

Modellierung und Regionalisierung des Standortwasserhaushaltes von Wäldern im Mittelgebirge

Kai Schwärzel¹, Janet Häntzschel¹, Alexander Menzer¹, Uwe Spank², Falko Clausnitzer²,
Barbara Köstner², Christian Bernhofer², Karl-Heinz Feger¹

¹ Institut für Bodenkunde und Standortlehre, Professur Standortlehre und Pflanzenernährung, TU Dresden, Tharandt.

² Institut für Hydrologie und Meteorologie, Professur Meteorologie, TU Dresden, Tharandt

1 EINLEITUNG

Für die standortgerechte und nachhaltige Bewirtschaftung von Wäldern ist eine räumlich-differenzierte Charakterisierung des Wasserhaushaltes und seiner Komponenten unabdingbar. Erst die Kenntnis des pflanzenverfügbaren Bodenwasserangebots bzw. auch eines möglichen Überschusses in Form von Stauwasser erlaubt die Bewertung von Stabilität, Leistungsfähigkeit und Risikobelastung forstlicher Standorte (vgl. z.B. Wagner, 2004; Rennenberg et al., 2004; Ammer et al., 2005; Kölling et al., 2005a, 2007). Zudem ist die objektive Klassifizierung des ökologisch wirksamen Standortfaktors Wasser auch für die Zuordnung zu einem Standortstyp und die forstliche Standortserkundung/-kartierung essentiell.

Die derzeit in der Standortkartierung in den einzelnen Bundesländern verwendeten Verfahren („Länderverfahren“) sind semi-empirisch; bei der Klassifikation des sogenannten Gesamtwasserhaushalts gehen diese Verfahren i.d.R. von der potenziell natürlichen Bestockung aus (natürliche Waldgesellschaft in ihrer typischen zonalen Ausprägung bzw. „Standortswald“ (vgl. Michiels, 1998). Die bereits auf Krauss (1936) zurückgehenden Einstufungen „sehr trocken“ bis „sehr frisch“ sind somit als relative Abweichungen von der Referenzsituation „frisch“ bis „mäßig frisch“ zu betrachten (Abb. 1). Die Referenzsituation repräsentiert den Gleichgewichtszustand von (Regional- bzw. Wuchsbezirks)-Klima und naturnaher Waldbestockung bei durchschnittlich wasserversorgten Böden in ebener Lage (vgl. Schwanecke, 1970). Dieser qualitative Ansatz liegt in z.T. modifizierter Form sämtlichen „Länderverfahren“ zugrunde (vgl. AK Standortkartierung, 2003).



Abbildung 1: Prinzip der gegenwärtigen Klassifikation des Wasserhaushaltes forstlicher Standorte.

Der Vorteil dieser Verfahren besteht darin, dass anhand von Feldbeobachtungen ohne zusätzliche zeit- und kostenaufwendige Analysen der Wasserhaushalt forstlicher Standorte bewertet werden kann. Verwirrend und für den praktischen Gebrauch erschwerend ist jedoch, dass die für die Kennzeichnung des Wasserhaushaltes verwendeten verbalen Bezeichnungen (z.B. „frisch“, „feucht“) sich inhaltlich zwischen den einzelnen Länderverfahren unterscheiden und sich z.T. auf verschiedene Betrachtungsebenen (Bodenwasserhaushalt, reliefbedingter Wasserhaushalt, Gesamtwasserhaushalt oder ökologische Feuchtestufe) beziehen. Insofern besteht sowohl Objektivierungs- als auch Vereinheitlichungsbedarf (vgl. AFSV, 2007). Nachteilig ist außerdem, dass das Standortklima als konstante Rahmenbedingung angesetzt und lediglich in Bezug auf Reliefeinflüsse in Form von Zu- bzw. Abschlägen modifiziert wird. Diese Korrekturen sind durch Einschätzungen sich überlagernder Ausprägungen bodenkundlich/geologischer, klimatologischer und pflanzenphysiologischer Prozesse definiert. Tatsächlich ist das Klima aber einem ausgeprägten Wandel unterworfen. Dies gilt sowohl für die interannuelle Variabilität, welche besonders auch Häufigkeit und Intensität extremer Situationen (v.a. Ausprägung von Trocken- und Feuchtjahren) einschließt, als auch für die langfristige Klimaveränderung (AFSV, 2007; Bolte & Ibisch, 2007; Kölling et al., 2007). Unsicherheiten bestehen bei der Beurteilung des reliefbedingten Wasserhaushalts, d.h. auch in der subjektiven Zuordnung von bodenhydrologisch relevanten Bedingungen zu allgemeinen Reliefeigenschaften (Hangneigung und Exposition). Geomorphologische und pedogenetische Gesetzmäßigkeiten des jeweiligen Naturraumes sind hier zu berücksichtigen (vgl. z.B. Eckhardt et al., 2001; Friedrich et al., 2002; Behrens & Scholten, 2006; Schulz & Asche, 2006). Abschließend ist noch ein weiteres Problem zu benennen: die hydrologische Rückkopplung von forstlichen Maßnahmen (z.B. Baumarten, Bestockungsdichte) auf den Standortswasserhaushalt kann mit den herkömmlichen Verfahren nicht eingeschätzt werden.

