem System beschreibt die erste [tragende] Ziffer die Substratgruppe. Die zweite Ziffer bringt wesentlich Trophiemerkmale zum Ausdruck [+ Besonderheiten]. Die dritte Ziffer definiert den Wasserhaushalt [im Anhalt an KRAUSS 1936].“ (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003, S. 283). Im Kartenwerk werden darüber hinaus oftmals Zusatzbemerkungen eingefügt, z. B. Stratigraphie, Ausgangssubstrat, Bodentyp oder Variationen innerhalb der Einheit (Beispiele in VON LÖWIS et al. 2005). Die Standortkartierung wurde von ausgebildeten Standortkundlern der Bayerischen Staatsforstverwaltung und des Vereins für Standortserkundung (VfS Bayern) in den Jahren 1984–2006 durchgeführt, wobei mit Ausnahme des Wuchsgebiets 15 (bayerische Alpen) nahezu die vollständige Waldfläche Bayerns im 50 m x 50 m Raster begangen und kartiert wurde. Für die bayerischen Alpen wurde von EWALD (1999) eine im Ansatz bedingt vergleichbare vegetationsbasierte Standortkartierung entworfen (vgl. EWALD & BINNER 2005, WALENTOWSKI et al. 2001).

Tab. 1: Verschlüsselung der Standortseinheiten in Bayern (3-Ziffern-Code).

Tab. 1: Keys of the traditional site classification system in Bavaria (3-digit-code).

1. Ziffer: Bodenart und Schichtung		2. Ziffer: Bes. Merkmale		3. Ziffer: Wasserhaushalt	
0	Sand, Kies, Felsmosaik, Blockmosaik, Humuskarbonatboden	0	normal	0	(sehr) trocken
1	lehmiger Sand, sandiger Lehm	1	nährstoffarm, podsoliert	1	mäßig trocken, grundwechselltrocken
2	Lehm	2	nährstoffreich	2	mäßig frisch, mäßig grund-/hangfrisch
3	Feinlehm, Schlufflehm, Schluff	3	humusreich (2)	3	ziemlich frisch, frühjahrsfrisch, grundfrisch
4	milder Ton, Tonlehm, Kalkverwitterungslehm (1)	4	Karbonat oberhalb 50 cm	4	(sehr) frisch, hangfrisch, grundfeucht
5	strenger Ton (1)	5	Karbonat in 50–100 cm Tiefe	5	hangwasserzünftig, quellfrisch, wechselnd hangfeucht, (mäßig) hang(wechsel)feucht
6	Decksand und -lehm (Ton-/ Tonlehm höher 30 cm)	6	tongründig (3)	6	(mäßig) wechselltrocken
7	Schichtsand (Ton-/ Tonlehm in 30–60 cm Tiefe)	7	Verdichtung im Unterboden (4)	7	mäßig wechselfeucht, schwach wechselfeucht
8	Schichtlehm (Ton-/ Tonlehm in 30–60 cm Tiefe)	8	Hanglage	8	(stark) wechselfeucht, wechselnd feucht
9	Moor	9	anmoorig (5)	9	feucht (naß, staunaß, quellnaß)

(1) Deckschicht bis 10 (20) cm möglich [Anm.: in der Praxis beziehen sich die Attribute mild bzw. streng auf das Vorhandensein bzw. Nicht-Vorhandensein von Karbonat].

(2) humusreich: Anteil organischer Substanz im Boden 5–30 % (Feuchtböden max. 15 %) und Humus-Mineralbodenhorizont mind. 10 cm mächtig.

(3) tongründig: Ton(lehm) tiefer als 60 cm.

(4) Unterboden: tiefer als 60 cm.

(5) anmoorig: Gehalt an organischer Substanz im Boden 15–30 %.

Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt der Standortskarte für den Rodinger Forst. Für nicht wechselfeuchte Standorte zeigt die Grundfarbe die Substratklasse an (1. Ziffer). Der Wasserhaushalt (3. Ziffer) modifiziert die Grundfarbe mit einem kräftigeren Farbton für frischere Standorte und blässeren Farbton für trockenere Standorte. Wechselfeuchte Standorte sind schnell an der violetten Signalfarbe zu erkennen. Optimale Standorte sind braun und orange eingefärbte frische Lehme und Schluffe mit den Ziffern 204 oder 304. Diese einfache Visualisierung anbau-relevanter Standortfaktoren ist ein wesentlicher Grund für die hohe Akzeptanz des 3-Ziffern-Codes in der Forstpraxis. Allerdings übersetzt der Förster die Standortsziffern je nach Wuchsgebiet bzw. -bezirk in unterschiedliche Anbau-Entscheidungen. Im Wuchsgebiet 4 (Fränkische Platte) wird ein Förster selbst auf sehr frischen Standorten vor einer Bestandesbegründung mit Fichte zögern, während ein Förster im Wuchsgebiet 14 (Alpenvorland) selbst auf mäßig trockenen Standorten noch auf die Fichte setzt. Erst mit diesem lokalen (nicht im System enthaltenen) Expertenwissen entfaltet die traditionelle Standortkartierung ihre Kraft und Wirkung. Die Karten werden durch Erläuterungsbände ergänzt, die u. a. Bestockungsziele und Baumarteneignungstabellen enthalten.

An Grenzen stößt die Aussagekraft der Standortkartierung bei überregionalen Vergleichen z. B. zwischen Wuchsgebieten oder bei den sich ändernden Umweltbedingungen durch den Klimawandel. Das erste Problem, die überregionale Vergleichbarkeit, ist dabei gar nicht erst Zweck der Standortkartierung, da durch das sog. zweistufige Verfahren der Einfluss des Klimas über die Wuchsgebiets bzw. -bezirks-Zugehörigkeit gegeben ist. Das zweite Problem,

der Klimawandel, stellt die Förster in den einzelnen Wuchsgebieten vor größere Unsicherheiten, denn die lokal tradierte Übersetzung der Standortkartierung in Anbau-Entscheidungen bedarf nicht unerheblicher Anpassungen – und diese müssen angesichts der langen forstlichen Produktionszeiträume schon heute passieren. Vor diesem Hintergrund wurde im Projekt „Anpassung der bestehenden Standortkartierung (Maps for the future)“ im Zeitraum 2008–2012 das Bayerische Standortinformationssystem (BaSIS) ins Leben gerufen (LWF 2012, 2013, TAEGER & KÖLLING 2016). Im Gegensatz zur traditionellen Standortkartierung handelt es sich bei BaSIS um ein einstufiges System, wodurch das Klima ein wesentlich größeres Gewicht bekommt. Weiterhin stützt sich BaSIS rein auf numerische Messgrößen (Temperatur, Niederschlag, nutzbare Feldkapazität, Basentiefenverlaufstyp, Tiefe von Stau- und Grundwasserhorizonten u. a.), die mit den Standortansprüchen der einzelnen Baumarten verglichen werden (FALK & MELLERT 2011, FALK & HEMPELMANN 2013, LWF 2012: 73–88, FALK et al. 2013). Dadurch kann BaSIS die zukünftige Baumarteneignung im Klimawandel einwerten, wobei standardmäßig das vergleichsweise milde WETTREG SRES-B1 Szenario angenommen wird (SPEKAT et al. 2007). In BaSIS ist die gesamte bayerische Waldfläche inklusive der Alpen in 10 m Auflösung beschrieben. Klima- bzw. Bodeninformation wurden dabei aus geringer aufgelösten Karten interpoliert bzw. gerastert. Die bodenkundliche Information basiert auf den Einheiten der Übersichtsbodenkarte ÜBK 1:25.000, deren Bodeneigenschaften über repräsentative Profile abgeleitet wurden (LWF 2012: 44–72). Komplexe Bodeneinheiten wurden mit Hilfe eines 10 m x 10 m auflösenden DGM anhand von Reliefpositionen disaggregiert (HÄRING et al. 2012) und so ein Maßstab von 1:10.000 bis 1:25.000 erreicht.

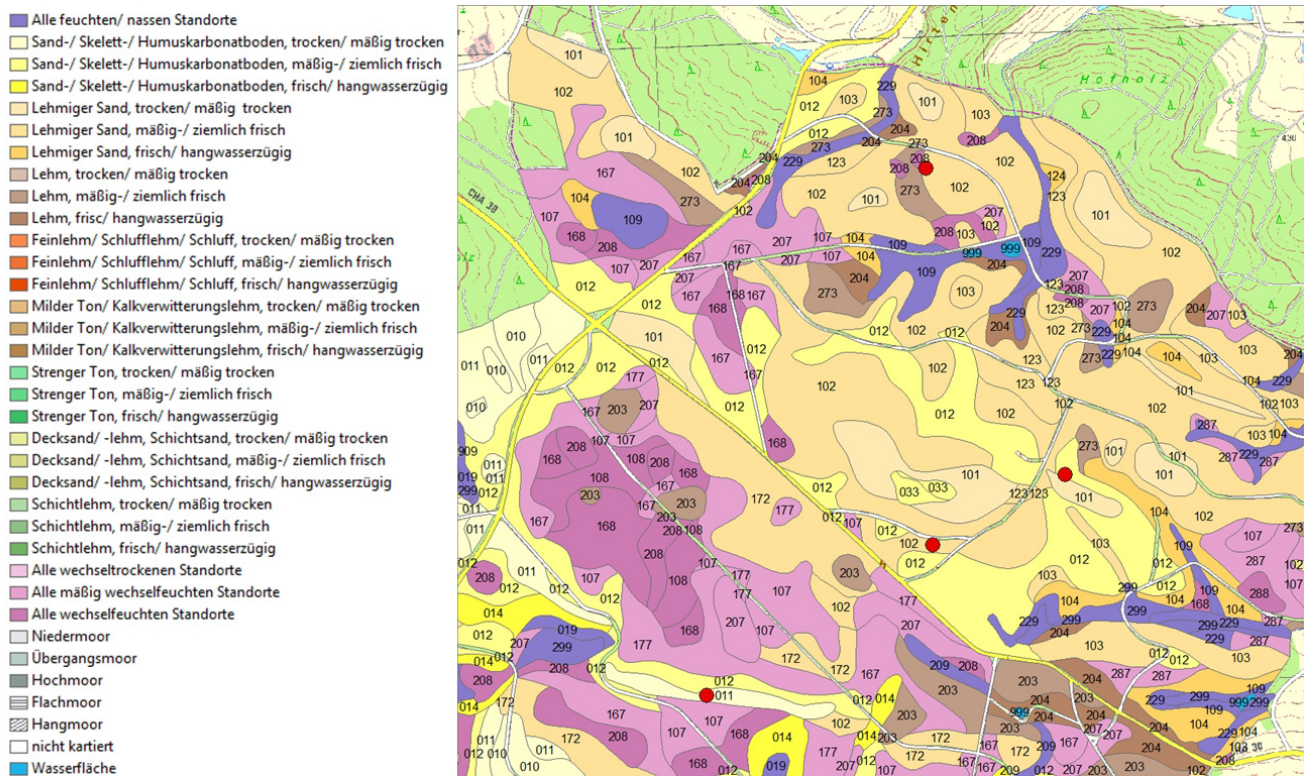


Abb. 1: Standortskarte im bayerischen 3-Ziffern-Code für das Staatswaldgebiet des Rodinger Forst am Ostrand des Oberpfälzer Beckens, 450–500 m üNN (Wuchsgebiet 9.1 Oberpfälzer Becken- und Hügelland).

