

Konzept für ein quantitatives Verfahren zur Kennzeichnung des Lufthaushaltes von Waldböden in Bayern

A concept for quantitative characterization of the air balance in Bavarian forest soils

Wolfgang Falk, Sebastian Osenstetter & Elke Dietz

Abstract

Site-specific descriptions of soil water balance and soil air balance are important for tree species selection in forestry. We present a concept for describing the soil air balance for Bavaria. It is an enhancement of an empirical multiple linear regression model that explains soil oxygen deficiency in terms of topographic, climate and soil parameters. We modelled numerous combinations of site conditions with the hydrologic model LWF-Brook90 to determine an estimator for soil oxygen deficiency. This estimator reflects water logging that persists for a certain length of time. In a second step we will develop a new regression model and combine this information with topographical information about additional water fluxes in a GIS. We aim to combine both steps in order to describe the air balance of forest soils for the entirety of Bavaria.

Keywords: waterlogged soil, impeded drainage, LWF-Brook90, hydrologic model, GIS, topographic parameter

Zusammenfassung

Da neben der Beschreibung des Wasserhaushaltes auch die Kenntnis über Luftmangel für die standortgerechte Baumartenwahl wichtig ist, wird ein Konzept für die bayernweite Beschreibung des Lufthaushaltes vorgestellt. Es ist eine Weiterentwicklung eines empirischen Regressionsmodells, das die Staunässe mittels Geländeparametern, Klima und Bodendaten abschätzt. Dazu wurden mit dem Wasserhaushaltsprogramm LWF-Brook90 zahlreiche Kombinationen von Standortsfaktoren simuliert und eine Schätzgröße für Luftmangel ausgegeben. Diese Größe beschreibt die Einschränkung des Lufthaushaltes über einen längeren Zeitraum. In einem weiteren Schritt wird dieser deterministische Luftmangelparameter über ein neues Regressionsmodell abgeleitet und mit zusätzlichen topographischen Informationen über Zu- und Abflüsse in einem GIS kombiniert. Ziel ist es, für ganz Bayern den Lufthaushalt von Waldböden zu beschreiben.

Schlüsselworte: Staunässe, LWF-Brook90, Wasserhaushaltsmodell, GIS, Geländeparameter

1 Einleitung

Der Wasser- und Lufthaushalt von Waldböden wird seit langem als einer der wichtigsten Standortsfaktoren angesehen. Die Wasserhaushaltsstufen bestimmen ganz wesentlich waldbauliche Entscheidungen wie die Baumartenwahl. Dabei gibt es in den Bundesländern unterschiedliche Verfahren. Ihnen gemeinsam ist, dass sie die verschiedenen Komponenten des Wasserhaushaltes berechnen oder schätzen und logisch miteinander verknüpfen (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Neben

dem notwendigen Wasserangebot gibt es auch Standorte, an denen es durch ein zeitweise zu hohes Wasserangebot zu Sauerstoffmangel kommt. Diese Nassperioden werden vom AK STANDORTSKARTIERUNG (2003) als Phasen definiert, in denen über mehrere Tage am Stück nahezu vollständige Wassersättigung herrscht. Das kann in der Vegetationsperiode zur Einschränkung des Lufthaushaltes, folglich zur Störung des Stoffwechsels bis hin zum Absterben von Feinwurzeln und damit zu Wachstumshemmung führen (LYR et al. 1992, S. 302).

Für eine erfolgreiche Baumartenempfehlung ist daher auch die Bewertung des Lufthaushaltes, also der Staunässe, entscheidend. Um die Bewertung des Wasser- und Lufthaushaltes objektiv und im Zusammenhang mit dem prognostizierten Klimawandel flexibel zu gestalten, sind deterministische Wasserhaushaltsmodellierungen und Analysen mit Geoinformationssystemen sowie Regionalisierungen unumgänglich (SCHWÄRZEL et al. 2009). Die hohe räumliche und zeitliche Variabilität der Bodenfeuchte bedingt allerdings erhebliche Skalierungsschwierigkeiten bei der Modellierung (WESTERN et al. 2002). In Anlehnung an die Beschreibung des pflanzenverfügbaren Wassers in Bayern (SCHULTZE et al. 2005, FALK et al. 2008, FALK & DIETZ 2009) wird ein Konzept vorgeschlagen, das den Lufthaushalt durch die Kombination aus physikalischen Wasserhaushaltsmodellen und Methoden der Regionalisierung und Reliefanalyse auf der gesamten Privat- und Körperschaftswaldfläche Bayerns hoch aufgelöst berechnet. Damit wären Prognosen in die Zukunft mit sich ändernden Niederschlagsverteilungen möglich.

2 Methoden

2.1 Konzept der Beschreibung des Lufthaushaltes

Grundlegende Probleme zur Beschreibung staunasser Standorte bestehen darin, dass die optischen Staunässemerkmale substratspezifisch überprägt oder reliktsch sein können, was im Gelände zu Fehlinterpretationen führen kann. Des Weiteren existieren in der Literatur für größere räumliche Skalen kaum Indizes, welche den Grad der Pseudovergleyung sowie die daraus resultierenden Auswirkungen auf den Baum hinreichend quantifizieren, was vor allem den komplexen Zusammenhängen zwischen Luftmangel, Stoffwechsel, Wachstum und einer Rückkopplung der Durchwurzelung auf den Staueffekt selbst geschuldet ist (LANGE et al. 2009). Aus diesem Grund ist es nötig, ein rechengestütztes Verfahren zur Entwicklung einer solchen räumlichen Schätzgröße herzuleiten. Das hier erstmals erläuterte Konzept zur Beschreibung des Lufthaushaltes für bayerische Waldböden beruht auf mehreren Schritten. Der erste Schritt ist die deterministische Modellierung von Wasserhaushaltsparametern und die Regionalisierung von