Die Prognose des Wasserhaushaltes von Waldstandorten bei sich verändernden Randbedingungen (Klima und Bewirtschaftung) erfordert die Anwendung numerischer Modelle. Deshalb und um die o.g. Schwächen der gegenwärtigen Klassifikation des Wasserhaushaltes von Forststandorten reduzieren zu können, wurde ein Modellsystem entwickelt, das die Berechnung und Beurteilung des Standortswasserhaushaltes bei variablen Klima- und Bewirtschaftungsbedingungen nach objektiven und nachvollziehbaren Kriterien erlaubt. Effekte bei sich ändernden Randbedingungen (Klima, Bewirtschaftung) können damit

abgeleitet und einem möglichen Nutzer in Form neuer forstlicher Standortskarten zugänglich gemacht werden. Nachfolgend werden Grundprinzipien des Modellsystems kurz erläutert und Ergebnisse zur Berechnung und Regionalisierung des Standortwasserhaushaltes präsentiert.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 MODELLSYSTEM

Herzstück des Modellsystems ist das forsthydrologische Modell LWF-BROOK90 (Hammel und Kennel, 2001), das mit zusätzlichen Programmmodulen in eine GIS-Umgebung integriert wurde. Innerhalb des GIS erfolgt die Regionalisierung von Punktmessdaten, die Übernahme und Verschneidung vorhandener digitaler Flächendaten, die Simulationsrechnungen und die anschließende Ergebnisdarstellung.

Die räumlich-differenzierte Modellierung und Bewertung des Standortwasserhaushaltes erfordert räumlich-differenzierte meteorologische Eingangsgrößen. Insbesondere in bergigem Gelände variieren diese Größen kleinräumig in Abhängigkeit der Topographie; beispielsweise hängt der Strahlungseintrag am Standort von der Hangneigung und Hangausrichtung ab. Ausgangsdaten zur räumlich-differenzierten Berechnung der meteorologischen Größen waren deshalb die digitalen Daten des Höhenmodells DHM/M745 (Landesvermessungsamt Sachsen, 1996). Diese Rasterdaten liegen in einer horizontalen Auflösung von 25 m und einer vertikalen Genauigkeit von 1 m vor. Über die digitalen Geländehöhen wurden in der GIS-Umgebung für das gesamte Modellgebiet Neigungs- und Ausrichtungswerte abgeleitet. Basierend auf den Zusammenhängen zwischen Geländemorphologie und den jeweiligen meteorologischen Größen wurden dann für jedes Pixel einzelne Klimagrößen bezüglich einer Klimastation ermittelt. Diese berechneten Werte der jeweiligen Geländepunkte wurden anschließend mit dem Wert des Pixels, in dem sich die Klimastation befindet, normiert. Die sich dadurch ergebenden Faktoren (z.B. für Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung) bzw. Differenzen (z.B. für Windrichtung) beschreiben die kleinräumlichen Unterschiede in der Verteilung der Klimaelemente bezüglich der Stationslage. Über diese Faktoren/Differenzen können die Messwerte der im Modellgebiet befindlichen Klimastation auf täglicher Basis regionalisiert werden.

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die morphologisch bedingte Ausprägung kleinklimatischer Effekte eines Gebietes nur einmal berechnet werden muss. Die Verteilungswerte können im GIS vorgehalten und in Abhängigkeit der verwendeten Klimastation bezüglich dieser Verteilung neu normiert und anschließend mit den Messwerten dieser Station verrechnet werden. Der Anteil variabler Modelleingangsgrößen und die damit verbundene Rechenzeit werden dadurch deutlich verringert. Die Methoden zur Ableitung der räumlichen Verteilungen der Klimaelemente basieren i.W. auf den Arbeiten von Goldberg (1999), Goldberg und Häntzschel (2002), Häntzschel et al. (2005) sowie Franke et al. (2008). Eine zusammenfassende Darstellung dieser Methoden geben Schwärzel et al. (2008).