Fig. 1: Site classification map in Bavarian 3-digit-code for the state forest “Rodinger Forst” at the Eastern edge of the “Oberpfälzer Becken”, 450–500 m a. s. l. (growth region 9.1 “Oberpfälzer Becken- und Hügelland”).

Um die traditionelle Standortkartierung und BaSIS vergleichen zu können und ggfs. die Stärken beider Systeme nutzen zu können, wurde 2012 eine „Homogenisierung der Wasserhaushaltsangaben in den Standortskarten des Staatswalds“ erarbeitet (OSENSTETTER et al. 2012). Ziel war es, die fünf Klassen des terrestrischen Wasserhaushalts (WHH) der bayerischen Standortkartierung mit physiographischen Variablen zu erklären. In einem „random Forest“-Modell mit acht erklärenden Variablen zeichneten insbesondere Jahresniederschlag und -temperatur, nutzbare Feldkapazität und Luftkapazität, Ton- und Skelettgehalt, Neigung und expositionskorrigierte Strahlung hatten eine geringe Erklärungskraft. Dies bedeutet nicht unbedingt, dass z. B. Neigung und Exposition nur geringen Einfluss auf die WHH-Ansprache haben, sondern eher, dass der Einfluss unterschiedlich gehandhabt wird. Weiterhin ergab eine Residuenanalyse keine erkennbare räumliche Abhängigkeit der Modellprognosen, wie dies bei einem zweistufigen Ansatz erwartet werden könnte. Die Erklärung liegt darin, dass mögliche regionale Unterschiede in der WHH-Ansprache durch die Standortkundler von den – in Bayern sehr starken – räumlichen Gradienten der Parameter Niederschlag und Temperatur aufgefangen werden.

Wir bauen im vorliegenden Artikel auf der Datengrundlage und den Ergebnissen der Studie von OSENSTETTER et al. (2012) auf. Ziel und Kern unserer Studie liegen weniger in einer statistischen Optimierung, sondern in der **Nachbildung der gutachterlichen Schätzung des terrestrischen Wasserhaushalts** unter Zuhilfenahme physiographischer Variablen. Denn es existieren keine schriftlich fixierten allgemeingültigen Richtlinien für die Standortansprache in Bayern. Die AK STANDORTSKARTIERUNG (2003) dokumentiert als Richtlinie: „[...] für die durchlässigen Standorte ohne Wasserzufluss [...] dient als Prüfgröße die Zeitspanne, während der Bäume nach Aufsättigung des Bodens bis zur Feldkapazität ohne weitere Niederschläge voll assimilieren können [...]. Ein Anhalt dafür ergibt sich durch Division der Speicherleistung für leicht verfügbares Wasser im durchwurzelbaren Bodenraum durch 3 mm Wasserverbrauch pro Tag.“ Diese Definition bezieht sich also direkt auf die nutzbare Feldkapazität als primäre quantitative Bezugsgröße für die Wasserhaushaltsstufe. Des Weiteren heißt es: „Berücksichtigt man zusätzlich die Niederschlagshöhe in den einzelnen Wuchsbezirken, so können für die Ansprache des Wasserhaushalts auch über den Wuchsbezirk hinausgehende Bezugsräume (z. B. Wuchsgebiete) verwendet werden.“ Der Einbezug des Niederschlags in den Wasserhaushalt wird somit nachgeordnet und kommt primär bei Niederschlags-Gradienten innerhalb eines Wuchsgebiets zum Tragen. Für überregionale Vergleiche verweist die Standortkunde „[...] als Eichmaßstab [auf die] Einwertung [der] Oberhöhenbonität der Fichte [...], weil gerade diese auf Bodenfrische deutlich reagiert.“

Ausgehend vom modellhaften Verständnis der standortkundlichen WHH-Ansprache vergleichen wir im weiteren Verlauf des Artikels zwei physiologisch wirksame Wasserhaushaltsgrößen – wie sie z. B. in physiographischen Standortinformationssystemen zum Einsatz kommen – mit den WHH-Stufen der Standortkunde. Abschließend eruiieren wir erste Ansätze, die WHH-Stufen der Standortkartierung in quantitative bodenkundliche Parameter zu übersetzen. Denn die Möglichkeit einer Einbindung der Standortkunde in physiographische Informationssysteme ist insbesondere durch die hohe räumliche Differenzierung der Standortkunde sehr attraktiv.

Zusammenfassend stellen wir folgende drei Hypothesen (H1-3):

- H1. Der gutachterliche Entscheidungsprozess zur Bewertung des Wasserhaushalts in der traditionellen Standortkartierung lässt sich unter Zuhilfenahme bodenkundlicher und klimatischer Kennwerte statistisch nachbilden.
- H2. Die Wasserhaushaltsstufen der Standortkunde sind mit physiologisch wirksamen Wasserhaushaltsgrößen vergleichbar.
- H3. Die Wasserhaushaltsstufen der Standortkunde erlauben bei Verwendung von Substrat und physiographischer Kovariablen die Ableitung der nutzbaren Feldkapazität als wichtiger bodenkundlicher Kennwert.

Oberflächlich betrachtet stellen wir in dieser Studie ein klassifizierendes expertenbasiertes System und ein numerisch-„kontinuierliches“ datengestütztes System gegenüber. Im Hintergrund schwingen dabei allerdings auch zwei Arbeitsphilosophien mit und die Furcht, dass die traditionelle „gute alte“ feldbezogene Arbeitsweise (und das Wissen) gänzlich von modernen Computer-Arbeitsplätzen verdrängt wird. Mit dieser Studie versuchen wir, eine Brücke zu schlagen zwischen beiden Systemen hinsichtlich ihrer Kompatibilität (H1), ihrer ökophysiologischen Interpretation (H2) und des Potentials ihrer Kombination (H3).

2 Methoden

2.1 Daten

Die Studie greift auf die Datenbasis von OSENSTETTER et al. (2012) zurück. Darin wurde die Standortkartierung in Staatswaldgebieten mit Profilen des Bodeninformationssystems des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU, ehemals Bayerisches Geologisches Landesamt GLA) verschnitten. Es wurden nur solche Profile zugelassen, deren Horizontbeschreibung eine verlässliche Schätzung der nutzbaren Feldkapazität bis 1 m Tiefe zuließ (Abk.: *nFk*), d. h. im Wesentlichen vollständige Angaben zu Textur, Skelett und organischem Kohlenstoff (C_{org}) beinhaltete. Nach Plausibilisierung der Lage-Koordinaten über den Vergleich der Profil-Angaben zu Höhe und Hangneigung mit einem digitalen Geländemodell (DGM, Auflösung 10 m) resultierten aus dieser Schnittmenge 1.954 Profile. Davon lagen 1.349 Profile (69 %) in Standortseinheiten mit terrestrischem Wasserhaushalt, d. h. der WHH-Stufe 0–4 (vgl. Tab. 1). Bei den restlichen 605 Profilen (31 %) handelt es sich um wechselfeuchte bzw. nasse Standorte laut Standortkartierung, die nicht Gegenstand dieser Studie sind.

Um den gutachterlichen Entscheidungsprozess zur Bewertung des Wasserhaushalts statistisch nachbilden zu können (Hypothese 1), wurden nach ersten statistischen Analysen die vier Kovariablen (Prädiktoren) mit dem höchsten Erklärungswert ausgewählt: (1) die Substratziffer der Standortseinheit (vgl. Tab. 1), (2) die nutzbare Feldkapazität aus den Profildaten, (3 und 4) der Niederschlag und die Temperatur während der Vegetationszeit (N_{veg} und T_{veg}) aus regionalisierten Klimakarten Bayerns in 50 m x 50 m Auflösung (HERA et al. 2012). Neigung, Exposition sowie Skelett und Mächtigkeit wurden aufgrund ihres geringen Erklärungswerts ausgeschlossen. Wie schon in der Einleitung erwähnt, bedeutet dies nicht,

dass sie keinen Einfluss auf die WHH-Ansprache haben, sondern eher, dass ihr Einfluss unterschiedlich gewertet wird. Die Bonität der Fichte als zusätzliches Kriterium für die WHH-Ansprache im Feld, ebenso die Baumart oder Bemerkungen zur Bodenvegetation, waren nur im Ausnahmefall verfügbar und konnten daher nicht berücksichtigt werden. Geographische Variablen in Form von Koordinaten oder dem Wuchsgebiet wurden nicht einbezogen, da sie in Bayern stark mit Niederschlag und Temperatur korrelieren.

Die nutzbare Feldkapazität nFk wurde nach TEEPE et al. (2003) zunächst horizontweise für 100 % Feinboden berechnet ($nFk_{Hor, Feinbd}$, Gl. 1), dann um den Skelettanteil reduziert (nFk_{Hor} , Gl. 2) und im letzten Schritt über die Horizontmächtigkeiten bis zur Profiltiefe bzw. max. 1 m summiert (nFk_{1m} , Gl. 3):

$$nFk_{Hor, Feinbd} = 0.417 - 0.164 \cdot TRD - 0.0012 \cdot T + 0.0006 \cdot U \quad (1)$$

mit T für Ton und U für Schluff. Wertebereich begrenzt auf $10.5 < nFk_{Hor, Feinbd} < 31.8$

$$nFk_{Hor} = nFk_{Hor, Feinbd} \cdot (100 - \text{Skelett}) \quad (2)$$

$$nFk_{1m} = \text{Summe}(nFk_{Hor} \cdot \text{Mächtigkeit}_{Hor}) \quad (3)$$

mit $\text{Mächtigkeit}_{Hor} = \text{Untergrenze}_{Hor} - \text{Obergrenze}_{Hor}$

Einheiten: $nFk_{Hor, Feinbd}$ in mm/dm Feinboden, nFk_{Hor} in mm/dm Boden, nFk_{1m} in mm bis 1 m Bodentiefe, TRD als Trockenrohichte in $g\ cm^{-3}$, Ton-, Schluff- und Skelettanteil in % und Mächtigkeit in dm als Differenz zwischen Horizontober- und -untergrenze bis maximal 1 m. Bei fehlenden Texturanalysen wurde die Bodenart-Ansprache in Prozentwerte übersetzt (nach KA5, AD-HOC AG BODEN 2005). Bei fehlender TRD wurde diese als Funktion der Tiefe und C_{org} ermittelt. Für tonige Böden der Klassen Ts2–4 wurden (TRD-abhängige) tabellarische Werte mit Humuskorrektur aus der KA5 veranschlagt, da hier die Datenbasis bei TEEPE et al. (2003) zu gering ist.