Schätzgrößen zum Lufthaushalt durch Boden- und Klima-prädiktoren. Diese Schätzgrößen stufen die Standorte relativ zueinander bezüglich der Einschränkung des Lufthaushaltes ein. Das verwendete Wasserhaushaltsmodell LWF-Brook90 (HAMMEL & KENNEL 2001) berücksichtigt allerdings nicht die Zu- und Abflüsse, so dass diese Abstufung nur für ebene und schwach geneigte Standorte gilt, an denen hangparallele Flüsse eine untergeordnete Rolle spielen. Da die Verwendung eines Gebietswasserhaushaltsmodells auf einer Fläche von über 7 Mio. ha nicht zielführend ist, beruht der nächste Schritt auf der gesonderten Analyse von Reliefeigenschaften, die eine wesentliche Komponente des Wasserhaushaltes sind. Sie prägen beispielsweise die Zu- und Abflüsse sowie Bodeneigenschaften. Beide Methoden sollen daher im Anschluss über eine Kombination aus numerischer Simulation und GIS-Anwendung mittels prozentualen Zu- und Abschlägen verknüpft werden.

In einer Pilotphase wurde ein erster Regressionsansatz entwickelt, der mit den Grundparametern des Wasserhaushaltes wie Niederschlag, Temperatur, Boden und Relief zu flächenhaften Aussagen hinsichtlich des Luftmangels kommt (DIETZ et al. 2009). Dieser Ansatz schätzt einen Staunässeindex ohne Zuhilfenahme eines physikalischen Wasserhaushaltsmodells ab und ist die Basis für die Weiterentwicklung der Beschreibung des Lufthaushaltes.

2.2 *Semi-empirisches Prognosemodell und Datengrundlage*

Für dieses semi-empirische Regressionsmodell der Pilotphase wurde in einem Testgebiet im Nordosten Bayerns ein ordinaler Staunässeindex definiert. Als Prädiktoren zur Ableitung des Index mittels einer multiplen linearen Regression wurden flächenhaft vorhandene Klima-, Relief- und Bodenparameter berücksichtigt. Die Regionalisierung der Bodeninformationen erfolgte dabei über die Zuweisung von Leitprofilen überwiegend aus der Profildatenbank der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft sowie dem Bodeninformationssystem Bayern (BIS) zu Einheiten der Übersichtsbodenkarte 1:25.000 des Bayerischen Landesamtes für Umwelt. Die regionalisierten Klimadaten sind für die Gegenwart und für den Prognosezeitraum 2071–2100 bayernweit vorhanden (ZIMMERMANN et al. 2007). Reliefparameter wurden im Alpenraum durch Rasteranalysen von einem DGM mit horizontaler Auflösung von 10 m, für den Rest der bayerischen Landesfläche von einem 50 m DGM abgeleitet. Die Zielvariable, der Staunässeindex, ist die klassifizierte Staunässeestufung gemäß Tab. 50 AK STANDORTSKARTIERUNG (2003). Das Modellfitting erfolgte iterativ an Hand von Bodenprofilen, Bohrstockansprachen, Standortskarten und Ökogrammen nach EWALD (2007) u. a. an gut untersuchten Sturmwurfflächen.

Das Ergebnis der Staunässeindex-Regression wird klassifiziert. Die Überprüfung der Güte dieses Ansatzes erfolgte im Gelände in drei Testgebieten (in Nordostbayern an 30 Bodenprofilen (DIETZ et al. 2009), im Raum Erlangen an einer 1:10.000 Bodenkartierung und in den Alpen anhand von 350 Bodenprofilen).

2.3 *Wasserhaushaltsmodellierung und Zielgröße*

Die deterministische Wasserhaushaltsmodellierung erfolgt mit dem physikalischen forstlichen 1d-Bodenwasserhaushaltsmodell LWF-Brook90 (FEDERER et al. 2003, HAMMEL & KENNEL 2001), welches die hydrologischen Wachstumsbedingungen

am Standort zeitlich hoch aufgelöst bestimmt. Dabei wird der Wasserhaushalt durch numerische Lösung der Richards- und der Penman-Monteith-Gleichung unter Verwendung eines Verdunstungsansatzes nach Shuttleworth-Wallace abgebildet (SHUTTLEWORTH & WALLACE 1985). Das Modell benötigt exakte Parametrisierungen der einzelnen Standorte, wobei die bodenhydraulischen Eigenschaften durch den Mualem-van-Genuchten Ansatz beschrieben werden (MUALEM 1976, VAN GENUCHTEN 1980). Außerdem kann die Bestandesentwicklung sowie der baumartenspezifische intraanuelle LAI-Verlauf über ein phänologisches Modell simuliert werden (MENZEL 1997, VON WILPERT 1990).