2.2 MODELLGEBIET UND EINGANGSDATEN

Modellgebiet ist der Tharandter Wald, wo an zwei standörtlich-repräsentativen Flächen unter Fichte (seit 1996) und Buche (seit 2006) kontinuierliche Messungen zum Energie- und Wasserhaushalt erfolgen. Kontinuierlich erfasst werden hierbei Strahlung, Wind, Lufttemperatur/-feuchte, Freiland- und Bestandesniederschlag, sensible und latente Wärmeströme bzw. Verdunstung mittels Eddy-Kovarianz-Technik, Saftfluss der Bäume sowie Bodenwassergehalt und -potenzial (Grünwald und Bernhofer, 2007; Spank et al., 2008). Diese Messungen bildeten die Grundlage für die Entwicklung und Kalibrierung des Modellsystems (Schwärzel et al. 2007, Schwärzel et al., 2008). In diesem Beitrag werden Ergebnisse zur GIS-gestützten Modellierung des Buchenstandortes vorgestellt. Die Boden- und Reliefkarte des Gebietes zeigt Abbildung 2.

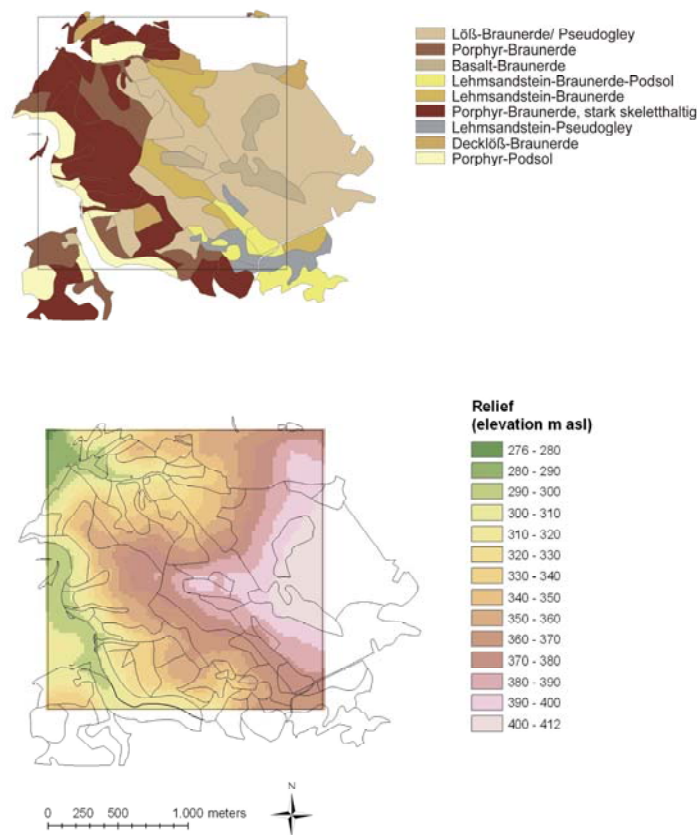


Abbildung 2: (a) Böden (oben) und (b) Relief (unten), Standort Buchhübel, Tharandter Wald.

Bei den Böden des Messstandortes Buchhübel handelt es sich überwiegend um Braunerden, z.T. pseudovergleyt und/ oder podsoliert, auf Quarzporphyr, Basalt und Lehmsandstein (Abb. 1). Zudem sind die Böden meist durch früheren Löss eintrag beeinflusst. Die Erschließung des Unterbodens durch Wurzeln der Buche wird oftmals durch hohe Steingehalte, Bodenverdichtung und Staunässe behindert; je nach Standortverhältnissen ermittelten wir für Buche einen Hauptwurzelraum von 30 bis 65 cm. Informationen zu den Böden wurden aus der vom Staatsforstbetrieb Sachsen bereitgestellten forstlichen

Standortskarte (Maßstab 1:10.000), den dazugehörigen Legenden-Informationen (Lokalbodenformenkatalog, Schwanecke, 1993) und etwa 100 älteren Profilaufnahmen abgeleitet. Zusätzlich wurden 28 Profile im Tharandter Wald nach dem Verfahren der bodenkundlichen Kartieranleitung (AG Boden, 2005) aufgenommen und horizontweise beprobt. Für jeden Horizont wurden im Labor folgende Größen gemessen: Bodentextur, Kohlenstoffgehalt, Trockenrohdichte, ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit sowie die Wasserretentionskurve. Die bodenhydraulischen Eigenschaften wurden nach dem in Schwärzel et al. (2006) beschriebenen Verfahren ermittelt. Anhand der o.g. Datenbasis wurden repräsentative Bodenprofile mit horizontspezifischen Angaben zur Bodentextur, den Humus- und Skelettgehalten sowie der Trockenrohdichte generiert. Im Fall vorliegender Messungen wurden den Horizonten auch die ermittelten Parameter der Wasserretentions- und Leitfähigkeitsfunktion zugeordnet. Waren solche Messwerte nicht vorhanden, schätzten wir diese Parameter nach dem Ansatz von Wösten et al. (1999). Modell-Parameter zur Beschreibung des etwa 100 Jahre alten Buchenbestandes wurden aus den Intensivmessungen abgeleitet.