Das Konzept und die Ermittlung der nutzbaren Feldkapazität aus bodenphysikalischen Kennwerten ist Gegenstand vieler Studien (vgl. RENGER et al. 2008, RUSS et al. 2011, PUHLMANN & VON WILPERT 2012, RATCLIFF et al. 1983, CABELGUENNE & DEBAEKE 1998, KIRKHAM 2014). TEEPE et al. (2003) wird gern in der forstwissenschaftlichen Bodenkunde eingesetzt, da die Datengrundlage ausschließlich Waldböden umfasst. Für die hier verwendete Pedotransfer-Funktion ermittelten TEEPE et al. (2003) ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,38$. Eine mögliche Fehleinschätzung der sandigen Tone durch Verwendung der KA5 betrifft weniger als 0,5 % aller Horizonte.

2.2 Statistik

Bei den terrestrischen WHH-Stufen handelt es sich um ordinal (rang-) skalierte Daten, bei den Kovariablen (Prädiktoren) im Falle der Substratziffer um kategorial skalierte Daten und im Falle von nFk , N_{veg} und T_{veg} um metrisch skalierte Daten. Als prädestiniert für die Nachbildung menschlicher Entscheidungsprozesse gelten Entscheidungsbäume (classification and regression trees, kurz CARTs, BREIMAN et al. 1984). Der Vorteil liegt in der Möglichkeit, sowohl kategorial als auch metrisch skalierte Daten als Ziel- oder Prädiktorvariablen zu verwenden, sowie in der Nachvollziehbarkeit des Entscheidungsbaums. Der Nachteil liegt in einer harten Abstufung und „übergrenau“ gezogenen Grenzen, die bei Anwendung des Entscheidungsbaums auf neue Daten zu deutlich schwächeren Klassifikationsergebnissen führen (HASTIE et al. 2009). Diesen Nachteilen begegnen sog. boosted regression trees

(BRTs) durch iteratives Fitten von „Residual-Bäumen“ (ELITH et al. 2008). Bei BRTs ist der Einfluss von Prädiktorvariablen auf die Zielvariable nicht mehr stufig, sondern quasi-kontinuierlich. Der Entscheidungsweg von BRTs ist im Vergleich zu CARTs zu komplex für eine Darstellung.

Verlässt man die Entscheidungsbäume, so erzeugen Splines, wie sie in generalisierten additiven Modellen (GAMs) verwirklicht sind, kontinuierliche Kurvenverläufe des Effekts eines Prädiktors auf die Zielvariable. Splines können einen Kurvenverlauf sehr adaptiv nachbilden und passen dadurch ordinal und metrisch skalierte Variablen gleichermaßen an. Weniger adaptiv sind klassische oder generalisierte lineare Modelle (LMs oder GLMs), da hier der Funktionszusammenhang zwischen Prädiktor- und Zielvariable vorgegeben wird (auch wenn eine gewisse Flexibilität über Variablen-Transformationen besteht).

Mit den genannten Methoden lässt sich der Entscheidungsprozess zur Bewertung des Wasserhaushalts statistisch nachbilden (Hypothese 1). Als Vergleichskriterien der einzelnen Modelle ziehen wir den Anteil falsch zugewiesener WHH-Klassen (Abk.: MISCL = misclassification error; Fehlklassifikation) und die durchschnittliche Klassen-Abweichung (Abk.: RMSE = root mean square error; Quadratwurzelfehler) heran. Der misclassification error betrachtet die WHH-Klasse kategorial, der RMSE metrisch. Eine mögliche Überanpassung der Modelle wird durch iteratives zufälliges Teilen des Datensatzes in Kalibrier- und Validierungsdaten geprüft (10 Iterationen, Teilung 9:1). Der mittlere Quadratwurzelfehler der Validierungsdaten ($RMSE_{pred}$) und das mittlere Bestimmtheitsmaß R^2_{pred} werden aus den 10 Iterationen berechnet. Der mittlere Fehler dient der Modellkontrolle und sollte 0 betragen. In Tabelle 2 sind neben den Ergebnissen auch die R-Pakete der jeweiligen statistischen Ansätze aufgeführt (R CORE TEAM 2014). In der Literatur findet man die vorgestellten Ansätze wie CARTs und BRTs oftmals unter den Überbegriffen des „data mining“ oder „machine learning“ (z. B. HASTIE et al. 2009).

Lineare Modelle kommen auch bei Hypothese 2 und Hypothese 3 zum Einsatz. Für Hypothese 2 werden dem Modell zur Erklärung der WHH-Stufen ähnliche Modelle deterministischer Trockenstress-Größen (s. u.) gegenübergestellt. In Hypothese 3 wird das WHH-Modell aus Hypothese 1 umgestellt und versucht, die nFk aus den WHH-Stufen und anderen Kovariablen abzuleiten. Hier dient zur Gütebeschreibung der Quadratwurzelfehler RMSE sowie das Bestimmtheitsmaß R^2 . Auch hier wird durch iteratives Teilen des Datensatzes in Kalibrier- und Validierungsdaten der Quadratwurzelfehler $RMSE_{pred}$ sowie das Bestimmtheitsmaß R^2_{pred} bestimmt.

2.3 Deterministik

Die Definition der WHH-Klasse in der Standortkartierung nimmt direkt Bezug auf die Trockenstress-Gefährdung eines Standorts, den sie primär über die Speicherleistung (nFk) des Bodens bewertet (vgl. Einleitung). Modifiziert man den Richtwert von 3 mm Evapotranspiration pro Tag, erhöht die Retention bei niedrigen Boden-Wassergehalten und berücksichtigt die Niederschlagsverteilung während der Vegetationsperiode, so erhält man ein sehr einfaches Wasserhaushaltsmodell, das den Ansprüchen der Wasserhaushaltsansprache der Standortkartierung sehr ähnlich ist. Wir legen folgende Schätzfunktion für die aktuelle Evapotranspiration als obere Quantilskurve durch den Carbo-Europe

Datensatz in BREDA et al. (2006, Abb. 5):

$$ET_{akt} = 2.5 * (1 - \exp(-10 * nFk_{sat}))^5 \quad (4)$$

mit ET_{akt} = aktuelle Evapotranspiration in mm/d und nFk_{sat} = aktuelle nFk/gesättigte nFk mit Werten zwischen 0 und 1 (Sättigung des nutzbaren Bodenwasserspeichers). Wertet man nun den Anteil der Tage, an denen während der Vegetationszeit das verfügbare Bodenwasser 40 % der nFk unterschreitet, so erhält man einen einfachen Trockenstress-Indikator (AHRENDTS et al. 2010, GRANIER et al. 1999, GRANIER et al. 2007, DVWK 1996). Für die dazu nötigen Klimadaten wurden 250 bayernweite Datensätze täglich aufgelöster Niederschlagsdaten von 1961–2013 ausgewählt (UH-Hamburg, vgl. METTE & KÖLLING 2015).

Als alternativer Trockenstress-Indikator wurde die im Projekt „Anpassung der bestehenden Standortskartierung (Maps for the future)“ modellgestützt (LWF-Brook90, HAMMEL & KENNEL 2001) ermittelte Transpirationsdifferenz TDIFF als Differenz von ETakt und ETpot in mm pro 100 d Vegetationszeit verwendet (LWF 2012, LWF 2013, SCHULTZE et al. 2005). Hier geht neben nFk und Niederschlag u. a. auch die Leitfähigkeit des Bodens sowie Temperatur, Strahlung und Wind mit ein. Beide Trockenstress-Indikatoren können als deterministische Ansätze mit der Einordnung der WHH-Stufen verglichen werden (Hypothese 2).

3 Ergebnisse

In Abbildung 2 ist die Verteilung der WHH-Stufen an den 1.349 Profilen dargestellt, links für alle Substrate, rechts getrennt nach Substrat. Mit N = 563 (42 %) dominieren „mäßig frische“ Standorte. Weitere 576 Standorte (43 %) verteilen sich auf die Stufen „ziemlich frisch“ und „frisch“, nur 210 (15,5 %) auf die Stufen „mäßig trocken“ und „trocken“. Die

trockenen WHH-Stufen fallen am ehesten in die Substratklassen „Sand“ und „milder Ton“, die frischen WHH-Stufen in die Klassen „Lehm“ und „Schluff“.

Im nFk-Niederschlags-Diagramm (Abb. 3) erkennt man, dass tendenziell trockene WHH-Stufen eher bei niedriger nFk und Niederschlägen in der Vegetationszeit (N_{veg}) vergeben werden und frische WHH-Stufen bei hoher nFk und N_{veg} , allerdings ist die Streuung groß. Wie die Randverteilungen in Abbildung 3 anzeigen, liegt zudem der Schwerpunkt aller WHH-Stufen eng beisammen im Bereich um 150 mm nFk und 350 mm N_{veg} . Schon hier sieht man den scheinbaren Widerspruch, dass auf der einen Seite geringe nFk und N_{veg} die Zuweisung der WHH-Stufe 1 wahrscheinlich machen, aber auf der anderen Seite die WHH-Stufe 1 nicht gleichzeitig geringe nFk und N_{veg} bedeutet.