Um einen für ganz Bayern repräsentativen Staunässeindex aus den physikalischen Modellierungen abzuleiten, werden umfangreiche Brook-Simulationen unter den verschiedensten Randbedingungen durchgeführt. In diese Ensemble-Modellierung gehen 101 Bodenprofile ein, für die horizontweise Messwerte zu Körnung, Kohlenstoffgehalt und Dichte vorliegen und die die Bandbreite an Bodeneigenschaften in Bayern repräsentieren. Mittels dieser Grunddaten werden über Pedotransferfunktionen die Parameter zur Beschreibung von Wasserspeicherfähigkeit und Leitfähigkeit abgeleitet (WÖSTEN et al. 1999). Als Modell-Bestände wurden 60-Jährige Fichten und Buchen (nicht dargestellt) gewählt. Für Fichten wird eine maximale Durchwurzelung von 100 cm vorgegeben, für Buchen 120 cm. Die Maximaltiefen der Durchwurzelung sind durch Matrixpotentialanalysen an Intensiv-Messflächen sowie durch die Auswertung von baumartentypischen Durchwurzelungstiefen an Messpunkten der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald plausibilisiert. Diese potentiellen Tiefen werden gegebenenfalls auf den effektiven Wurzelraum von Pseudogleyen und flachgründigen Böden beschränkt, da die Durchwurzelung hier durch hydraulische oder physikalische Barrieren eingeschränkt ist (SCHMID & KAZDA 2002). Es werden meteorologische Tageswerte der Periode 1971–2000 von 117 DWD-Klimastationen aus Bayern und den angrenzenden Bundesländern für die Modellierung verwendet. Die Profile werden permutativ mit Klimastationen, Neigungen und Expositionen sowie mit den Baumarten kombiniert. Für die Betrachtung des Lufthaushaltes sind die Modellläufe auf nicht oder nur schwach geneigten Flächen relevant.

Es wird eine über die ersten 30 cm des Profils gemittelte Größe (AIR30) tagesweise ausgegeben, nämlich die aktuelle Luftkapazität bezogen auf das gesamte Porenvolumen, welche als Indikator für Luftmangelstress dient (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Diese Größe berücksichtigt nicht nur die Über- oder Unterschreitung der Feldkapazität, sondern auch den Einfluss der Porosität auf den tatsächlich zur Verfügung stehenden Luftgehalt im Porenraum. Für die hier vorgestellte Auswertung der Modellläufe mit der Baumart Fichte wird von diesem Parameter das 10-Tagesmittel berechnet, da Wurzelschädigungen erst nach mehrtägigen Phasen mit Wassersättigung und damit Luftmangel eintreten (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003, S. 113). Ein eingeschränktes Luftvolumen liegt dann vor, wenn AIR30 Werte kleiner als 0,12 annimmt, also lediglich 12 % des Gesamtporenvolumens im Oberboden mit Luft gefüllt sind. Die die Staunässe beschreibende Zielgröße ist schließlich die Summe aller Luftmangeltage ($LM_{\text{Tage-Vp}}$) während der Vegetationsperiode von Mai bis September, an denen dieser Grenzwert unterschritten wird.

3 Ergebnisse

3.1 Semi-Empirisches Prognosemodell – Regionalisierung

Das auf Relief-, Klima- und Bodendaten basierende semiempirische Regressionsmodell schätzt die Verhältnisse bezüglich des Sauerstoffangebots für die Wurzeln ab. Je niedriger der Wert, desto höher die Neigung zu Staunässe und damit Sauerstoffmangel:

$$StauIndex = 10,14 + 0,0003 * kf - 0,0035 * nFK + 0,29 * slope - 1,872 * \ln(P_{VP}) + 0,2648 * T_{VP} - 0,0003 * P_{Mrz} + 0,847 * \ln(Stautiefe) + 0,008 * Skelett - 0,124 * \ln(Ton) + 0,9 * 2^{curv} + 1,708 * hoetief$$

Mit: *kf* = gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [cm/d], *nFK* = nutzbare Feldkapazität [mm], *slope* = Hangneigung [Grad], *P_{VP}* = Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode (Mai–September) [mm], *T_{VP}* = mittlere Temperatur in der Vegetationszeit [°C], *P_{Mrz}* = Niederschlagssumme im März [mm], *Stautiefe* = Obergrenze des Stauhizontes [cm], *Skelett* = Skelettgehalt Profil [%], *Ton* = mittlerer Tongehalt Profil [%], *curv* = Vertikalwölbungsradius [m], *hoetief* = Höhe über Tiefenlinie [m]

Zur Plausibilisierung wurde auf Bodenkarten und Profile in drei intensiv untersuchten Gebieten zurückgegriffen. Grundsätzlich zeichnet das Modell nur, wenn die Bodendaten eine stauende Schicht haben und entsprechende Niederschläge fallen. Kleinräumig dominiert das Relief die Differenzierung in unterschiedliche Staunässegrade. Die Anwendung der Regression hat gezeigt, dass eine Unterscheidung von staunassen und nicht staunassen Standorten möglich ist (DIETZ et al. 2009). Allerdings konnte die Intensität und Dauer des Luftmangels nicht zufriedenstellend vorhergesagt werden. Aufgrund der Einschränkungen (ordinale Zielvariable, fehlende Beschreibung von Dauer und Intensität) dieses empirischen Regressionsmodells der Pilotphase wird in dem neuen Ansatz die Zielgröße zur Beschreibung der Staunässe für ebene Standorte mit einem deterministischen Wasserhaushaltsmodell berechnet und erst im Anschluss mit den relevanten Reliefparametern kombiniert.

