

Konzept für ein neues quantitatives Verfahren zur Kennzeichnung des Wasserhaushalts von Waldböden in Bayern: Modellierung – Regression – Regionalisierung

Bernd Schultze¹, Christian Kölling², Christoph Dittmar³, Thomas Rötzer⁴ und Wolfram Elling⁵

¹Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Am Hochanger 11, D-85354 Freising

²Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Am Hochanger 11, D-85354 Freising, Tel.: 08161 71-4945, Fax: 08161 71-4971, Mail: koe@lwf.uni-muenchen.de (Korrespondierender Autor)

³Fachhochschule Weihenstephan, Fachbereich Wald und Forstwirtschaft, D-85350 Freising

⁴Technische Universität München, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Am Hochanger 13, D-85354 Freising

⁵Fachhochschule Weihenstephan, Fachbereich Wald und Forstwirtschaft, D-85350 Freising

Eingegangen: 06.05.2005 Angenommen: 14.09.2005

Kurzfassung: Um die teilweise unbefriedigende Erfassung des Wasserhaushalts in der forstlichen Standortserkundung auf eine sicherere Basis zu stellen, wurden für zahlreiche im Bereich Bayerns auftretende Kombinationen von Klima, Geländelage und Bodenverhältnissen mit Hilfe eines Wasserhaushaltsmodells ca. 8000 Simulationen für den Zeitraum 1961-1990 durchgeführt. Als Zielgröße des Modells wurde die Transpirationsdifferenz T_{diff} verwendet, die als Differenz zwischen der potenziell möglichen und der aktuell verwirklichten Transpiration der Bäume ein Indikator für den Wassermangel der Waldbestände ist. Die Indexgröße T_{diff} wurde mit Hilfe eines Regressionsmodells regionalisiert. Auf diese Weise werden die bislang verwendeten Wasserhaushaltsstufen durch objektive und überregional gültige Zahlengrößen ersetzt.

Als unabhängige Größen gingen Mitteltemperatur und Niederschlagssumme in der Vegetationszeit, Exposition und Neigung sowie die Bodengrößen potenziell nutzbare Wasserspeicherkapazität und Durchlässigkeitsbeiwert (= hydraulische Leitfähigkeit) in das Regressionsmodell ein. Die Regionalisierung des Indexwertes T_{diff} ergab eine landesweit vergleichbare und in den meisten Fällen plausible Darstellung des Wasserhaushalts der Waldstandorte auf regionaler und lokaler Maßstabebene. Unter Berücksichtigung notwendiger Verbesserungen, Validierungen und Verfeinerungen könnte der dargestellte Ansatz landesweit Verwendung finden. Angesichts der vorhergesagten Klimaveränderung kann das entwickelte Verfahren auch an veränderte Umweltbedingungen angepasst werden. Die Aktualisierung von bestehenden Standortskarten und Erstellung von räumlichen Szenarien sind die beiden wichtigsten Einsatzbereiche des neuen Verfahrens.

A new concept for quantitative characterization of forest site water budget in Bavaria

Abstract: For a better characterization of forest site water budget simulations with many representative combinations of climate, topography and soil condition parameters were carried out using the water balance model BROOK90. We used the difference between actual and potential tree transpiration (T_{diff}) as output of the 8000 simulations (period 1961 to 1990). The index T_{diff} states a universal measure of forest site water supply and deficiency. Then, a regression of T_{diff} as dependent parameter on spatially available independent parameters was carried out. In a final step the index T_{diff} was regionalized with data of climate maps, Digital Terrain Model (DTM), and soil maps. The obtained maps give generalized and objectified representations of forest site water budget.

Independent parameters of the regression model were (i) mean temperature of vegetation period, (ii) precipitation sum in vegetation period, (iii) slope and aspect of terrain, and (iv) estimates of soil parameters such as water storage capacity and conductivity. Results of the regionalization are plausible and comparable in a local, regional, and supra-regional scale. Regardless of necessary validations of the maps and some improvements the method is suitable for creating and updating forest site maps. In the light of global change, an adjustment of the maps to future climatic conditions is well feasible. Thus, improving quality of existing forest site maps and creating scenario maps are the two important fields of applying our procedure in forest practice.