H1: Nachbildung der gutachterlichen Ansprache der WHH-Stufe

Um den gutachterlichen Entscheidungsfindungsprozess nachzubilden, zeigt Abbildung 4 als erstes statistisches Verfahren einen classification tree aus der Gruppe der CART (classification and regression trees). Im Unterschied zum regression tree wird die Zielvariable (WHH-Stufe) hier als nominal und nicht numerisch betrachtet. (Allerdings sind die Ergebnisse von classification und regression sehr ähnlich.) Der Entscheidungsbaum in Abbildung 4 trennt in erster Instanz die Substrate, und zwar die eher sandigen, tonigen und geschichteten Böden (links) von den Lehmen und Schluffen (rechts). Der linke Ast wird weiter aufgetrennt: (links) nach Sanden und milden Tonen, unter denen die mäßig trockene WHH-Stufe 1 bzw. mäßig frische WHH-Stufe 2 dominieren – erstere bei einer nFk < 77 mm, letztere bei einer nFk > 77 mm; (rechts) nach lehmigen Sand, strengen Tonen und Schichtböden, die je nach N_{veg} eher der mäßig oder ziemlich

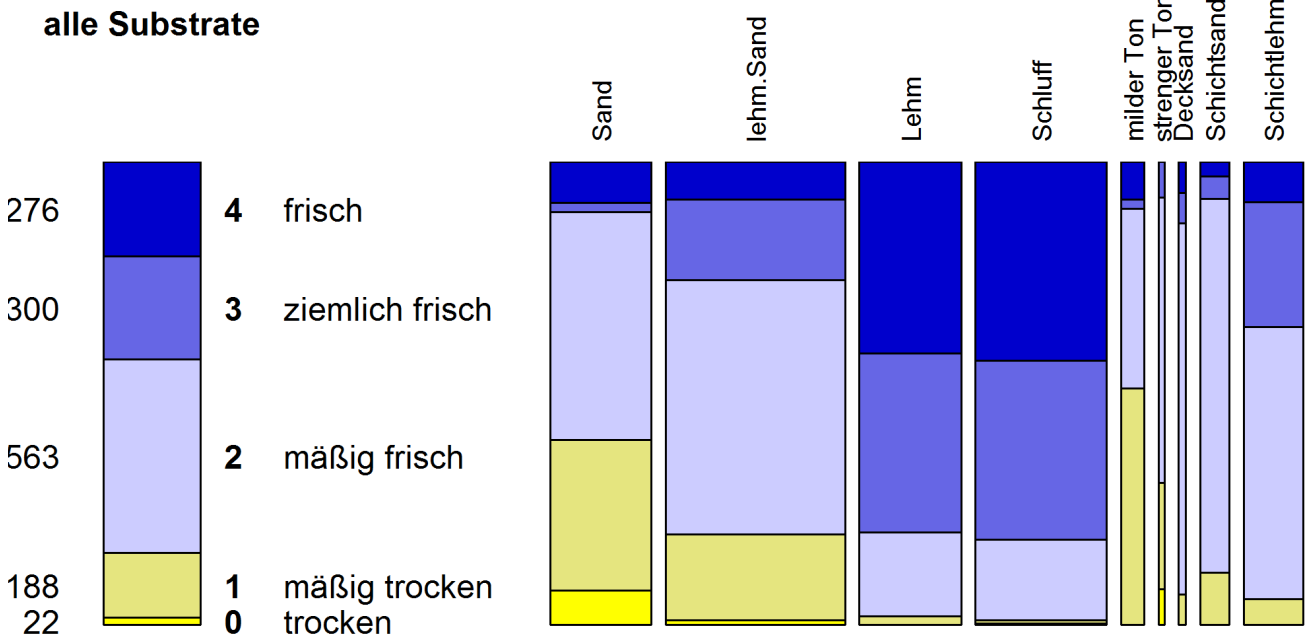


Abb. 2: Anteile der terrestrischen WHH-Stufen 0–4 der bayerischen Standortskartierung an den ausgewählten 1.349 Profilen (= Probe-punkte) in Bayerns Wäldern, links für alle Substrate, rechts getrennt nach Substraten. In der rechten Darstellung ist die Balkendicke proportional zum Auftreten der Substrate.

Fig. 2: Share of the terrestrial water balance classes 0–4 of the Bavarian site classification for the selected 1,349 forest soil profiles (= sampling points), left for all substrate classes, right for each substrate class separately. The thickness of the bar in the right diagram is proportional to the substrate presence in the sample profiles.

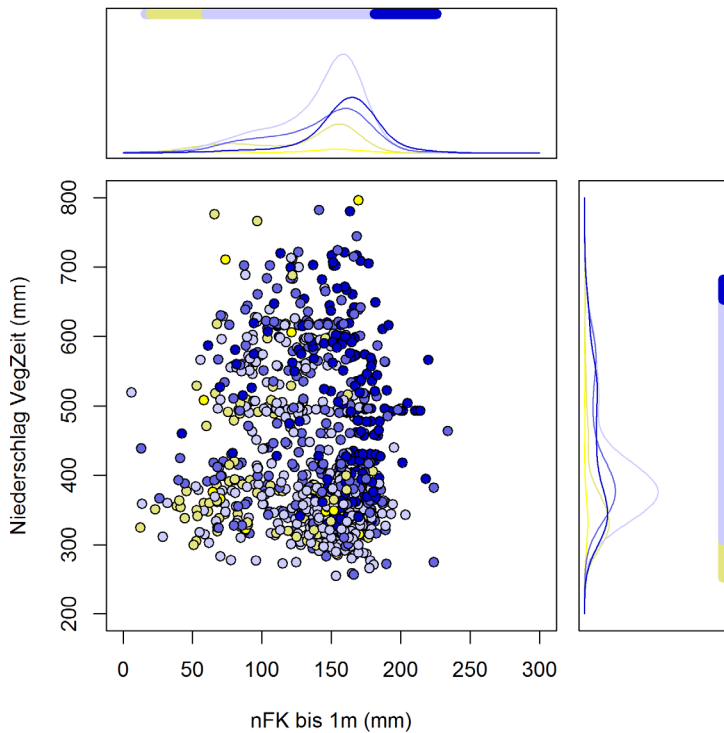


Abb. 3: nFk-Niederschlags-Diagramm der WHH-Stufen 0–4 an den 1.349 Probestellen. Die Randverteilungen der WHH-Stufen für nFk und Niederschlag wurden mittels kernel density geglättet. Der Balken über den Verteilungen zeigt die dominante WHH-Stufe im jeweiligen nFk- bzw. Niederschlags-Spektrum an. WHH-Stufen 0–4 in den Farben gelb bis dunkelblau wie in Abbildung 2.

Fig. 3: Available water capacity AWC-precipitation diagram for the water balance classes 0–4 at the 1,349 sample profiles. The distributions at the margins were smoothed. The bar above the distributions represents the dominant water balance class over the AWC and precipitation spectrum, respectively (colors as in Fig. 2).

frischen WHH-Stufe zugeordnet werden (WHH-Stufe 2 oder 3). Der rechte Ast des Entscheidungsbaums mit den Lehmen und Schluffen ist generell frischer. Nur bei $N_{veg} < 349,5$ mm (in der Vegetationszeit) und T_{veg} unter $15,3$ mm dominiert noch die WHH-Stufe 2, ansonsten Stufe 3. Ganz rechts bei $N_{veg} > 376$ mm und einer nFk $> 146,5$ mm (bzw. bei nFk $< 146,5$ mm und $T_{veg} < 12,64$ °C) wird fast immer die höchste WHH-Stufe 4 vergeben. Insgesamt werden die WHH-Stufen von links nach rechts zunehmend frischer. Die herangezogenen Einteilungskriterien sind nachvollziehbar, auch wenn die Grenzen etwas „übergrenzt“ erscheinen. Folgt man der Aufteilung in die drei Substratgruppen, so kann man den Entscheidungsbaum und seine Grenzen in drei nFk-Niederschlags-Graphiken darstellen (Abb. 4 unten). Bei den Sanden und milden Tonen links handelt es sich um eine nFk-Grenze, bei den sandigen Lehmen, strengen Tonen und Schichtböden um eine Niederschlagsgrenze, und bei den Schluffen nimmt die Wasserhaushaltsstufe sowohl mit der nFk als auch N_{veg} zu. Die sehr feine Zuordnung von N_{veg} zwischen $349,5$ mm und 367 mm zur WHH-Stufe 3 wirkt hingegen künstlich.

Beim boosted regression tree BRT (Abb. 5a) werden die harten binären Abstufungen von CARTs geglättet und nähern sich stufenlosen Kurvenverläufen an. Die Baumstruktur lässt sich nicht mehr darstellen, allerdings können analog zu Abbildung 4 die Wasserhaushaltsstufen in einem nFk-Niederschlags-Diagramm nach Substraten getrennt verortet werden. Das BRT detektiert WHH-Sprünge zwischen den Substraten: Sand (links) < lehmiger Sand (Mitte), Ton und Deck- bzw. Schichtsand < Schichtlehm (nicht gezeigt) < Lehm und Schluff (rechts). Das Grundverhalten zunehmender Frische mit zunehmender nFk und N_{veg} bleibt erkennbar bestehen. Die Gewichtung der Kovariablen spiegelt die Instanzen des Entscheidungsbaums aus Abbildung 4 wider: Substrat 45 %, N_{veg} und nFk jeweils 20 % und T_{veg} 15 % (nicht dargestellt).

Abbildung 5b zeigt in gleicher Weise die Bestimmung der WHH-Stufen mit einem generalisierten additiven Modell

(GAM). Die WHH-Stufe nimmt mit den Substraten wie folgt zu: Sand (links) und Ton < lehmiger Sand (Mitte) und Deck-/ Schichtsand < Schichtlehm (nicht dargestellt) < Lehm und Schluff (rechts). Im Vergleich zu CART und BRT passt sich das GAM sehr adaptiv an die Daten an. Die kleinen im BRT noch sichtbaren Abstufungen werden nun gänzlich fließend. In Abbildung 5b lässt sich auch sehr klar ein Effekt erkennen, der bisher noch nicht aufgegriffen wurde: die Verortung der WHH-Stufen im nFk-Niederschlags-Diagramm ist zwischen den einzelnen Substratgruppen unterschiedlich. Zieht man bei allen drei Substraten bei einer nFk von 150 mm eine gedachte senkrechte Linie, so erhält Sand relativ unabhängig vom N_{veg} die WHH-Stufe 1.5–2, lehmiger Sand ~ 2.5 und Lehm ~ 3.5 .

Im Gegensatz zu den daten-adaptiven GAMs wird der Funktionsverlauf in linearen Modellen (LMs) vorgeschrieben. Dies führt zu sehr glatten Kurvenverläufen wie Abbildung 5c zeigt. Die Substrat-Effekte auf den WHH sind dem GAM sehr ähnlich, die Kurvenform ist ebenfalls konkav und etwas weniger „eckig“. Die beste Lösung ergibt sich bei Kombination von Substrat, Produkt aus nFk und N_{veg} (Interaktion) und T_{veg} (vgl. Tab. 2).