3.2 Wasserhaushaltsmodellierung – Sensitivität und Zielgröße

Voraussetzung für die Verwendung eines Wasserhaushaltsmodells zur detaillierten Beschreibung von Luftmangel ist, dass das Modell diese Zielgröße differenziert in Abhängigkeit von der Bodenart simulieren kann. Nur so ist gewährleistet, dass

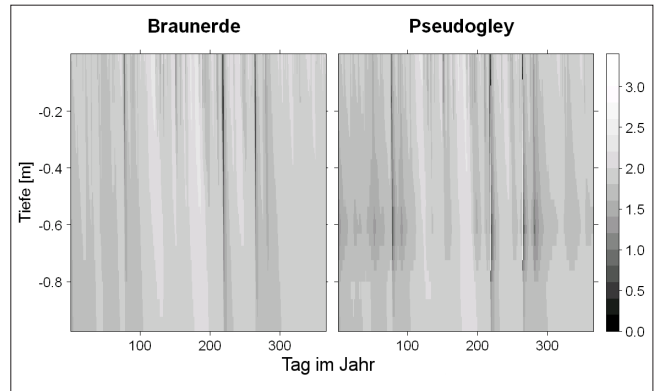


Abb. 1: Matrixpotenziale (pF-Wert) einer Braunerde und eines Pseudogleys mit einer Stauschicht in 60–80 cm Tiefe für das Jahr 2000. Klima: 1.000 mm Jahresniederschlagssumme und 8,2° C mittlere Temperatur.

Fig. 1: Matrix potentials (pF value) of a Cambisol and a soil with stagnant properties at a depth of 60–80 cm. Year 2000 was chosen as an example. Climate: total annual precipitation 1.000 mm and annual mean temperature 8,2°C.

der extrahierte Luftmangelparameter tatsächlich sensitiv auf stauende Bodenbedingungen reagiert und damit als Prädiktor geeignet ist. Als qualitativer Sensitivitätstest für die Abbildung von Staunässe durch das Modell LWF-Brook90 wurden für ein gut drainierendes Profil (Braunerde) die Horizontwerte für Dichte und Tongehalt synthetisch verändert und der Effekt auf das simulierte Matrixpotenzial betrachtet. Der ursprüngliche Bv-Horizont der Braunerde mit Dichte 1.250 kg/m³ und 40 % Tongehalt wurde zu einem Sd-Horizont mit Dichte 1.500 kg/m³ und 65 % Tongehalt modifiziert (Pseudogley). Der Wasserhaushalt beider Profile wurde mit identischen Randbedingungen wie Bestockung, Reliefposition, Zeitraum und Klima mit LWF-Brook90 simuliert. Abbildung 1 zeigt den zeitlichen Verlauf des Matrixpotentials als pF-Wert, in unterschiedlichen Tiefen beider Bodentypen für das Beispieljahr 2000. Die geringeren Matrixpotenziale (hohe Wassergehalte) oberhalb und innerhalb der Stauschicht (60–80 cm) des Pseudogleys im Vergleich zum kontinuierlicheren Tiefenverlauf der Braunerde werden deutlich. Dieses Verhalten ist besonders ausgeprägt zu Zeiten außerhalb der Vegetationsperiode. Jedoch machen sich diese Effekte auch während der Sommermonate bemerkbar. Folglich kann LWF-Brook90 den Luftmangel plausibel abbilden, sofern bei den Horizontdaten Bodenart und Dichte in entsprechender Verlässlichkeit vorliegen.

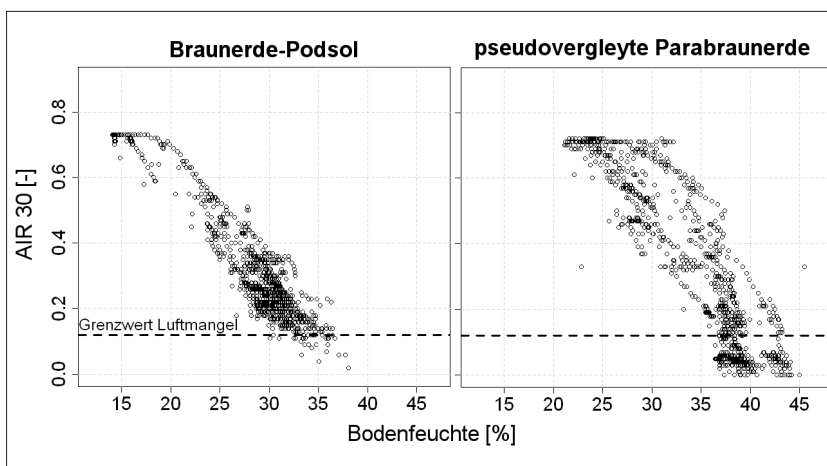


Abb. 2: Plausibilisierung des Luftmangelindikators AIR30 anhand Bodenfeuchtemessungen an zwei WKS mit unterschiedlich stauenden Böden.

Fig. 2: Verification of the excess soil water indicator AIR30 using soil moisture measurements on two forest soils with different water-logging properties.

Tab. 1: Anzahl Luftmangeltage ($LM_{\text{Tage-VP}}$), Bodentypen, Niederschlagssumme Jahr (P) und Vegetationsperiode (P_{VP}) an Bayerischen WKS.

Tab. 1: Sum of days with soil oxygen deficiency during the vegetative period ($LM_{\text{Tage-VP}}$), German soil types, total annual precipitation (P) and total precipitation May–September (P_{VP}) at the different Bavarian Forest ecosystem monitoring plots (WKS).