3 ERGEBNISSE

In Tabelle 1 sind für zwei Böden des Modellgebietes berechnete Wasserhaushaltskomponenten aufgelistet. Bei den Böden handelt es sich um eine steinfreie und eine stark skeletthaltige Braunerde aus Lehm über Quarzporphyr. Im vierzigjährigen Mittel finden sich praktisch keine Unterschiede in der jährlichen Verdunstung und der Bildung von Sickerwasser.

Tabelle 1: Mittlere Wasserhaushaltskomponenten zweier Standorte in ebener Lage des Modellgebietes Buchhübel. Simulationszeitraum 1968 – 2006. Buchenaltbestand im Tharandter Wald. Mittlerer Jahresniederschlag = 860 mm. nFK = nutzbare Feldkapazität = Differenz im Wassergehalt zwischen pF 2.0 und pF 4.2.

Bodentyp	nFK Wurzelraum [mm]	Evapotranspiration [mm a ⁻¹]	Sickerwasserrate [mm a ⁻¹]
Porphyr-Braunerde aus Lehm	125	455	400
Porphyr-Braunerde aus Lehm, stark skeletthaltig	80	445	410

Größere Unterschiede im Bodenwasserregime zwischen den beiden Standorten zeigen sich aber, wenn einzelne Jahre betrachtet werden. Um dies zu veranschaulichen, wurden in Abbildung 3 Indikatoren des Wasserhaushaltes gegen die klimatische Wasserbilanz (KWB) der Vegetationsperiode aufgetragen. Die KWB ist definiert als die Differenz zwischen Niederschlag und Grasreferenzverdunstung (Allen et al., 2000). Abbildung 3a zeigt das Verhältnis von aktueller zu potenzieller Transpiration als Funktion der KWB, wobei dieser Quotient als Mittelwert des jeweiligen Jahres angegeben ist. Bei der steinfreien Braunerde ist der Quotient mit Ausnahme des Jahres 2003 immer nahe 1, d.h., trotz sehr negativer KWB ist genügend Wasser im Boden gespeichert, um auch in Trockenperioden den Bestand

ausreichend mit Wasser zu versorgen. Anders sieht es bei der skelettreichen Braunerde aus: Bereits bei geringfügig negativer KWB ist der Wasserhaushalt gestört, d.h., der Verdunstungsanspruch der Atmosphäre kann nicht vollauf befriedigt werden. In diesen Jahren weicht der Quotient von aktueller zu potenzieller Transpiration deutlich von 1 ab.