Tabelle 2 fasst noch einmal die Ansätze und Klassifikationsergebnisse zusammen. Die ersten beiden Ansätze (Modalwert bzw. Mittelwert) stellen eine Entscheidung dar, bei dem der Wasserhaushalt als $<2>$ angenommen wird, bzw. dem Mittelwert der 1.349 Proben entspricht ($2,46$). Da immerhin 42 % wirklich mit Stufe $<2>$ (mäßig frisch) angesprochen wurden, liegt der Klassifikationsfehler MISCL bei $100 - 42 = 58$ (%). Der mittlere Quadratfehler mit > 1 (WHH-Einheiten) ist relativ hoch. Die Hinzunahme nur des Substrats als Prädiktor der WHH-Stufe führt zu einer Reduzierung des Fehlers auf 50 % (MISCL) bzw. $0,86$ (RMSE); bei numerischer Ansprache der WHH-Stufe erreicht der RMSE sogar $0,82$. Den geringsten Fehler weisen die Klassifikations- und Regressionsbäume auf, bei GAM und LM muss man mit höheren Klassifikationsfehlern rechnen, der RMSE liegt ähnlich hoch. Der

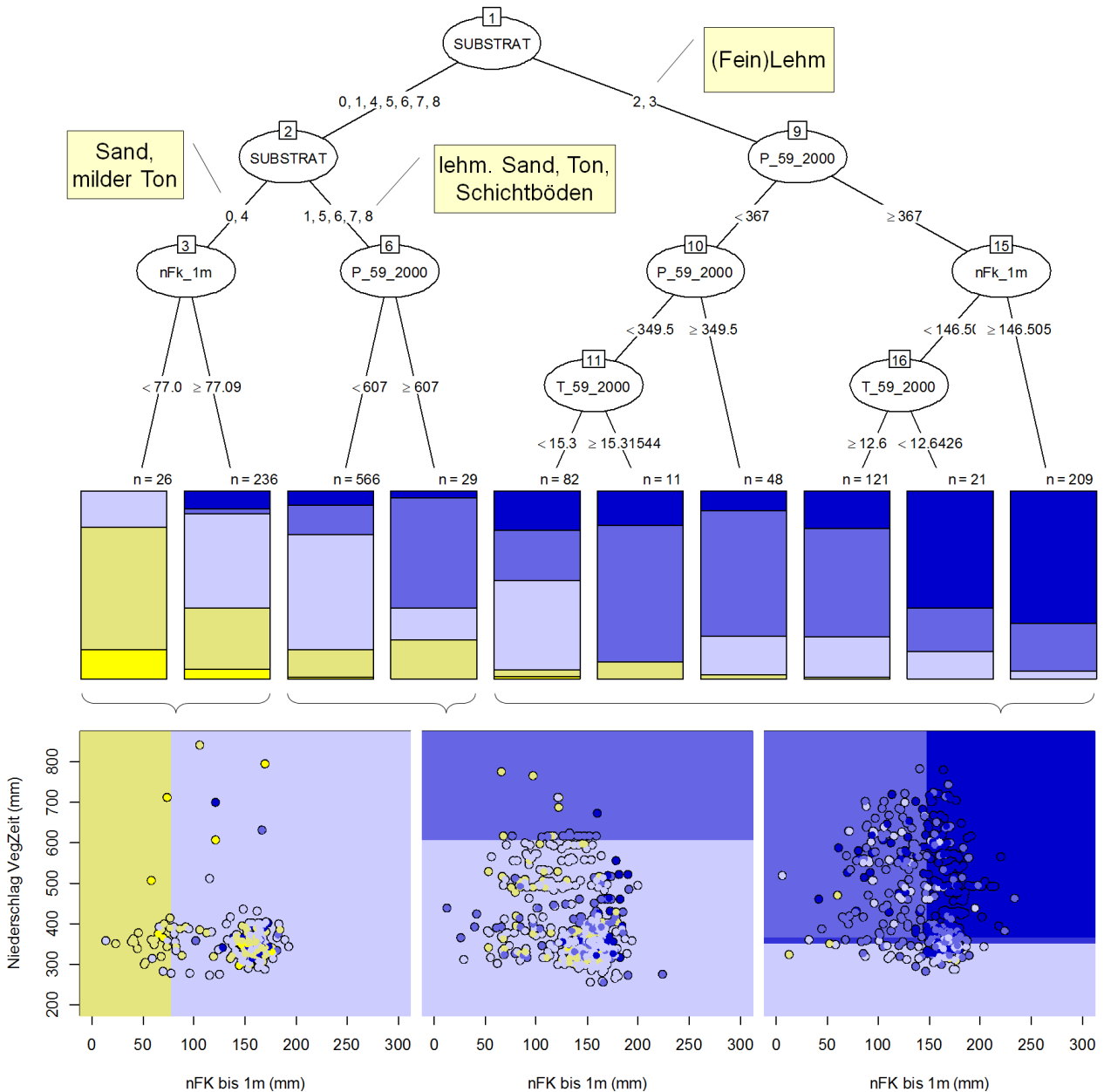


Abb. 4: Klassifikations-Baum der WHH-Stufen der Standortskartierung (oben) und nFk-Niederschlags-Diagramme der drei Substratgruppen (unten). Farben entsprechen den WHH-Stufen 0–4 (gelb bis dunkelblau) aus Abb. 2.

Fig. 4: Classification tree of the water balance classes of the site classification (top) and Available water capacity AWC-precipitation diagrams of the three substrate groups (bottom). Colors as in figure 2.

mittlere Fehler liegt mit Ausnahme des Modalwert-Ansatzes bei 0. Die den Modellen zugrundeliegende Annahme einer Normalverteilung der Residuen wurde sowohl mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test als auch visuell über qq-Plots (beobachtete vs. erwartete Quantile) geprüft (vgl. DORMANN UND KÜHN 2011).

H2: Vergleich der WHH-Ansprache mit Trockenstress-Größen

Um die physiologische Bedeutung der Wasserhaushaltsstufen der Standortskunde zu beurteilen, wurde in den Methoden der Vergleich mit zwei deterministischen Wasserhaushaltsgrößen vorgeschlagen: (1) einer simplen Schätzung des Anteils der Trockentage und (2) einer Schätzung der Transpirationdifferenz TDIFF (beide über den Zeitraum der

Vegetationszeit Mai–September).

Auch die Trockenstress-Größen lassen sich in einem nFk-Niederschlagsraum darstellen (Abb. 6). Die Isolinien des Trockentage-Modells (Abb. 6a) ähneln den Erklärungsmodellen der WHH-Stufen in Abbildung 5. Der Verlauf ist konkav und die Abstände gleichmäßig. Das Verhalten ist plausibel: bei niedriger nFk verringert sich die Gefahr von Trockentagen in erster Linie über Erhöhung der nFk, bei geringen Niederschlägen über eine Erhöhung der Niederschläge. Die Isolinien im TDiff-Modell (Abb. 6b) hingegen verlaufen viel flacher, da TDiff viel stärker niederschlagsgetrieben ist als die WHH-Stufen oder das Trockentage-Modell. Modelle mit Interaktion zwischen nFk und N_{veg} , die konkav oder konvex gebogene Isolinien bewirken, wurden aufgrund unplausiblen

Verhaltens verworfen. Wesentlich stärker als der Einfluss der nFk auf TDiff ist der Einfluss von T_{veg} , der im nFk-Niederschlags-Diagramm nicht dargestellt wird.

H3: Ableitung der nutzbaren Feldkapazität mithilfe der WHH-Stufen

Nachdem sich die gutachterliche Entscheidung zur Ansprache der WHH-Stufen relativ erfolgreich statistisch nachbilden lässt, eruieren wir das Potential, über die WHH-Stufen der Standortserkundung in Kombination mit der Substrat-Ansprache und physiographischen Daten die nFk zu schätzen (bis

1 m). Auch für diese Zielsetzung wurden CART-Verfahren sowie GAMs und LMs getestet. Dabei waren die CART-Verfahren mit hohem Erklärungswert nicht für die Prädiktion geeignet ($R2_{pred} < 0,15$). Stabilere Entscheidungsbäume als auch GAMs waren den LMs nur gering im Erklärungswert überlegen, erlaubten aber eine gute Exploitation des Gewichts und Verhaltens der Kovariablen zur Schätzung der nFk.

Aufgrund dieser Analysen wird wiederum ein lineares Modell (LM) favorisiert mit den Eingangsparametern: WHH-Stufe und Substrat aus Standortkartierungskarten, N_{veg} und

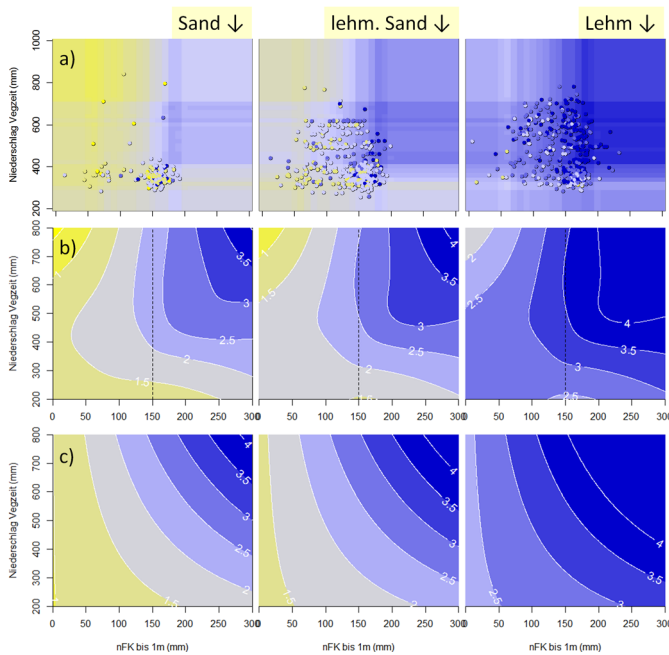


Abb. 5: nFk-Niederschlags-Diagramme der WHH-Stufen getrennt nach drei statistischen Verfahren (von oben nach unten) und drei Substraten (von links nach rechts). Statistische Verfahren von oben nach unten: a) Boosted regression tree BRT, b) generalized additive model GAM (gestrichelte Linie = 150 mm nFk-Referenz, s. Text), und c) linear model LM. Substrate von links nach rechts: Sand, lehmiger Sand, Lehm. Farben entsprechen den WHH-Stufen 0–4 (gelb bis dunkelblau) aus Abbildung 2.

Fig. 5: Available water capacity AWC-precipitation diagrams of the water balance classes – displayed for three substrates (from left to right: sand – loamy sand – loam), and three statistical models (top to bottom): a) Boosted regression tree BRT, b) generalized additive model GAM (dashed line = 150 mm AWC), c) linear model LM. Colors as in figure 2.