WKS	ALT	FLO	MIT	FRE	RIE	EBE
Bodentyp	PP	BB-PP	pBB	BB-LL	sLL/CF	LL
$LM_{\text{Tage-VP}}$	0	1,75	16,25	1,75	6,75	32,5
P [mm]	841	870	1405	832	681	963
P_{VP} [mm]	393	406	620	450	336	539

Weiterhin wurde analysiert, ob der vorgeschlagene Luftmangelindikator AIR30 die realen Bodenluftverhältnisse widerspiegelt. Dazu wurden gemittelte Zeitreihen von TDR-Bodenfeuchtemessungen aus 5 cm und 30 cm Tiefe an zwei Waldstandorten herangezogen. In Abbildung 2 ist der Parameter AIR30 gegen Bodenfeuchtemessungen aus einer 5-jährigen Messreihe an zwei Intensiv-Messstationen (Waldklimastationen WKS) dargestellt. Da an diesen Stationen auch Wetterdaten gemessen werden sowie Boden- und Bestandesparameter in hoher Güte vorliegen, sind die damit kalibrierten LWF-Brook90 Simulationen direkt mit den Messungen der Bodenfeuchte vergleichbar. Der Unterschied zwischen einem gut dränenden Boden und einer pseudovergleyten Parabraunerde mit zeitweise reduzierenden Bedingungen zeigt sich deutlich. Beim Braunerde-Podsol (Niederschlag > 800 mm) wird der Grenzwert für Luftmangel nur an wenigen Tagen unterschritten, beim staunassen Boden (Niederschlag < 700 mm) ist dies trotz geringerer Niederschlagssummen wesentlich öfter der Fall. Einschränkungen des Lufthaushalts wie sie der Parameter AIR30 beschreibt, können somit mit dem Bodenwassergehalt plausibilisiert werden.

Die für Abbildung 2 gemachten Auswertungen wurden für vier weitere WKS durchgeführt. In Tabelle 1 sind die mittleren Luftmangeltage innerhalb der Vegetationsperiode aufgeführt. Die Werte zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Zielgröße $LM_{\text{Tage-VP}}$ vom Niederschlag. So hat die im Vorderen Bayerischen Wald gelegene skelettreiche WKS Mitterfels (MIT) trotz scheinbar hoher Leitfähigkeiten ($k_{\text{Feinboden}} = 65 \text{ cm/d}$) eine erhöhte Anzahl von Luftmangeltagen aufgrund eines Niederschlags von über 1.400 mm/Jahr und Skelettgehalten von ca. 35 Vol.-%.

Grundsätzlich ist eine gute Übereinstimmung zwischen den im Bodentyp beschriebenen Staunäseeigenschaften und der Zielgröße zu erkennen, die vom Niederschlag beeinflusst wird. Der gut dränende Podsol hat keinerlei Luftmangel, die

Parabraunerden mit einem tonangereicherten Bt-Horizont hingegen zeigen Staunäseeffekte.

Um die Zielgröße weiter zu plausibilisieren, wurden die Ergebnisse der Ensemble-Simulationen (vgl. Abschnitt 2.3) hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Bodentyp und $LM_{\text{Tage-VP}}$ ausgewertet. Tabelle 2 zeigt für 50 Norm- und Übergangsbodentypen die Anzahl an Luftmangeltagen in der Vegetationsperiode. Es zeigt sich erneut, dass die Bodentypen und deren Stauereigenschaften sich in der Anzahl der Luftmangeltage widerspiegeln. Die Braunerden (BBn) fügen sich auf den ersten Blick nicht in diesen Zusammenhang ein. Allerdings haben von den 16 BBn-Profilen sieben einen kf-Wert kleiner 20 cm/d, was bereits in den Bereich der hydraulischen Leitfähigkeiten von Pseudogleyen fällt.

4 Diskussion

4.1 Modellansatz und Datengrundlage

Mit dem empirischen multiplen Regressionsmodell konnte grundsätzlich gezeigt werden, dass eine Einstufung in staunasse und nicht staunasse Bereiche möglich ist, wenn Boden-, Klima- und Reliefdaten flächenhaft vorliegen (DIETZ et al. 2009). Dieser empirisch abgeleitete Staunäseeindex ist allerdings keine kontinuierlich gemessene Größe und entspricht damit streng genommen nicht den formellen Voraussetzungen einer linearen Regressionsanalyse. Aus diesem Grund werden daher künftig alle Klima- und Bodenparameter in ein neues Regressionsmodell übernommen, das eine metrische Zielgröße auf Grundlage von Wasserhaushaltsmodellierungen hat ($LM_{\text{Tage-VP}}$). Durch LWF-Brook90 wird die Dynamik aus Wasserangebot, Wassertransport im Boden und Verbrauch durch Evapotranspiration deterministisch beschrieben. Nur so können auch Aussagen zur Quantität und Qualität des Luftmangels im Jahresverlauf gemacht werden. Die in das Wasserhaushaltsmodell eingehenden Boden- und Klimaparameter wirken fast

Tab. 2: Anzahl Luftmangeltage ($LM_{\text{Tage-VP}}$), Bodentypen, Niederschlagssumme Vegetationsperiode (P_{VP}) und Profilanzahl von 240 Modellläufen.

Tab. 2: Sum of days with soil oxygen deficiency during the vegetative period ($LM_{\text{Tage-VP}}$), German soil types, total precipitation May–September (P_{VP}), and number of profiles used for 240 LWF-Brook90 model runs.

Bodentyp	PPn	PP-BB	BB-PP	SS-BB	BBn	LLn	BB-SS	LL-SS	SSn
$LM_{\text{Tage-VP}}$	0	0	0,2	5,9	17,4	13,9	21,6	18,4	27,4
P_{VP} [mm]	377	362	354	344	486	393	439	474	476
Profile	4	3	4	2	16	5	4	4	8

alle in der gleichen Art und Weise wie im semi-empirischen Regressionsmodell.