Key words: forest site maps, water budget model, water supply

1 Einleitung

Der Wasserhaushalt von Waldböden wird seit langem als einer der wichtigsten Standortfaktoren angesehen. In allen forstlichen Standortskartierungen ist die Wasserversorgung der Waldbäume ein wichtiges Klassifikationsmerkmal. In der Form der Wasserhaushaltsstufe (von trocken bis frisch, bei Wasserüberschuss auch feucht und nass) bestimmt der Wasserhaushalt ganz wesentlich waldbauliche Entscheidungen, insbesondere die Baumartenwahl. Die Bewertung des Wasserhaushalts von Waldstandorten wird in den einzelnen Bundesländern jedoch unterschiedlich gehandhabt (Arbeitskreis

Standortskartierung 2003). In den meisten Fällen handelt es sich bei der Geländeaufnahme um eine Schätzung, der in Form eines einfachen Modells bestimmte Annahmen zugrunde liegen. Beim Geländebezug werden geschätzte quantitative Größen wie die nutzbare Wasserspeicherkapazität, Niederschlagssumme und -verteilung sowie Strahlung und Temperatur logisch miteinander verknüpft und die Ergebnisse klassiert als Wasserhaushaltsstufen in der Karte festgehalten. Dieses seit langer Zeit (Krauss 1936) erfolgreich praktizierte Verfahren arbeitet im Grundsatz nicht anders als ein hydrologisches Modell: Die Komponenten des Wasserhaushalts

- Niederschlag
- Verdunstung
- Bodenspeicherung

werden modellhaft zueinander in Beziehung gesetzt. Die sich ergebende Zielgröße ist die durchschnittliche Wassermenge, die den Waldbäumen am Standort zur Verfügung steht. Dieses kombinierte Schätz- und Rechenverfahren wurde von Laatsch (1969a u. b) und Weiger (1971) zu großer Perfektion gebracht. Auf großen Teilen der Landesfläche wurden mit wechselnder Intensität und Qualität Waldstandorte mit Hilfe dieser Schätz- und Rechenverfahren kartiert, die resultierenden Standortskarten sind als unentbehrliches Hilfsmittel fest in der forstlichen Praxis verankert.

Im Laufe der Zeit sind jedoch immer wieder Zweifel an der Zuverlässigkeit der Wasserhaushaltsansprache in der Praxis der Standortserkundung laut geworden (z. B. Laatsch 1969a u. b, Benecke 1984, Elling et al. 1990). Die Situation verschärft sich neuerdings angesichts des prognostizierten Klimawandels, der die früheren Wasserhaushaltsansprachen stark relativiert (Kölling 2005). Folgende Mängel haften den herkömmlichen Verfahren der Wasserhaushaltsansprache an:

- die Rechen- und Schätzvorschriften sind teilweise nicht offengelegt und dokumentiert,
- durch die Bildung von Klassen (Wasserhaushaltsstufen) ist Information verloren gegangen,
- die einzelnen Komponenten des Wasserhaushalts Niederschlag, Verdunstung und Bodenspeicherung können nachträglich nicht separiert werden,
- eine Anpassung der Wasserhaushaltsansprache an veränderte Klimabedingungen ist bei Wasserhaushaltsstufen schwierig bis unmöglich,
- die Schätzverfahren haben eine subjektive Komponente, verschiedene Kartierer schätzen verschieden, und
- die Wasserhaushaltsstufen sind (im zweistufigen Kartierverfahren) überregional nicht vergleichbar.

Die Mängel der Schätzverfahren in der Standortserkundung treten umso offenkundiger in Erscheinung, als in den letzten Jahren leicht zu bedienende deterministische Wasserhaushaltsmodelle auch für Waldstandorte entwickelt wurden (z. B. Wegehenkel 2000, Hammel u. Kennel 2001, Rötzer et al. 2004). Diese Modelle haben ihre Tauglichkeit in einer Vielzahl von Fallstudien bewiesen (z. B. Hammel u. Kennel 2001). Ein wesentlicher Vorteil der Modelle sind

- die Nachvollziehbarkeit der Berechnung,
- die Freiheit von Klasseneinteilungen,
- die Trennung der einzelnen Komponenten des Wasserhaushalts,
- die Möglichkeit zur Anpassung an veränderte Eingangsdaten oder Rahmenbedingungen,
- die Freiheit von subjektiven Einflüssen
- überregionale Vergleichbarkeit
- die Möglichkeit, auch physiologisch relevante Größen auszugeben.