Tab. 2: Zusammenfassung unterschiedlicher statistischer Ansätze zur Bestimmung der Wasserhaushaltsstufen der Standortskartierung und Klassifikationsergebnisse. WHH = Wasserhaushaltsstufe, N_{veg} = Niederschlag in der Vegetationszeit (Mai–September), T_{veg} = Temperatur in der Vegetationszeit, nFk = nutzbare Feldkapazität, ME = mittlerer Fehler, MISCL = misclassification error, RMSE = root mean square error (Quadratwurzelfehler), Subskript “pred” als mittlerer misclassification bzw. RMS-Error des Validierungsdatensatzes bei 10-fach wiederholter zufälliger Teilung des Datensatzes in Kalibrier- und Validierdatensatz (9:1).

Tab. 2: Overview over different statistical approaches to model the water balance class of the site classification. WHH = water balance class, N_{veg} = precipitation in the vegetation period (May–September), T_{veg} = temperature in the vegetation period, nFk = AWC = available water capacity, ME = mean error, MISCL = misclassification error, RMSE = root mean square error, Subskript “pred” as mean misclassification, resp. rms error of the validation data set after random data splitting into calibration and validation data (9:1, 10 repetitions). [Modalwert = mode, Mittelwert = mean].

Ansatz (Abbildung)	Funktion	ME	MISCL	MISCL _{pred}	RMSE	RMSE _{pred}	R Funktion (Paket)
Modalwert (2)	WHH = 2	0,47	58 %	58 %	1,12	1,12	-
Mittelwert	WHH = mean(WHH)	2e-17	58 %	58 %	1,02	1,00	-
Substrate only (2)	WHH ~ Substrat	2e-17	50 %	50 %	0,82	0,79	-
Classification tree (4)	WHH ~ Substrat+N _{veg} +nFk+T _{veg}	2e-16	40 %	40 %	0,82	0,79	rpart (rpart)
Regression tree		5e-17	42 %	42 %	0,76	0,77	rpart (rpart)
Boosted regression tree (5a)		-4e-4	43 %	44 %	0,71	0,72	brt (gbm)
GAM (5b)	WHH ~ Substrat+N _{veg} *nFk+T _{veg}	4e-14	46 %	46 %	0,76	0,75	gam (mgcv)
LM (5c)		-2e-14	46 %	46 %	0,78	0,75	lm ()

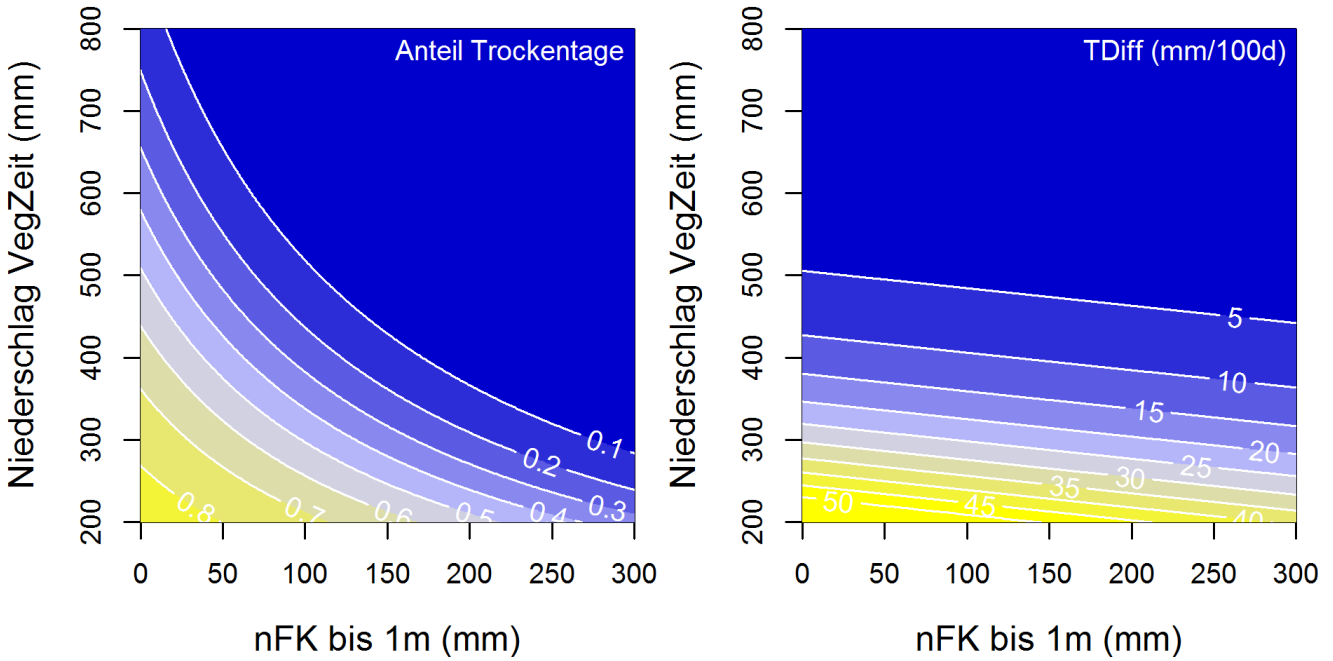


Abb. 6: (a) Anteil Trockentage und (b) TDiff als deterministische WHH-Größen im nFk-Niederschlags-Raum. Trockentage definiert als Anteil der Tage, an denen das verfügbare Bodenwasser < 40 % nFk (Bezugszeitraum forstl. Vegetationsperiode Mai–September). TDiff als Differenz der aktuellen und potentiellen Transpiration geschlossener Waldbestände über eine dynamische Vegetationsperiode normiert auf 100 Tage. Lineare Modelle: (a) $\text{logit}(\text{Trockentage}/153) \sim nFk + N_{veg} + nFk * N_{veg}$ ($R^2 = 0.96$); (b) $\text{logit}(\text{TDiff}/250) \sim nFk + N_{veg} + T_{veg} + N_{veg} * T_{veg}$ ($R^2 = 0.66$). Durch die logit-Transformation verhalten sich die WHH-Größen asymptotisch gegen 0.

Fig. 6: (a) Dry day fraction (1 = 100 %) and (b) TDiff as two deterministic water balance units, plotted as isolines in the AWC-precipitation diagram. Dry days defined as the fraction of days where the available soil water drops < 40 % of the AWC (time frame: vegetation period May–September). TDiff defined as the difference between actual and potential transpiration of closed forest stands over a dynamic vegetation period (standardized to 100 days). Linear models: (a) $\text{logit}(\text{Dry Days}/153) \sim AWC + P_{veg} + AWC * P_{veg}$ ($R^2 = 0.96$); (b) $\text{logit}(\text{TDiff}/250) \sim AWC + P_{veg} + T_{veg} + P_{veg} * T_{veg}$ ($R^2 = 0.66$).

Tab. 3: Modell zur Ableitung der nFk aus Standortskartierung und physiographischen Daten. Lineares Modell (LM) mit nFk = nutzbare Feldkapazität bis 1 m (mm), WHH = Wasserhaushaltsstufe (numerisch verwendet), N_{veg} = Niederschlag (in der Vegetationszeit Mai–September), $R^2(\text{adj}) = 0,30$; RMSE = 28,6 mm, Kolmogorov-Smirnov Test auf Normalverteilung der Residuen keine signifikante Abweichung. Signifikanz: *** < 0,001; ** 0,01–0,01; * 0,01–0,05.

Tab. 3: Model to estimate the available water capacity AWC from site classification and physiographic data. Linear model (LM) with nFk = AWC = available water capacity down to 1 m (mm), WHH = water balance class (input numerical), N_{veg} = precipitation (in the vegetation period May–September), $R^2(\text{adj}) = 0,30$; RMSE = 28,6 mm; Kolmogorov-Smirnov test on normal distribution of the residuals no significant deviation. Significance: *** < 0,001; ** 0,001–0,01; * 0,01–0,05.

nFk (1 m) =	Interzept +	Substrat +	a0*WHH +	a1*N _{veg} +	a2*Skelett
Schätzwert +/- Std. Fehler (Signifikanz)	154,7 +/- 4,4	0: 0 +/- 0 1: -7,5 +/- 2,9 2: -10,7 +/- 3,8 3: -2,1 +/- 3,4 4: -35,0 +/- 5,0 5: -13,2 +/- 9,4 6: -10,6 +/- 8,0 7: -15,6 +/- 4,7 8: -11,6 +/- 3,7	8,525 +/- 1,08 (***)	-0,022 +/- 0,01 (*)	-0,708 +/- 0,05 (***)
Parameter-Spanne	-	9 Faktoren	0–4	255–840	0–100
nFk-Spanne (mm)	-	35	34,1	13	71

Skelettanteil der jeweiligen Bodeneinheit aus dem Bayerischen Standortinformationssystem. Die Ergebnisse in Tabelle 3 zeigen, dass insbesondere der Skelettgehalt der Bodeneinheiten des Bayerischen Standortinformationssystems wichtig für die Schätzung der nFk ist (s. auch Gleichung 2). Der Einfluss der WHH-Stufe liegt bei ca. 8,5 mm pro Stufe; damit decken die WHH-Stufen 0–4 eine nFk-Spanne von 34 mm ab. Der Effekt der WHH-Stufe wird geringfügig über den Niederschlag korrigiert: bei hohen Niederschlägen bekommt die nFk einen Abschlag. Vom Substrat her könnte man erwarten, dass v. a. Lehme und Schluffe (Klassen 2 und 3) herabgesetzt werden müssen, da hier der WHH bei gleichen nFk und Niederschlags-Bedingungen ca. 1 Stufe höher angesprochen wird (vgl. Ergebnisse H1). Allerdings wird dieser Zusammenhang oft von der direkten Relation zwischen Substrat und nFk überlagert: so handelt es sich bei den Schluffen (Klasse 3) oftmals um extrem wasserspeichernde Lössböden (Tab. 3: -2 mm), während die milden Tone (Klasse 4) oft bei den flachgründigen Kalkverwitterungslehmen vergeben werden (Tab. 3: -35 mm). Wieder spielen Neigung und Exposition im Modell keine Rolle; auch die Mächtigkeit ist in diesem Datensatz von untergeordneter Bedeutung, da nur wenige Profile weniger als 1 m tief sind. Bei Anwendung des Modells auf geringmächtige Böden darf die Mächtigkeit allerdings nicht fehlen.

Da dieser Ansatz auch für die Vorhersage der nFk interessant ist, wird eine mögliche Überanpassung durch iteratives zufälliges Teilen des Datensatzes in Kalibrier- und Validierungsdaten geprüft (10 Iterationen, Teilung 9:1). Im Vergleich zum Kalibrierdatensatz sinkt das Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,308$ auf $R^2_{\text{pred}} = 0,293$ und steigt der mittlere Quadratwurzelfehler von $RMSE = 28,6$ mm auf $RMSE_{\text{pred}} = 28,8$ mm.