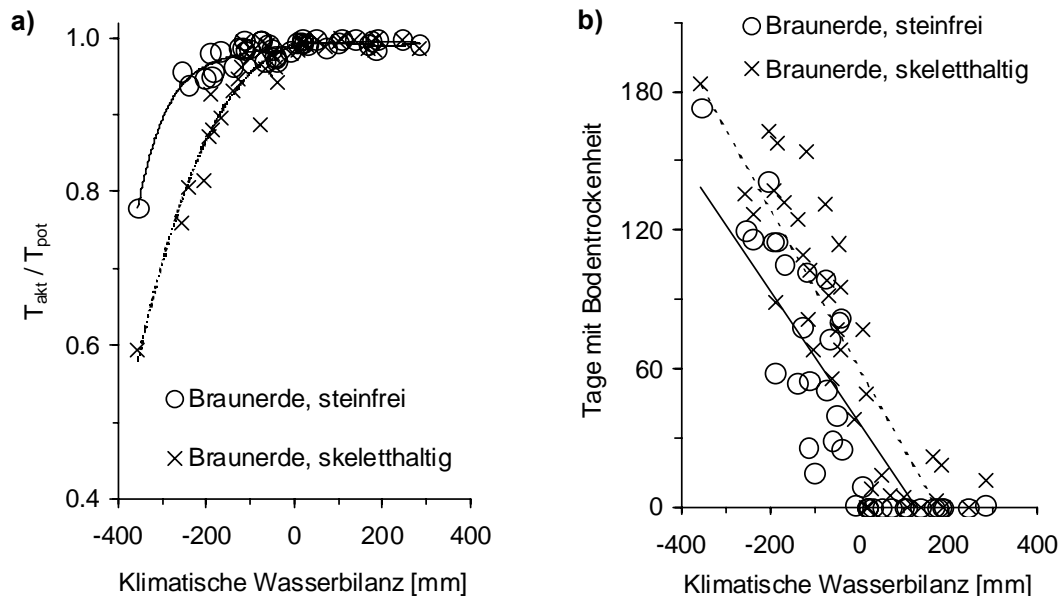


Abbildung 3: (a) Beziehung zwischen dem jährlichen Quotienten aus aktueller und potenzieller Transpiration zur klimatischen Wasserbilanz während der jeweiligen Vegetationsperiode (Mai bis September) und (b) Beziehung zwischen Tagen mit Bodentrockenheit im Jahr und der jeweiligen klimatischen Wasserbilanz während der Vegetationsperiode (Mai bis September). Tage mit Bodentrockenheit = Tage, an denen die aktuelle nutzbare Feldkapazität (nFK) einen Wert $\leq 30\%$ der potenziellen nFK des Wurzelraumes unterschreitet. Simulationszeitraum 1968 bis 2006. Buchenaltbestand, Tharandter Wald.

Für die Bewertung des Wasserhaushalts sind nicht nur die Wasserhaushaltskomponenten entscheidend, sondern auch die Kenntnis des pflanzenverfügbaren Bodenwassers während der Vegetationsperiode, da z.B. die Anfälligkeit des Bestandes gegenüber Schädlingen durch Bodentrockenheit begünstigt wird. Hierbei interessiert insbesondere, wie oft das Verhältnis von aktueller zu potenzieller nutzbarer Feldkapazität (nFK) einen bestimmten Schwellenwert während der Vegetationsperiode unterschreitet. In Abbildung 3b wurde die Unterschreitungshäufigkeit von 30% der potenziellen nFK des Wurzelraumes als Funktion der KWB aufgetragen. Trotz Streuung der Werte finden sich enge Beziehungen zwischen den atmosphärischen Randbedingungen und den Bodeneigenschaften. Bei der steinfreien Braunerde beobachteten wir erst bei deutlich negativer KWB ein gehäuftes Auftreten von Bodentrockenheit. Bei der skeletthaltigen Braunerde trat Bodentrockenheit bereits bei positiver KWB auf.

Aus den in Tabelle 1 und Abbildung 3 dargestellten Ergebnissen ergibt sich ein erstes Fazit: Die oben eingeführten Indikatoren Transpirationsstress und Bodentrockenheit erlauben eine quantitative Bewertung des Wasserhaushaltes von Forststandorten. Außerdem ist die Betrachtung von Einzeljahren, insbesondere von klimatischen Extremen, anstatt von lang-

jährigen Mittelwerten, aussagekräftiger, wenn der Wasserhaushalt von Wäldern bewertet werden soll.

Der Einfluss der Witterung und des Bodens auf die Transpiration von Buche zeigt Abbildung 4. Dargestellt sind räumlich-verteilte Jahreswerte der Transpiration für das feuchte Jahr 1996 sowie für das trockene Jahr 2003.

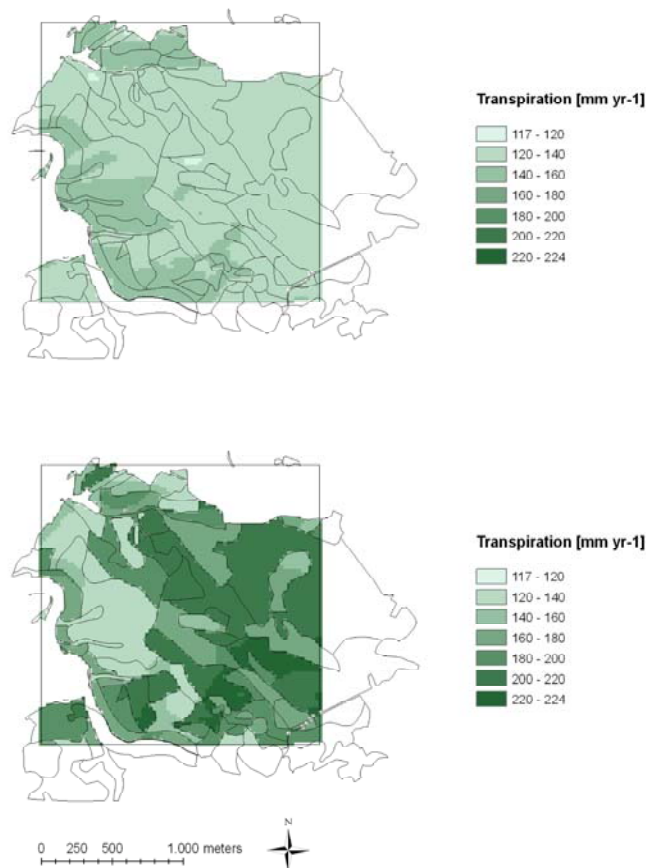


Abbildung 4: (a) Jahreswerte der Transpiration für das feuchte Jahr 1996 (oben) sowie (b) für das trockene Jahr 2003 (unten). Während der Vegetationsperiode (Mai bis September) 1996 wurde ein Niederschlag von 470 mm und eine potenzielle Verdunstung von 370 mm, während der Vegetationsperiode 2003 ein Niederschlag von 230 mm und eine potenzielle Verdunstung von 590 mm ermittelt. Buchenaltbestand am Buchhübel, Tharandter Wald.