Die Wasserhaushaltsmodellierung alleine kann jedoch, zumindest mit dem verwendeten 1d-Modell LWF-Brook90, die Dynamik des oberflächenparallelen Wasserflusses nicht ausreichend abbilden (SCHWÄRZEL et al. 2009). Daher ist die Kombination aus Reliefanalyse und regionalisierter Luftmangelgröße angezeigt. Da Bodendaten nur im Maßstab 1:25.000 vorliegen und sich die Klimaparameter (50 x 50 m Raster) nicht kleinräumig ändern, ermöglicht die Einbindung des Reliefs über ein hochaufgelöstes DGM sowie die Einbeziehung morphographischer Indices eine Verbesserung der Auflösung und die Berücksichtigung des Reliefeinflusses auf den Wasserhaushalt. Prozentuale Zu- und Abschläge müssten sich in substrat-abhängigen Wertebereichen abspielen, die mittels Expertenwissen festzulegen sind.

Relief und Klimadaten sind für Bayern bereits in guter Qualität flächig vorhanden. Bodendaten hingegen zeigen teils Schwächen bei den relevanten bodenphysikalischen Parametern, da die Daten oft im Gelände geschätzt oder mittels Pedotransferfunktionen abgeleitet werden, deren Güte in Abhängigkeit von der Bodenart stark schwanken kann (OSENSTETTER et al. 2009). Die Bestimmung von Skelettgehalten und Dichte ist aufwändig, Dichte und Körnung wiederum werden für die Ableitung von pF-WG-Kurven benötigt, die nicht gemessen sondern meist über Pedotransferfunktionen u. a. aus diesen Parametern berechnet werden. Es ist also in Summe mit einer Fehlerfortpflanzung und Ungenauigkeiten zu rechnen. Insbesondere für Waldböden besteht ein Defizit bei der Messung von pF-WG-Kurven, das nur langsam behoben wird (PUHLMANN et al. 2009).

4.2 Luftmangelparameter der Wasserhaushaltsmodellierung

Der AK STANDORTSKARTIERUNG (2003) schlägt als Maß für die Stauanässe die Einschränkung der Luftkapazität im Ober- und Unterboden über einen bestimmten Zeitraum innerhalb der Vegetationszeit vor. Für den Oberboden wird eine Grenze von 12 % Luftgehalt im Wurzelraum, für den Unterboden von 6 % über 14 Tage bei der Baumart Buche genannt. Für die Baumart Fichte, die höhere Ansprüche an die Luftversorgung ihrer Wurzeln hat (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) schätzen wir daher 10 Tage als kritische Grenze. Die Einschränkung der Luftkapazität im Oberboden entspricht dem vorgeschlagenen Parameter AIR30. Der entsprechende Parameter für den Unterboden AIR60, der den Bereich von 30–60 cm mittelt, wurde nicht dargestellt. SCHWÄRZEL et al. (2009) nehmen die Überschreitung der Feldkapazität in 40 cm Bodentiefe über 5 Tage als Maß für Luftmangelgefährdung. Obwohl der Parameter AIR30 bzw. $LM_{\text{Tage-VP}}$ hier strenger ist, werden im Falle von hoch anstehenden deutlichen Substratwechseln hin zu höheren Tongehalten bei entsprechenden alpinen Niederschlägen Werte von $LM_{\text{Tage-VP}}$ größer 100 berechnet. Dies begründet sich dadurch, dass zum einen der Makroporenfluss über präferenzielle Fließwege in Wasserhaushaltsmodellen wie LWF-Brook90 suboptimal abgebildet wird. Zum anderen wird der Einfluss des Skeletts auf die Durchlässigkeit mathematisch durch das Darcy-Konzept nur unzureichend beschrieben (BEVEN & GERMANN 1982, SAUER & LOGSDON 2002). Daher kann der Parameter $LM_{\text{Tage-VP}}$ auch nur dazu verwendet werden, die Standorte relativ zueinander zu Reihen, vom stärksten zum schwächsten Luftmangel hin.

Der Parameter AIR30 korreliert stark mit den erklärenden

Variablen Niederschlag (Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman 0,62), Tongehalt (0,69) und kf (-0,64). Weitere Auswertungen müssen noch folgen, um eine Regressionsbeziehung zwischen den Prädiktoren Boden- und Klimaprediktoren und der Zielgröße $LM_{\text{Tage-VP}}$ abzuleiten. Diese ist dann z. B. mit einem empirischen Modell zu verknüpfen, das die Geländesituation interpretiert. So ließen sich die oben beschriebenen Defizite des Wasserhaushaltsmodells in einem GIS über die Verschneidung des Parameters $LM_{\text{Tage-VP}}$ mit Zu- und Abschlagsfaktoren ausgleichen (Zu- und Abflüsse aufgrund Reliefs, erhöhte Durchlässigkeit durch Skelett, Makroporosität, Klüftigkeit).

Somit kann ein Gesamtmodell entwickelt werden, das sowohl deterministische Verknüpfungen der Wasserhaushaltsgrößen beinhaltet als auch die durch das Gelände bestimmten Zu- und Abflüsse. Damit verbindet es Vorteile quantitativer physikalischer Standortmodelle mit denen von Regionalisierungsverfahren.