4 Diskussion

Die Wasserhaushaltsstufen (WHH-Stufen) der traditionellen forstlichen Standortkartierung sind ein wesentliches Kriterium für die standortgerechte Baumartenwahl in der forstwirtschaftlichen Praxis. Ziel dieser Studie ist es, die feldbodenkundliche Ansprache der WHH-Stufe unter Verwendung physiographischer Variablen, wie sie im digitalen Bayerischen Standortinformationssystem BaSIS genutzt werden, statistisch nachzubilden. Dieser Brückenschlag zwischen den Systemen bringt einen Erkenntnisgewinn auf beiden Seiten und ist Grundlage für die Kommunikation zwischen Nutzern des einen oder anderen Systems.

Die Beantwortung von **Hypothese 1**, ob die gutachterliche Entscheidung der WHH-Stufe nachgebildet werden kann, zeigt, dass Klassifikations- und Regressionsbäume (CART) in bis zu 60 % aller Fälle die richtige WHH-Stufe bestimmen. Die herangezogenen Einteilungskriterien sind nachvollziehbar, allerdings sind die Grenzen dieser Verfahren sehr datenangepasst, so dass bei unabhängigen Datensätzen mit höheren Abweichungen zu rechnen ist (HASTIE et al. 2009). Eine starke Datenanpassung lässt auch das generalisierte additive Modell erkennen; z. B. werden im niedrigen nFk-Bereich mit höherem Niederschlag in der Vegetationsperiode (N_{veg}) zunehmend trockenere WHH-Stufen vergeben, was nicht plausibel ist. Solche Defizite können bei linearen Modellen über die Vorgabe des Funktionstyps vermieden werden, so dass der lineare Modellansatz trotz eines höheren Klassifikationsfehlers die plausibelsten Ergebnisse liefert (vgl. FALK & MELLERT 2011).

Alle Modelle zeigen einheitlich, dass der Wasserhaushalt im niedrigen nFk-Bereich relativ unabhängig von N_{veg} mit hoher Wahrscheinlichkeit als *trocken* angesprochen wird, während im hohen nFk-Bereich zunehmend N_{veg} als Kriterium hinzugezogen wird. Die Stufe *sehr frisch* wird nur bei gleichzeitig hohem N_{veg} und hoher nFk vergeben. Damit folgt die Entscheidung des Kartierers nicht rein dem „nFk“-Kriterium, wie es die Standorterkundung für die Vergabe des lokalen Wasserhaushalts fordert (vgl. 2.1). Er berücksichtigt offensichtlich auch schon den Niederschlag, der in der Standorterkundung eigentlich erst bei regionalen Vergleichen einfließen soll (vgl. 2.1). Während für Niederschlagsgradienten, wie sie insbesondere durch die Geländehöhe und -topographie bedingt werden, verlässliche Informationen vorliegen, muss der Kartierer die nFk indirekt über Gründigkeit, Skelettanteile und Substrat schätzen. So werden Sande und Tone z. B. allgemein als trockener eingestuft als Lehme und Schluffe. Dies ist zwar tendenziell richtig, allerdings wird der Einfluss des Substrats auf die nFk überbewertet, wie die unterschiedliche Belegung der WHH-Stufen in den nFk-Niederschlags-Diagrammen zeigt (z. B. Abb. 5).

Hypothese 2 untersucht die Aussagekraft der WHH-Stufe bezüglich der standörtlichen Trockenstress-Gefährdung. Die zwei eingeführten Vergleichsgrößen basieren beide auf Wasserhaushaltsmodellen. Das Trockentage-Modell ist angelehnt an die in der STOK veranschlagten 3 mm Evapotranspiration. Es ist sehr einfach, aber unterscheidet nicht nach unterschiedlicher Länge von Vegetationszeiten, Strahlungs- oder Temperatureffekten. Das Trockentage-Modell lässt sich sehr gut in den nFk-Niederschlags-Raum übersetzen und ermöglicht die Zuordnung des durchschnittlichen Anteils von Trockentagen während der Vegetationsperiode über nFk und N_{veg} (Abb. 6a). Geringe nFk oder N_{veg} erhöhen natürlich den Anteil der Trockenstress-Tage, allerdings kann die eine Größe die andere stärker kompensieren als die Modelle für die WHH-Stufen annehmen (Abb. 5). Im Vergleich zu den Trockentagen und dem WHH-Modell stellt sich die auf dem komplexen WHH-Modell LWF-Brook90 basierende Transpirationsdifferenz TDiff als wesentlich stärker niederschlagsgetrieben dar (Abb. 6b). Dies führt bei der Übersetzung der Transpirationsdifferenz in WHH-Stufen wie es im Bayerischen Standortinformationssystem BaSIS verwirklicht ist, zwangsläufig zu Differenzen mit der traditionellen Standortkartierung. Im niederschlagsreichen Alpenvorland (WG 14) z. B. kommen in BaSIS keine trockenen Standorte mit WHH-Stufe kleiner als *mäßig frisch* vor; auf der niederschlagsarmen Fränkischen Platte (WG 4) kommen dagegen keine sehr frischen Standorte vor, auch auf schluffreichen und tiefgründigen Böden nicht. Verstärkt wird der Effekt durch den großen Einfluss von T_{veg} auf TDiff, der im WHH-Modell nur kleines Gewicht bekommt.

Nachdem sich die gutachterliche Entscheidung zur Ansprache der WHH-Stufen relativ erfolgreich statistisch nachbilden lässt (Hypothese 1), wurde in **Hypothese 3** versucht, die nFk aus den WHH-Stufen, dem Substrat und physiographischen Kovariablen abzuleiten. Dieser Ansatz ist sehr interessant, da die hohe Auflösung der Standortskarten genutzt werden könnte, um den Wasserhaushalt innerhalb der gröber aufgelösten (ÜBK-) Bodeneinheiten im Bayerischen Standortinformationssystem zu differenzieren. Bei dem hier verwendeten bayernweiten Modell wurde ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 \sim 30$ % erreicht. Dieser erste Ansatz zeigt, dass der Einbezug der Standortkartierung in physiographisch basierte Standortinformationssysteme durchaus vielversprechend ist. Allerdings ist es für eine

Praxis-Umsetzung empfehlenswert, stärker nach Bodeneinheiten oder aggregierten Bodeneinheiten zu differenzieren und Expertenwissen einzubeziehen. So ließe sich berücksichtigen, wie stark Unterschiede in der WHH-Ansprache in einem Gebiet auf unterschiedliche Skelettanteile oder Mächtigkeit oder lokalklimatische Effekte zurückzuführen sind.

Schlussfolgerung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die traditionelle Standortserkundung mit dem erklärten Ziel (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003, S. 282): „Um bei der Kartierung regionalen Besonderheiten bestmöglich nachgehen zu können, wurde für die Ausscheidung und Benennung der Standortseinheiten [...] auf allgemein verbindliche Weisungen verzichtet.“ eine hohe Flexibilität der Aussage und Akzeptanz in der forstwirtschaftlichen Praxis erreicht hat. Um den Informationsgehalt und die hohe räumliche Auflösung in physiographischen Standortinformationssystemen nutzen zu können, ist der erste Schritt das Nachvollziehen des gutachterlichen Entscheidungsprozesses. Gelingt dieser erste „Brückenschlag“, so ist zu prüfen, ob sich die räumlich gröber aufgelösten bodenkundlichen Kennwerte physiographischer Standortinformationssysteme mittels der traditionellen Standortserkundung weiter differenzieren lassen. Unsicherheiten und mögliche lokale standortkundliche Besonderheiten müssen dabei berücksichtigt und dokumentiert werden.

Mit Blick in Richtung Zukunft wird oftmals gefragt, wie geeignet traditionelle Standortskarten für die Baumarteneignung im Klimawandel sind und inwiefern die WHH-Stufen zum trockenen Ende hin korrigiert werden müssen. Entsprechend stellen SCHULZE & ASCHE (2008) oder GAUER et al. (2011) Perspektiven vor, wie z. B. der erhöhte Transpirationsbedarf bei Verlängerung der Vegetationszeit berücksichtigt werden kann. Grundvoraussetzung ist ebenso wie in dieser Studie eine „Herleitung der WHH-Stufen auf numerisch-quantitativen Wege“ (SCHULZE & ASCHE 2008) sowie ihre Verschneidung mit physiographischen Daten. Auch PETZOLD et al. (2016) zeigen, wie die Lokalbodenformen der ostdeutschen Standortserkundungsanweisung (SCHULZE et al. 2009) durch Verschneidung mit Bodenprofilen quantitativ mit Bodenkennwerten wie der nFk hinterlegt werden können.

Für das zweistufige Verfahren der bayerischen Standortserkundung ist eine Anpassung der Wasserhaushaltsansprache an den Klimawandel nicht zielführend. Der 3-Ziffern-Code spricht in erster Linie Bodeneigenschaften an, die sich im Vergleich zum Klimawandel nur träge verändern. Bei der WHH-Stufe haben Substrat und nFk zusammengenommen eine wesentlich höhere Erklärungskraft als Niederschlag und Temperatur in der Vegetationsperiode (N_{veg} und T_{veg}). Gerade T_{veg} , die am wenigsten in die Wasserhaushalts-Ansprache der Standortskartierung einfließt (Anm.: im Gegensatz dazu reagiert TDiff als Grundlage der Wasserhaushaltsansprache in BaSIS sehr stark auf T_{veg}), ist der Faktor, der sich am meisten im Klimawandel ändert, und auf den die Baumarten stark reagieren. Was also korrigiert werden muss, ist weniger die WHH-Stufe als vielmehr die Übersetzung der Standortansprache in Baumarteneignung. Schon heute ist diese Übersetzung durch das 2-stufige Verfahren regional angepasst (vgl. Einleitung), und Förster kälterer Wuchsgebiete können bedingt von Anbauerfahrungen aus wärmeren Wuchsgebieten profitieren. Der warme Nordwesten Bayerns braucht allerdings Informationen außerhalb Bayerns, z. B.

aus der Oberrhein-Ebene oder dem Rhone-Tal. Dazu ist das Konzept der sog. Klima-Analog-Räume sehr geeignet (KÖLLING et al. 2016). Klima- und Verbreitungsdaten und -karten mit kontinentalem Maßstab können über moderne Verbreitungsmodelle der Baumarten (engl.: species distribution models, kurz SDM) Aufschluss über die Baumarteneignung im Klimawandel geben (FALK & MELLERT 2011, FALK & HEMPELMANN 2013). Ist der regionale klimatische Rahmen für die Baumartenwahl berücksichtigt, bietet die Standortskarte die Möglichkeit, nach bodenkundlichen Kriterien weiter lokal zu differenzieren. Im Bayerischen Standortinformationssystem BaSIS werden daher klimatische und bodenbedingte Einschränkungen getrennt gekennzeichnet.