Neben diesen unbestrittenen Vorteilen gibt es jedoch auch einen gravierenden Nachteil. So haben die meisten Modelle einen hohen Anspruch an die Qualität und Erhebungstiefe der Daten, der sich mit flächenhaft vorliegenden Daten aus Klima- und Bodenkarten nicht befriedigen lässt. Daher werden Wasserhaushaltsmodelle bevorzugt bei Ökosystem-Fallstudien und auf Versuchsflächen eingesetzt, wo die benötigten Daten in ausreichender Menge und Auflösung vorhanden sind. Fehlen lediglich Witterungsdaten eines Standorts, so können diese hilfswise über Transferfunktionen geschätzt werden (z. B. Rötzer 2000).

Das Ziel des Vorhabens ist daher, die Wasserhaushaltsansprache in der forstlichen Standortserkundung auf eine verbesserte, quantitative und objektive Basis zu stellen. Damit soll die Wasserhaushaltsansprache auch sich ändernden Umweltbedingungen anzupassen sein, und die Baumarteneignung sowie der Standorts-Leistungsbezug sollten zutreffend beschrieben werden.

2 Material und Methoden

2.1 Modellanwendung

Als Datenbasis für die Modellanwendung wurden 144 Bodenprofile aus der Profildatenbank der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF). Die Auswahl der Profile orientierte sich am durchschnittlichen Vorkommen der Standorte in den forstlichen Wuchsgebieten Bayerns. Aus den vorhandenen Angaben über die Bodentextur schätzten wir die hydraulischen Bodenfunktionen (Sättigungswassergehalt, Feldkapazität, Totwassergehalt) im Anhalt an Teepe et al. (2003) und bestimmten damit die Parameter für die pF-WG-Funktion nach van-Genuchten mit dem Programm Shyfit (Durner 1994). Der Durchlässigkeitsbeiwert wurde über die Bodentextur nach der Forstlichen Standortsaufnahme (Arbeitskreis Standortskartierung 2003) bestimmt.

Die Eigenschaften der Profile wurden mit den Witterungsdaten von 58 typischen Wetterstationen in den Wuchsgebieten aus dem Zeitraum 1961-1990 verknüpft. Jede der so entstandenen Kombinationen wurde ihrerseits mit wuchsgebietstypischen Expositionen und Hangneigungen kombiniert. Die Datenbasis dieser Repräsentanzuntersuchungen lieferte die Bundeswaldinventur (BWI 2), bei der für über 7000 Inventurpunkte Exposition und Neigung bestimmt wurden. Allen Kombinationen aus Klima, Lageparametern und Boden wurden jeweils die Baumart Buche mit 80 cm Durchwurzelungstiefe und die Baumart Fichte mit 50 cm Durchwurzelungstiefe und typischen Kronenmerkmalen zugeordnet. Es wurden demnach nicht alle denkbaren Kombinationen berechnet, sondern nur die häufiger vorkommenden in einer Gesamtzahl von knapp 8000 Fällen.

Für alle diese Fälle wurden mit Hilfe einer gegenüber der Originalversion (Federer 1995) modifizierten Version des Wasserhaushaltsmodells BROOK90 (Hammel u. Kennel 2001) Simulationsläufe über den gesamten Zeitraum 1961-1990 durchgeführt. Als Zielgröße der Modellanwendung wurde der Index Transpirationsdifferenz (T_{diff}) ausgegeben. Die Größe ergibt sich aus der vom Modell ausgegebenen aktuellen Transpiration und der bei voller nutzbarer Wasserspeicherkapazität (pF 1,8-4,2) möglichen, nach Shuttleworth und Wallace (1985) modellierten potenziellen Transpiration ($T_{diff} = T_{pot} \pm T_{akt}$). Der Index weist eine enge Beziehung zur Baumphysiologie auf und gibt an, welche Wassermenge den Waldbeständen zur uneingeschränkten Transpiration fehlt. Die ökophysiologische Relevanz des verwandten Index ET_{diff} (zusätzliche Einbeziehung der Evaporation) wurde mit Hilfe von Jahrringanalysen belegt (Dittmar u. Kölling 2002, vgl. auch Renger et al. 1995). Wegen der besseren Vergleichbarkeit wird T_{diff} für die Vegetationsperiode als Durchschnittswert zusammengefasst und als Tageswert ($mm\ d^{-1}$) normiert.