Auffällig ist, dass im feuchten Jahr nur eine geringe Variabilität (120 - 160 mm) der Transpiration in der Fläche beobachtet wurde. Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten beruhen vor allem auf reliefbedingten Unterschieden in der Einstrahlung. In feuchten, verdunstungsschwachen Jahren hängt die Höhe der Transpiration folglich allein vom Verdunstungsanspruch der Atmosphäre ab, der Einfluss des Bodens auf die Transpiration ist vernachlässigbar. Anders in 2003: Wir fanden eine deutlich höhere Variabilität der Transpiration im Modellgebiet. Die Transpiration belief sich auf Werte zwischen 130 und 220 mm pro Jahr. In trockenen Jahren wird die Höhe der Transpiration bei gegebenem

Verdunstungsanspruch der Atmosphäre entscheidend durch die bodenhydraulischen Eigenschaften, also Wasserspeicherefähigkeit und hydraulische Leitfähigkeit bestimmt. Das verdeutlicht auch Abbildung 5a, die für das Jahr 2003 den berechneten Transpirationsstress, also die Häufigkeit der Unterschreitung des 70%-Schwellenwertes des Verhältnisses von aktueller zu potenzieller Transpiration, zeigt.

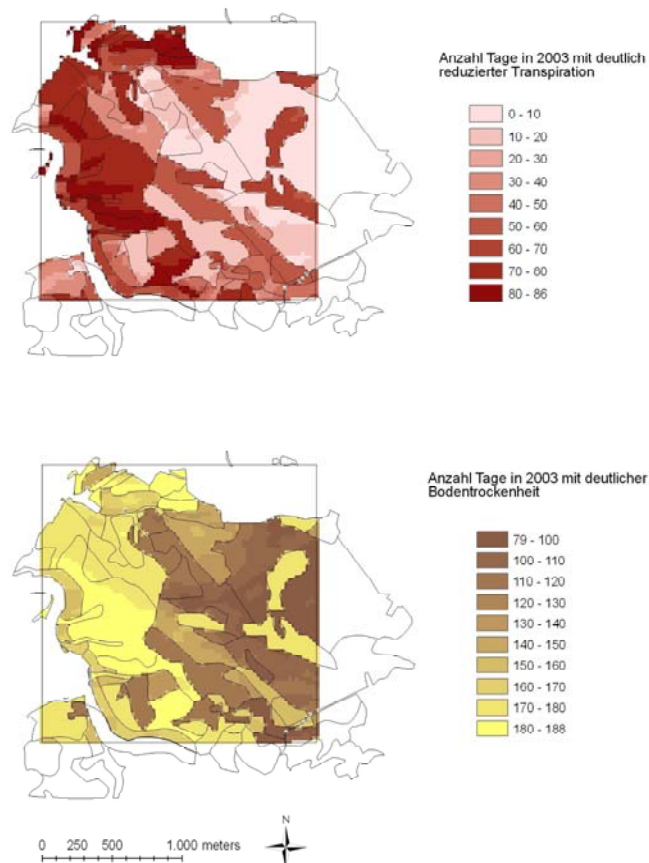


Abbildung 5: (a) Anzahl von Tagen im Jahr 2003, an denen der Quotient von aktueller zu potenzieller Transpiration $\leq 70\%$ (oben) und (b) Anzahl von Tagen im Jahr 2003, an denen der Quotient von aktueller zu potenzieller nutzbarer Feldkapazität des Wurzelraumes $\leq 30\%$ (unten). Buchenaltbestand am Buchhübel, Tharandter Wald.