4.3 Plausibilisierung und Extrapolation

Eine erfolgreiche Verknüpfung von $LM_{\text{Tage-VP}}$ mit Reliefeigenschaften und die Anwendung in der Fläche bedarf einer Plausibilisierung der Ergebnisse, da sowohl die Ausgangsdaten (Boden, Klima), die Zuweisung von Leitprofilen zu Bodeneinheiten der Übersichtsbodenkarte 1:25.000 als auch die Modellierung mit LWF-Brook90 Fehler behaftet sein können (BAGGLEY et al. 2009). Da jedoch die Stauanäseinstufung im Gelände häufig subjektiv ist (unterschiedliche Zeichnungseigenschaften der Substrate) und es nur wenige Wassergehaltsmessungen gibt, ist als Validierungsgröße eine Kombination aus Bodenansprache und Monitoringverfahren z. B. über Zeigerpflanzen (EWALD et al. 2000) angedacht.

Der Vorteil des vorgestellten Stauanässe-Modells ist es, alle vorliegenden gemessenen Daten zu berücksichtigen und objektiv miteinander in Beziehung zu setzen. Dadurch können mit Hilfe von Klimaszenarien mögliche Änderungen in Folge des Klimawandels aufgezeigt werden. Da ein Regressionsmodell nicht über den Wertebereich der Lerndaten hinaus extrapoliert werden darf, wurden bei der Ensemble-Wasserhaushaltsmodellierung auch Klimastationen verwendet, die in trockenen und warmen Gebieten außerhalb Bayerns liegen. Zusätzlich wurden meteorologische Zeitreihen von Klimastationen mit Klimawandelszenarien kombiniert und so hypothetische Zukunftsstationen kreiert, die den trockenen und warmen Rand der Klimadaten abbilden, um so auch die Randbereiche der Korrelation durch die Regression abzudecken (ZIMMERMANN 2009).

5 Ausblick

Der Beitrag stellt ein erstes Konzept vor, welches durch die Verknüpfung von deterministischen Wasserhaushaltsmodellierungen und Reliefparametern eine räumliche Vorhersage des Luftmangels im Boden für die komplette bayerische Privat- und Körperschaftswaldfläche ermöglichen soll. Da nicht auf der gesamten Landesfläche flächendeckend modelliert werden kann, muss die Beschreibung über regionalisierte Schätzgrößen erfolgen und Reliefeinflüsse über Zu- und Abschläge integriert werden. Es ist noch zu prüfen, ob die Beschreibung des Luft- und Wasserhaushaltes für ganz Bayern mit den extremen Klimagradienten (Alpen bis Untermain) zielführend ist, oder ob eine getrennte Betrachtung des Alpenraumes erfolgreicher sein kann. Neben linearen Regressionsverfahren zur Regionalisierung der

beschriebenen Luftmangel-Zielgröße $LM_{\text{Tage-VP}}$ können auch andere, verteilungsunabhängige Techniken z. B. aus dem Bereich der Regression Trees getestet werden. Da zur Wasserhaushaltsmodellierung auch Klimadaten einfließen, die außerhalb der derzeitigen bayerischen Verhältnisse liegen und somit auch der trocken-warme Randbereich abgebildet wird, können die Endmodelle für Prognosen im Zusammenhang mit dem Klimawandel verwendet werden. Entsprechende regionalisierte Klimaszenarien liegen für Bayern vor.

Die dargestellte Beschreibung des Wasser- und Lufthaushaltes der Waldstandorte in Bayern fließt in die Projekte „Bäume für die Zukunft“ und „Karten für die Zukunft“ ein, die flächendeckend für den Privat- und Körperschaftswald in Bayern Standortinformationen und entsprechende Baumarteneignungen bis 2012 liefern werden (BECK et al. 2009). Im Alpenraum werden Informationen nach den gleichen Prinzipien im Rahmen des Projektes WINALP (EWALD 2009) bereitgestellt.

Danksagung

Wir danken Dr. Birgit Reger für die Bereitstellung von Daten im Rahmen des Projekts WINALP, Winfried Grimmeisen für die Bodenfeuchtedaten der WKS (gefördert durch das EU Life+ Projekt FutMon), Dr. Christian Kölling, Christoph Schulz und Dr. Lothar Zimmermann für die Diskussionen und Datenbereitstellung, Tim Häring, Dan Morowitz und zwei unbekanntem Reviewern für Ihre Anmerkungen zum Text. Außerdem danken wir dem LVG für die Bereitstellung von digitalen Geländedaten (Bayer. Vermessungsverwaltung www.geodaten.bayern.de) und dem bayerischen LfU für die Bereitstellung der ÜBK 25 und Bodendaten (Bayerisches Landesamt für Umwelt www.lfu.bayern.de).