Beispielhaft zeigt Abbildung 1 einen durchschnittlichen Jahresgang der Transpirationsgrößen in einem Fichtenbestand auf einem Braunerde-Pelosol. Im Mittel der Jahre 1961-1990 ist der Wasserverbrauch dieses Bestandes vom 130. bis 310. Tag reduziert, was sich als Einschränkung der Transpiration

äußert. Aus dem Jahresverlauf errechnet sich für die Vegetationsperiode ein normierter Wert der T_{diff} von $0,85 \text{ mm d}^{-1}$.

2.2 Regression

Mit Blick auf eine spätere Regionalisierung wurde der Index T_{diff} als Zielgröße aus dem Datensatz der Modellläufe mit Hilfe eines Regressionsmodells geschätzt. Als Eingangsgrößen des Regressionsmodells wurden solche Variablen verwendet, die flächenhaft vorliegen bzw. aus Flächendaten geschätzt werden können (Tab. 1). Die nahe liegende direkte Anwendung des deterministischen Wasserhaushaltsmodells auf Flächendaten scheitert an der fehlenden Datengrundlage. Die das Modell steuernden meteorologischen Größen liegen flächenhaft nicht in der erforderlichen zeitlichen Auflösung vor. Außerdem wäre der Rechenaufwand je nach räumlicher Auflösung und Variabilität der Eingangsdaten immens.

Die Regressionsparameter der zur Regionalisierung verwendeten Regressionsmodelle wurden mittels linearer Regression aus dem Datensatz der Simulationsläufe abgeleitet. Dabei wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Variablen als unabhängige Größen und T_{diff} als abhängige Zielvariable verwendet. Zum Einsatz kamen lineare Kombinationen der Originalvariablen und ihrer Ableitungen (Produkte, Logarithmen). Es wurden diejenigen Linearkombinationen der erklärenden Variablen ausgewählt, die die beste Anpassung des Modells an die Daten ergaben. So wurden nacheinander folgende Regressionsgleichungen abgeleitet:

- (1) $T_{diff} = T_{veg} + NS_{5-10}$
- (2) $T_{diff} = T_{veg} + NS_{5-10} + Nei + Exp$
- (3) $T_{diff} = T_{veg} + NS_{5-10} + Nei + Exp + nWS_{pot} + K_{eff}$

Modell 1 bestimmt die Indexgröße T_{diff} ausschließlich aus Klimaparametern des Klimaatlas (Mittlere Lufttemperatur in der Vegetationsperiode T_{veg} , Niederschlagssumme von Mai bis Oktober NS_{5-10}), Modell 2 verwendet zusätzlich die Lagegrößen (Exposition Exp , Neigung Nei) des Geländemodells als wichtige Einflussgrößen auf die Globalstrahlung, und Modell 3 bezieht Bodenkennwerte (Speicherkapazität nWS_{pot} ,