Die große Anzahl von Tagen mit Transpirationsstress verdeutlichen, dass im Jahr 2003 der Standortswasserhaushalt stark gestört war und der Verdunstungsanspruch der Atmosphäre nicht befriedigt werden konnte. Insbesondere die geringmächtigen Basalt-Braunerden und die stark skeletthaltigen Porphy-Braunerden (siehe auch Abb. 2) reagierten mit einer starken Reduktion der Transpiration auf die extremen Witterungsbedingungen. Auf den pseudo-vergleyten Standorten war der Transpirationsstress deutlich geringer ausgeprägt. Ursache war der kapillare Aufstieg von Stauwasser in den Wurzelraum, der die Buchenbestände auf diesen Standorten mit zusätzlichem Wasser versorgt. Abbildung 5b zeigt für das Modellgebiet die Anzahl der Tage im Jahr 2003, an denen der 30%-Schwellenwert (= Bodentrockenheit) des potenziell pflanzenverfügbaren Bodenwassers unterschritten wurde. Standorte mit ausge-

prägtem Transpirationsstress (Abb. 5a) waren auch deutlich von Bodentrockenheit betroffen. Insbesondere die stark skeletthaltigen, südseitig ausgerichteten Braunerden sowie die flachgründigen Basalt-Braunerden in Plateaulage sind in verdunstungsstarken Trockenjahren sehr anfällig für eine starke Austrocknung des Bodens.

Neben Witterung, Boden und Bestockung wird der Wasserhaushalt auch von der Geländeneigung und Exposition beeinflusst. Unsere Modellrechnungen zeigten, dass bei gleichen Bodenverhältnissen südlich ausgerichtete Standorte generell zu stärkerem Transpirations- und Bodentrockenheit neigen als die nördlich ausgerichteten Standorte.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ein Modellsystem zur räumlich-verteilten Berechnung und Regionalisierung des Wasserhaushaltes von Waldstandorten wurde erstellt und getestet. Dies stellt die Basis für den Aufbau eines modellgestützten, übertragbaren Verfahrens zur Klassifikation von Waldstandorten dar. Die Bewertung des Wasserhaushaltes erfordert, den Fokus eher auf Einzeljahre und extreme Jahre als auf langjährige, mittlere Bedingungen zu legen. Unsere Modellrechnungen zeigten außerdem, dass die geländebedingte Ausprägung kleinklimatischer Effekte nicht zu vernachlässigende Unterschiede im Wasserhaushalt bewirken kann. Die Bewertung des Wasserhaushaltes (WH) durch im Modell implementierte Indikatoren scheint erfolgversprechend. Unterschiede im WH können nachvollziehbar quantifiziert werden, wobei diese Unterschiede im WH auch räumlich in Form von neuen Standortskarten visualisiert werden können. Mit dem neu entwickelten Modellsystem lässt sich zudem der Einfluss der Änderung des Klimas und der Bewirtschaftung auf den Wasserhaushalt abbilden.

Gegenwärtig anerkannte Verfahren zur Bewertung des Wasserhaushaltes von Waldstandorten sind qualitativ, statisch und stark subjektiv. Die Bewertung der Wasserverfügbarkeit beruht dabei meist auf mittleren Boden- und Wuchsverhältnissen bei stabilen klimatischen Bedingungen, wobei klimatische Extreme (z.B. Dürre) vernachlässigt werden. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die Wirkungen des Klimawandels oder der forstlichen Bewirtschaftung nicht angemessen berücksichtigt werden können. Um diese Defizite zu beheben, wird aufbauend auf den bisherigen, methodischen Arbeiten im Testgebiet Tharandter Wald (Sachsen) ein überregional einheitliches Verfahren der Klassifikation des Standortwasserhaushalts entwickelt. Hierfür ist die Interpretation der im Modellsystem implementierten Indikatoren im Hinblick auf den Standortfaktor Wasser (Ausschöpfung des Bodenwasservorrats, Einschränkung der Transpiration, Auftreten von Staunässe) durch Aufstellung von Zusammenhängen zwischen den Indikatoren und wachstumskundlichen Kenngrößen zu verbessern. Schließlich sollen diese Indikatoren mit physiologisch definierten Schwellenwerten verknüpft, die Bewertungsgrößen skaliert bzw. klassifiziert und damit auch für die forstliche Anwendung nutzbar werden.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung unseres Verbundprojektes (Kennzeichen FE 504/2-1 und -2).