Literatur

- AD-HOC AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Auflage (KA5). Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart: 438 S.
- AK STANDORTSKARTIERUNG (2003): Forstliche Standortsaufnahme. IHW Verlag, Eching b. München: 352 S.
- AHRENDTS, B., PENNE, C., PANFEROV, O. (2010): Impact of target diameter harvesting on spatial and temporal pattern of drought risk in forest ecosystems under climate change conditions. *Open Geography Journal* **3**: 91-102, doi: 10.2174/1874923201003010091.
- BRÉDA, N., HUC, R., GRANIER, A., DREYER, E. (2006): Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science* **63** (6): 625-644. <http://dx.doi.org/10.1051/forest:2006042>
- BREIMAN, L., FRIEDMAN, J.H., OLSHEN, R.A., STONE, C.J. (1984): Classification and Regression Trees. Chapman & Hall, N.Y.
- CABELGUENNE, M., DEBAEKE, P. (1998): Experimental determination and modeling of the soil water extraction capacity of crops of maize, sunflower, soya, bean, sorghum and wheat. *Plant and Soil* **202**: 175-192, doi: 10.1023/A:1004376728978.
- DORMANN, C.F., KÜHN, I. (2011): Angewandte Statistik für die biologischen Wissenschaften. Helmholtz Zentrum für Umweltforschung, Leipzig: 245 S.
- DVWK – DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E.V. (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK-Merkblatt 238/1996, Bonn.
- ELITH, J., LEATHWICK, J.R., HASTIE, T. (2008): A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology* **77**: 802–813, doi: 10.1111/j.1365-2656.2008.01390.x.
- EWALD, J. (1999): Die standortökologisch fundierte Pflanzensoziologie als Erkenntnisquelle für den naturnahen Waldbau – das Beispiel der Standortgliederung für das bayerische Hochgebirge. *Freiburger Forstliche Forschung Berichte* **16**: S. 27-38.
- EWALD, J., BINNER, S. (2005): Werkzeuge zur Bestimmung der Waldtypen im bayerischen Hochgebirge. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **5**: 25-77.
- FALK, W., MELLERT, K.H. (2011): Species distribution models as a tool for forest management planning under climate change: risk evaluation of *Abies alba* in Bavaria. *Journal of Vegetation Science*, **22** (4): 621-634, doi: 10.1111/j.1654-1103.2011.01294.x.
- FALK, W., HEMPELMANN, N. (2013): Species Favourability Shift in Europe due to Climate Change: A Case Study for *Fagus sylvatica* L. and *Picea abies* (L.) Karst. Based on an Ensemble of Climate Models. *Journal of Climatology*. Article ID 787250, 18 pages, doi: 10.1155/2013/787250.

- FALK, W., MELLERT, K.H., BACHMANN-GIGL, U., KÖLLING, C. (2013): Bäume für die Zukunft: Baumartenwahl auf wissenschaftlicher Grundlage. *LWF-aktuell* **94**: 8-11.
- GAUER, J., ALDINGER, E. (2005): Waldökologische Naturräume Deutschlands – Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke – mit Karte 1:1.000.000, Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung: 324 S.
- GAUER, J., FEGER, K.H., SCHWÄRZEL, K. (2011): Erfassung und Bewertung des Wasserhaushalts von Waldstandorten in der forstlichen Standortkartierung: Gegenwärtiger Stand und künftige Anforderungen. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 7-16.
- GRANIER, A., BRÉDA, N., BIRON, P., VILLETTE, S. (1999): A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling* **116** (2): 269-283, doi:10.1016/S0304-3800(98)00205-1.
- GRANIER, A., REICHSTEIN, M., BRÉDA, N., JANSSENS, I.A., FALGE, E., CIAIS, P. ET AL. (2007): Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and forest meteorology* **143** (1): 123-145, doi:10.1016/j.agrformet.2006.12.004.
- HÄRING, T., DIETZ, E., OSENSTETTER, S., KOSCHITZKI, T., SCHRÖDER, B. (2012): Spatial disaggregation of complex soil map units: A decision based approach in Bavarian forest soils. *Geoderma* **185-186**: 37-47, doi:10.1016/j.geoderma.2012.04.001.
- HAMMEL, K., KENNEL, M. (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. – Forstliche Forschungsberichte München **185**: 146 S.
- HASTIE, T., TIBSHIRANI, R., FRIEDMAN, J. (2009): *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer, N.Y.
- HERA, U., RÖTZER, T., ZIMMERMANN, L., SCHULTZ, C., MAIER, H., WEBER, H., KÖLLING, C. (2012): Klima en détail. Neue hochaufgelöste Klimakarten bilden wichtige Basis zur klimatischen Regionalisierung Bayerns. *LWF aktuell* **86**: 34-37.
- KIRKHAM, M.B. (2014): *Principles of soil and plant water relations*. Elsevier, Amsterdam: 580 S.
- KÖLLING, C., METTE, T., KNOKE, T. (2016): Waldertrag und Anbaurisiko in einer unsicheren Klimazukunft. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **167** (1): 29-38, doi: http://dx.doi.org/10.3188/szf.2016.0029.
- KRAUSS, G.A. (1936): *Aufgaben der Standortskunde*. Jahresbericht des Deutschen Forstvereins, Berlin.
- LWF–BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (2012): *Anpassung der bestehenden Standortkartierung „Maps for the future“ KLIP4 – Karten für die Zukunft*. Abschlussbericht Projekt KLIP4, LWF: 160 S.
- LWF–BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (2013): *Waldstandorte erfassen, beschreiben, bewerten*. *LWF aktuell* **94**: 47 S.
- METTE, T., KÖLLING, C. (2015): Wald, Wachstum, Umwelt. Das Waldklimafonds-Projekt Waldproduktivität – Kohlenstoffspeicherung – Klimawandel („WP-KS-KW“). *LWF aktuell* **107**: 46-49.
- OSENSTETTER, S., KÖLLING, C., HÄRING, T. (2012): *Homogenisierung der Wasserhaushaltsangaben in den Standortskarten des Staatswalds*. LWF Bericht, unpubl.
- PETZOLD, R., DANIGEL, J., BENNING, R., MAYER, S., BURSE, K., KARAS, F., ANDREAE, H., GEMBALLA, R. (2016): *Aus Alt mach Neu – Altdaten der Standortkartierung für die räumlich differenzierte Ableitung der Bodenwasserspeicherung*. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **16**:17-25.
- PUHLMANN, H., VON WILPERT, K. (2012): Pedotransfer functions for water retention and unsaturated hydraulic conductivity of forest soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **175** (2): 221-235, doi: 10.1002/jpln.201100139.
- R CORE TEAM (2014): *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <http://www.R-project.org>.
- RATCLIFFE, L.F., RITCHIE, J.T., CASSEL, D.K. (1983): Field measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties. *Soil Science Society of America Journal* **47**: 770-775, doi:10.2136/sssaj1983.03615995004700040032x.
- RENGER, M., BOHNE, K., FACKLAM, M., HARRACH, T., RIEK, W., SCHÄFER, W., WESSOLEK, G., ZACHARIAS, S. (2008): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. In: WESSOLEK, G., KAUPENJOHANN, M., RENGGER, M. (eds.): *Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis*. Schriftenreihe Bodenökologie und Bodengenese **40**: 4-51.
- RUSS, A., RIEK, W. (2011): Pedotransferfunktionen zur Ableitung der nutzbaren Feldkapazität – Validierung für Waldböden des nordostdeutschen Tieflands. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **11**: 85-91.
- SCHULTZE, B., KÖLLING, C., DITTMAR, C., RÖTZER, T., ELLING, W. (2005): Konzept für ein quantitatives Verfahren zur Kennzeichnung des Wasserhaushalts von Waldböden in Bayern: Modellierung – Regression – Regionalisierung. *Forstarchiv* **76**: 155-163.
- SCHULZ, R., ASCHE, N. (2008): Klima, Standort, Wald. Regionales Wasserhaushaltsmodell auf Bundesbene übertragbar? *AFZ/Der Wald* **1**: 20-24.
- SCHULZE, G. ET AL. (2009): *Anleitung für die forstliche Standortserkundung im nordostdeutschen Tiefland – SEA 95*. Hrsg. Landesforst Mecklenburg Vorpommern AöR. Malchin.
- SPEKAT, A., ENKE, W., KREIENKAMP, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit Echam 5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Forschungsbericht, Umweltbundesamt, FKZ 204 41 138: 140 S.
- TAEGER, S., KÖLLING, C. (2016): *Standortsinformationssystem BaSIS*. *AfZ-DerWald* **4**: 10-13. TEEPE, R., DILLING, H., BEESE, F. (2003): Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **166**: 111-119, doi: 10.1002/jpln.200390001.
- VON LÖWIS OF MENAR, O., CANALEJO, J., HORN, O., WEICHTINGER, P. (2005): *20 Jahre Verein für forstliche Standortserkundung im Privat- und Körperschaftswald in Bayern e.V.* *AFZ-Der Wald* **12**: 630-632.
- WALENTOWSKI, H., GULDER, H.J., KÖLLING, C., EWALD, J., TÜRK, W. (2001): *Die regionale natürliche Waldzusammensetzung Bayerns*. *LWF Wissen* **32**: 96 S. + Anhang.
- WALENTOWSKI, H., EWALD, J., FISCHER, A., KÖLLING, C., TÜRK, W. (2006): *Handbuch der natürlichen Waldgesellschaften Bayerns*. Geobotanica, Freising.

submitted: 30.09.2015

reviewed: 22.01.2016

accepted: 18.05.2016

Autorenanschrift:

Dr. Tobias Mette, Sebastian Osenstetter, Susanne Brandl,
Wolfgang Falk, Dr. Christian Kölling
Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
(LWF)
Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1
80354 Freising
E-Mail: tobias.mette@lwf.bayern.de
E-Mail: susanne.brandl@lwf.bayern.de
E-Mail: wolfgang.falk@lwf.bayern.de

Aktuelle Adressen:

Sebastian Osenstetter
ing Traunreut GmbH
Georg-Simon-Ohm-Straße 10
83301 Traunreut
E-Mail: osenstetter@ing-ingenieure.de

Dr. Christian Kölling
Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Roth
Johann-Strauß-Str. 1
91154 Roth
E-Mail: Christian.Koelling@aelf-rh.bayern.de