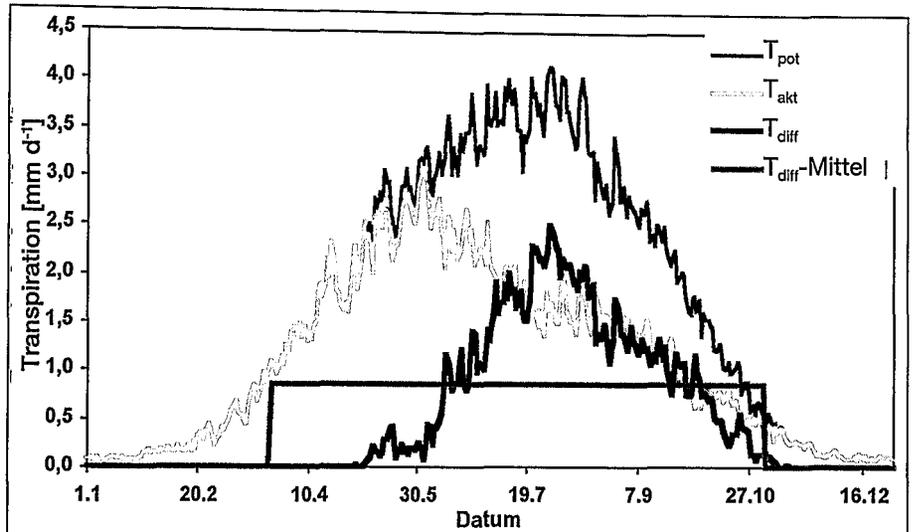


Abb. 1. Beispiel für den durchschnittlichen Jahresgang 1961-1990 der potentiellen (T_{pot}) und aktuellen (T_{akt}) Transpiration sowie der Differenz aus beiden Größen (T_{diff}) für einen Fichtenbestand auf einem Braunerde-Pelosol im Forstamt Bad Königshofen (Forstamt Nr. 608). Der Durchschnitt für T_{diff} in der Vegetationsperiode (24. März bis 2. November) beträgt $0,85 \text{ mm d}^{-1}$. Averaged course of the year (example, years 1961-1990) of actual (T_{akt}) and potential (T_{pot}) transpiration and the resulting difference (T_{diff}) for a spruce stand on a clay soil (model area 608). The mean T_{diff} in the vegetation period (3-24 to 11-2) amounts 0.85 mm d^{-1} .

Durchlässigkeitsbeiwert K_{eff}) mit ein. Die Variable Exposition (Exp) wird für den Bereich von 0 bis 180° verwendet, für den Bereich 180 bis 360° wird die Differenz zu 360° verwendet (Westexpositionen werden den Ostexpositionen gleichgestellt). Die verwendeten Wertebereiche der Größen ergaben sich aus dem Datensatz der 7794 Modellläufe.

2.3 Regionalisierung

Nach der Verschneidung der verschiedenen in Tabelle 1 genannten Variablen im GIS wurde T_{diff} für jedes Polygon mit Hilfe der 3 Regressionsmodelle berechnet, und die Ergebnisse wurden kartografisch umgesetzt.

3 Ergebnisse

3.1 Modellsimulationen

Die Verteilung der aus den 7794 Simulationsläufen erhaltenen Werte für den Index T_{diff} ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Spannweite reicht von 0 (ganzjährig vollständige Wassersätti-

Tab. 1. Für die Regionalisierung verwendete Flächendaten. Input data used for regionalization.

Größe	Quelle	Erläuterung
Mitteltemperatur der Vegetationsperiode ($> 5^\circ \text{C}$) 1961-1990 (T_{veg})	Klimaatlas von Bayern (BAYFORKLIM 1996)	Daten aus der Forstlichen Vegetationsperiode ($>10^\circ \text{C}$) liegen nicht vor. Gitterweite 400 m
Niederschlagssumme Mai-Okt. 1961-1990 (NS_{5-10})	Klimaatlas von Bayern (BAYFORKLIM 1996)	Daten aus der Forstlichen Vegetationsperiode ($>10^\circ \text{C}$) liegen nicht vor. Gitterweite 400 m
Neigung (Nei), Exposition (Exp)	Digitales Geländemodell des US-Geological Survey (USGS)	Gitterweite 680 m
Potenziell nutzbare Wasserspeicherung (nWS_{pot})	Digitale Standortskarte von 4 Modellforstämtern	Schätzung aus der Standortseinheit (Substrat, Gründigkeit) unter Verwendung von Leitprofilen
Durchlässigkeitsbeiwert (K_{eff})	Digitale Standortskarte von 4 Modellforstämtern	Schätzung aus der Standortseinheit (Substrat, Schichtung) unter Verwendung von Leitprofilen

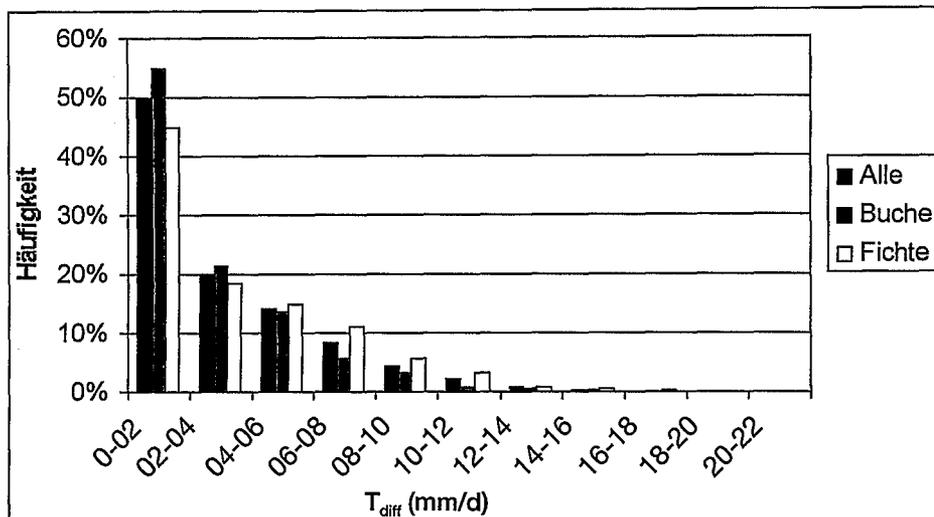


Abb. 2. Relative Häufigkeitsverteilung des Index T_{diff} [mm d⁻¹] aus 7794 Simulationsläufen für bayerische Waldstandorte. Frequency of T_{diff} [mm d⁻¹] in 7794 simulations for characteristic sites in Bavaria.