Literatur

- AK STANDORTSKARTIERUNG (2003): Forstliche Standortsaufnahme. 6. Aufl., IHW-Verlag, Eching: 352 S.
- BAGGALEY, N., MAYR, T., BELLAMY, P. (2009): Identification of key soil and terrain properties that influence the spatial variability of soil moisture throughout the growing season. *Soil Use Manag.* **25** (3): 262-273.
- BECK, J., DIETZ, E., FALK, W., KÖLLING, C. (2009): Ein neuartiges, forstliches, digitales Standortinformationssystem – anpassungsfähig an Ansprüche des Nutzers und geänderte Umweltbedingungen. *Berichte der DBG*: 3 S.
- BEVEN, K., GERMANN, P. (1982): Macropores and water flow in soils. *Water Resour. Res.* **18** (5): 1311-1325.
- DIETZ, E., FALK, W., BECK, J., HÄRING, T., OSENSTETTER, S., KÖLLING, C. (2009): Flächenhaftes Prognosemodell für Stauwasserböden unter Wald aus Bodenparametern, DGM, Klima und Vegetation. *Berichte der DBG*: 4 S.
- EWALD, J. (2007): Beurteilung von Waldstandorten und Waldgesellschaften mit Zeigerarten-Ökogrammen. *Tuexenia* **27**: 7-18.
- EWALD, J. (2009): Waldinformationssystem Nordalpen – WINALP sammelt Wissen zum Schutz der Bergwälder. *Waldforschung aktuell* **30**: 45-46.
- EWALD, J., REUTHER, M., NECHWATAL, J., LANG, K. (2000): Monitoring von Schäden in Waldökosystemen des bayerischen Alpenraumes. Bayerisches Staatsmin. für Landesentwicklung u. Umweltfragen, Materialien 155, München.
- FALK, W., DIETZ, E., GRÜNERT, S., SCHULTZE, B., KÖLLING, C. (2008): Wo hat die Fichte genügend Wasser? *LWF aktuell* **66**: 21-25.
- FALK, W., DIETZ, E. (2009): Wassermangelvorhersage mittels digitaler Standortskarten in Bayern – Methoden und erste Ergebnisse im Projektgebiet Nordostbayern. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung* **82**: 135-144.
- FEDERER, C.A., VÖRÖSMARTY, C., FEKETE, B. (2003): Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity. *J. Hydrometeorol.* **4** (6): 1276-1290.
- HAMMEL, K., KENNEL, M. (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. *Forstl. Forschungsberichte München* **185**.
- LANG, B., LÜESCHER, P., GERMANN, P.F. (2009): Significance of tree roots for preferential infiltration in stagnic soils. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **13**: 1809-1821.
- LYR, H., FIEDLER, H.J., TRANQUILLINI, W. (Hrsg.) (1992): *Physiologie und Ökologie der Gehölze*. Gustav Fischer Verlag, Jena Stuttgart: 620 S.
- MENZEL, A. (1997): *Phänologie von Waldbäumen unter sich ändernden Klimabedingungen – Auswertung der Beobachtungen in den internationalen phänologischen Gärten und Möglichkeiten der Modellierung von Phänodaten*. PhD. Diss. Forstliche Forschungsberichte München 164.
- MUALEM, Y. (1976): New model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous-media. *Water Resour. Res.* **12** (3): 513-522.
- OSENSTETTER, S., FALK, W., DIETZ, E., KÖLLING, C., ZIMMERMANN, L. (2009): Einflüsse der Pedotransferfunktionen auf die Ergebnisse bodenhydrologischer Modellierungen an Waldstandorten. *Berichte der DBG*: 4S.
- PUHLMANN, H., VON WILPERT, K., LUKES, M., DRÖGE, W. (2009): Multistep outflow experiments to derive a soil hydraulic database for forest soils. *Eur. J. Soil Sci.* **60** (5): 792-806.
- SAUER, T.J., LOGSDON, S.D. (2002): Hydraulic and physical properties of stony soils in a small watershed. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **66**: 1947-1956.
- SCHMID, I., KAZDA, M. (2002): Root distribution of Norway spruce in monospecific and mixed stands on different soils. *For. Ecol. Manage.* **159**: 37-47.
- 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.
- SCHWÄRZEL, K., FEGER, K.-H., HÄNTZSCHEL, J., MENZER, A., SPANK, U., CLAUSNITZER, F., KÖSTERN, B., BERNHOFER, C. (2009): A novel approach in model-based mapping of soil water conditions at forest sites. *For. Ecol. Manage.* **258** (10): 2163-2174.
- SHUTTLEWORTH, W.J., WALLACE, J.S. (1985): Evaporation from sparse crops – an energy combination theory. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **111** (469): 839-855.
- VAN GENUCHTEN, M.T., (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **44** (5): 892-898.
- VON WILPERT, K. (1990): *Die Jahrringstruktur von Fichten in Abhängigkeit von Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde*. PhD. Diss., Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br.
- WESTERN, A.W., GRAYSON, R.B., BLÖSCH, G. (2002): Scaling of soil moisture: A Hydrologic Perspective. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci. Lett.* **30**: 149-180.
- WÖSTEN, J.H.M., LILLY, A., NEMES, A., LE BAS, C. (1999): Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* **90** (3-4): 169-185.
- ZIMMERMANN, L., RÖTZER, T., HERA, U., MAIER, H., SCHULZ, C., KÖLLING, C. (2007): Konzept für die Erstellung neuer hochaufgelöster Klimakarten für die Wälder Bayerns als Bestandteil eines forstlichen Standortinformationssystems.

In: MATZARAKIS, A., MEYER, H. (Hrsg.): Proceedings zur 6. Fachtagung BIOMET des Fachausschusses Biometeorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft e.V. Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg **16**: 152-159.

ZIMMERMANN, L. (2009): Vergleich von Trockenstressperioden unter derzeitigem und zukünftigem Klima für verschiedene Baumarten. Berichte der DBG: 4 S.

submitted: 12.11.10
reviewed: 12.01.11
accepted: 10.02.11

Autorenanschrift:

Wolfgang Falk, Sebastian Osenstetter und Dr. Elke Dietz
Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1, D-85354 Freising
E-Mail: Wolfgang.Falk@lwf.bayern.de
E-Mail: Sebastian.Osenstetter@lwf.bayern.de
E-Mail: Elke.Dietz@lwf.bayern.de