LITERATUR

- AFSV = Arbeitsgemeinschaft Forstliche Standorts- und Vegetationskunde (2007): AG Klimawandel. http://ww997.wb09.de/docs/arbeitsgruppe/ag_klimawandel.html.
- AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover, 438 S.
- AK Standortkartierung (in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung) (2003): Forstliche Standortkartierung. 6. Aufl. IHW-Verlag. Eching b. München, 352 S.
- Ammer, Ch. und 19 Mitautoren (2005): Zur Zukunft der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Mitteleuropa – Kritische Anmerkungen zu einem Beitrag von Rennenberg et al. (2004). AFJZ 176, 60-67.
- Behrens, T., Scholten, T. (2006): Digital soil mapping in Germany - a review. J. Plant Nutr. Soil Sci. 169, 434-443.
- Bolte, A., Ibsch, P.L. (2007): Neun Thesen zu Klimawandel, Waldnaturschutz. AFZ/Der Wald 61, 572-576.
- Eckhardt, K., C. Friedrich, H.-G. Frede (2001): Unterscheidbarkeit von Böden in der hydrologischen Modellierung. - Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 96, 595-596.
- Franke, J., Häntzschel, J., Goldberg, V., Bernhofer, C. 2008. Application of a trigonometric approach to the regionalization of precipitation for a complex small-scale terrain in a GIS environment. Meteorol Appl (in print).
- Friedrich, C., Fohrer, N. and Frede, H.-G. (2002): Quantification of soil properties based on external information by means of fuzzy-set theory. J Plant Nutr. Soil Sci. 165, 511-516.
- Goldberg, V. (1999): Zur Regionalisierung des Klimas in den Hochlagen des Osterzgebirges unter Berücksichtigung des Einflusses von Wäldern. Tharandter Klimaprotokolle 2, 193 S.
- Goldberg, V., Häntzschel, J. (2002): Application of a radiation model for small-scale complex terrain in a GIS environment. Meteorol. Zeitschrift 11, 119-128.
- Grünwald, T., Bernhofer, Ch. (2007): A Decade of Carbon, Water and Energy Flux Measurements of an Old Spruce Forest at the Anchor Station Tharandt. Tellus 59B, 387–396.
- Hammel, K., Kennel, M. (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. – Forstl. Forschungsber. München 185, 146 S.
- Häntzschel, J., Goldberg, V., Bernhofer, C., 2005. GIS-based regionalisation of radiation, temperature and coupling measures in complex terrain for low mountain ranges. Meteorological Applications 12, 33-42.
- Kölling, C., Walentowski, H., Borchert, H. (2005a): Die Buche in Mitteleuropa. Eine Waldbaumart mit grandioser Vergangenheit und sicherer Zukunft. AFZ/Der Wald 60, 696-701.
- Kölling, C., Zimmermann, L., Walentowski, H. (2007): Klimawandel: Was geschieht mit Buche und Fichte? AFZ/DerWald 61, 584 - 588.
- Krauss, G.A. (1936): Aufgaben der Standortkunde. - Jahresbericht Dtsch. Forstverein, S. 319 ff, Berlin.
- Landesvermessungsamt Sachsen (1996): Verzeichnis der Karten u. digitalen Daten. Dresden, 31 S.
- Michiels, H.G. (1998): Der Standortswald im Südwestdeutschen Standortkundlichen Verfahren. Mitt. Ver. Forstl. Standortkunde Forstpflanzenzüchtung 39, 73-80.
- Prechtel, N. (1996): Flächennutzungskartierung mit Satellitendaten. - Wiss. Zeitschr. TU Dresden 45, 62-66.

- Rennenberg, H., W. Seiler, R. Matyssek, A. Geßler, J. Kreuzwieser (2004): Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) - ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa? AFJZ 175, 210-244
- Schulz, R.; Asche, N. (2006): Die Nutzung der BK50 bei der Forstlichen Standortkartierung in NRW. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 108, 52-53.
- Schwaneke, W. (1970): Richtlinien zur Bildung der Standortseinheiten im Hügelland und Mittelgebirge der DDR. – VEB Forstprojektierung Potsdam, 98 S.
- Schwanecke, W. (1993): Merkmalstabellen für Haupt- und Lokalbodenformen der forstlichen Standortserkundung im Freistaat Sachsen (Bodenformenkatalog). – Sächsische Landesanstalt für Forsten, Graupa.
- Schwärzel, K., Šimůnek, J., Stoffregen, H., Wessolek, G., van Genuchten, M.T. (2006): Estimation of the unsaturated hydraulic conductivity of peat soils: Laboratory versus field data. Vadose Zone Journal 5, 628-640.
- Schwärzel, K., J. Häntzschel, T. Grünwald, B. Köstner, C. Bernhofer, K.H. Feger (2007): Fundamentals of the spatially distributed simulation of the water balance of forest sites in a low-range mountain area. Adv. Geosci. 11, 43-47.
- Schwärzel, K., Häntzschel, J., Menzer, A., Spank, U., Clausnitzer, F., Köstner, B., Bernhofer, C., Feger, K.H. (2008): Model based mapping of soil water conditions in forest sites. For. Ecol. Man. (submitted).
- Spank, U., Bernhofer, Ch., Hahn- Bernhofer, S. (2007): Another simple method of spectral correction to obtain robust EC results. Boundary-Layer Meteorology (resubmitted).
- Wagner, S. (2004): Klimawandel- einige Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. Forst und Holz 59, 394-398.
- 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, 169-185.