Tab. 2. Ergebnisse der Regression mit den Klimagrößen (Modell 1). Parameter estimates of regression (climate parameters, model 1).

Regression	BA	Regressionsgleichung: $T_{diff} =$	R ²
Klima (Modell1)	Buche	$-2.2 + 0.064 \times T_{veg} + 0.00084 \times NS_{5-10} + 635 \times NS_{5-10}^{-1}$	0.5706
Klima (Modell1)	Fichte	$-3.0 + 0.097 \times T_{veg} + 0.0011 \times NS_{5-10} + 823 \times NS_{5-10}^{-1}$	0.6503

Tab. 3. Ergebnisse der Regression mit den Klimagrößen, der Exposition und Hangneigung. Die Variable Exposition (Exp) wird für den Bereich von 0 bis 180° verwendet, für den Bereich 180 bis 360° wird die Differenz zu 360° verwendet (Westexpositionen werden den Ostexpositionen gleichgestellt). Modell 2.

Parameter estimates of regression (climate parameters, slope, and aspect, model 2). Aspect (Exp) is used from 0 to 180 degrees, the range from 180 to 360 degrees is computed as difference to 360 degrees (aspect "west" is equated to aspect "east").

Regression	BA	Regressionsgleichung: $T_{diff} =$	R ²
Klima, Neigung Exposition (Modell 2)	Buche	$-2.26 + 0.061 \times T_{veg} + 0.0010 \times NS_{5-10} + 630 \times NS_{5-10}^{-1} + 0.00013 \times T_{veg} \times Exp - 0.00038 \times T_{veg} \times Neig - 0.0000030 \times NS_{5-10} \times Exp + 0.000074 \times Exp \times Neig$	0.6843
Klima, Neigung Exposition (Modell 2)	Fichte	$-3.04 + 0.093 \times T_{veg} + 0.0013 \times NS_{5-10} + 817 \times NS_{5-10}^{-1} + 0.00016 \times T_{veg} \times Exp - 0.00052 \times T_{veg} \times Neig - 0.0000037 \times NS_{5-10} \times Exp + 0.000091 \times Exp \times Neig$	0.7563

gung) bis 2 mm d⁻¹ (ausgedehnte Trockenperioden). Die Verteilungen von Buche und Fichte unterscheiden sich. Bei der unterstellten unterschiedlichen Durchwurzelungstiefe sind die Indexwerte über 0,4 mm d⁻¹ bei der Fichte häufiger vertreten. Bei dieser Baumart tritt bei sonst gleichen Bedingungen demnach häufiger Wassermangel auf. Die dargestellte Verteilung von T_{diff} spiegelt einen großen Teil der Vielfalt der in Bayern herrschenden Kombinationen von Klimaverhältnissen, Geländelage und Boden wider.

weichungen für T_{diff} können in Einzelfällen über 0,5 mm d⁻¹ gehen, in der Mehrzahl der Fälle aus den Modellforstämtern liegen die Modifikationen des klima- und lagebedingten Ausgangswerts jedoch unter 0,3 mm d⁻¹ (Abb. 8). Die in Abbildung 8 gezeigten Abweichungen sind auswahlbedingt und beruhen auf den speziellen Bodenverhältnissen in den vier Modellforstämtern: Skelettreiche Standorte in Wolfratshausen (435) und Bodenmais (502) beispielsweise zeigen positive Abweichungen des Index, lehmige Substrate in Königshofen (608) und Kelheim (509) bedingen eine negative Modifikation des Index.

3.2 Regressionsmodelle

Die aus dem Datenmaterial abgeleiteten Regressionsmodelle weisen hohe Bestimmtheitsmaße auf. Bereits mit dem einfachsten Modell 1 (nur Klimagrößen) gibt es für Buche 57 % und für Fichte 65 % Varianzerklärung erklärt werden (Tab. 2, Abb. 3). Werden die Lageparameter Exposition und Neigung hinzugenommen, steigt das Bestimmtheitsmaß auf 68–75 % (Modell 2, Tab. 3). Durch Verwendung der Bodengrößen im Modell 3 (Tab. 4) kann eine weitere, aber nur relativ geringe Steigerung des Bestimmtheitsmaßes erreicht werden.

3.3 Regionalisierung

Abbildung 4 stellt die sich allein aus der geografischen Verteilung von Temperatur und Niederschlag in Bayern ergebenden Schätzwerte für den Index T_{diff} dar. Diese Karte zeigt eine deutliche und plausible Differenzierung in trockene Tieflagen und kühlfeuchte Gebirgslagen. Mit Hilfe der aus dem Datenmaterial selbst abgeleiteten Indexgröße ist somit eine vergleichbare ökophysiologische Charakterisierung des Klimas der einzelnen forstlichen Wuchsräume möglich.

Eine weitere Präzisierung und Differenzierung ergibt sich aus der Anwendung des Modells 2 (Klimagrößen und geomorphologische Größen, Abb. 5). Der Einfluss von Exposition und Hangneigung macht sich in höheren Werten des Index auf Südhängen (trocknere Verhältnisse) und entsprechend reduzierten Werten auf den Schatthängen (feuchtere Verhältnisse) bemerkbar. Die geländebedingte Modifikation des Indexwertes übersteigt jedoch selbst in Einzelfällen nie die Größenordnung von 0,15 mm d⁻¹ (Abb. 6).

Werden die Bodenverhältnisse als aus den Substratangaben geschätzte Speicherkapazitäten und Durchlässigkeiten in die Schätzgleichungen integriert, dann zeigt sich auf lokaler Ebene eine weitere Differenzierung (Abb. 7). Die bodenbedingten Ab-

Der Indexwert T_{diff} wird somit in Modell 3 stets durch eine Klimakomponente, eine Lagekomponente und eine Bodenkompone geschätzt, wobei den einzelnen Komponenten im Einzelfall unterschiedliche Bedeutung zukommt.

4 Diskussion

4.1 Indexgröße T_{diff}

Mit der Ableitung und Verwendung des ökophysiologisch relevanten Index T_{diff} wird die Betrachtung des Wasserhaushalts der Waldstandorte objektiviert und damit überregional vergleichbar gemacht. Ein weiterer Fortschritt ergibt sich durch die Verwendung einer quantitativ fassbaren Größe gegenüber den herkömmlichen Klasseneinteilungen der ökologischen Feuchtestufen. Darüber hinaus sind mit dem Index T_{diff} feinere Abstufungen der Wasserhaushaltsansprache möglich. Für praktische Zwecke können aber jederzeit Klassen gebildet und, wie in den Abbildungen 4, 5 und 7 geschehen, für die kartografische Darstellung oder Auswertungen genutzt werden. Die Klassenbreite kann je nach Detaillierungsgrad von Fall zu Fall anders gewählt werden. Ebenso ist es möglich, die Klassen mit den in der Standortkunde üblichen verbalen Beschreibungen zu versehen, wenn dies für praktische Zwecke gewünscht wird. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Wechsel-feuchte könnte zusätzlich durch eine Kombination des Durchlässigkeitseiwerts K_{eff} und der Geländemorphologie (ebene oder konkave Geländeformen) geschätzt werden.

Die ausgegebene Schätzgröße T_{diff} ist in jedem Fall mit einem Fehler behaftet, der sich aus dem Fehler des deterministischen Modells und dem Fehler des Regressionsmodells zusammensetzt. Weitere Verzerrungen kommen durch ungenaue Modell-eingangdaten und durch die nicht eindeutige Zuordnung bodenphysikalischer Größen zu kartierten Standortseinheiten zustande. Erst nach erfolgter Validierung der Ergebnisse kann ein Fehlerrahmen der Schätzung von T_{diff} angegeben werden.

4.2 Datenqualität

Die Zuverlässigkeit der Regionalisierung hängt wesentlich von der Qualität der Eingangsdaten ab. Die Klimadaten aus dem Klimaatlas für Bayern (BayForKlim 1996) liegen im verhältnismäßig groben Raster von 400 x 400 m vor. Eine verbesserte Modellierung des Lokalklimas, wie sie Mues et al. (1999) für Niedersachsen durchgeführt haben, könnte hier zu einer Verbesserung der Datenqualität führen. Weitere Steigerungen der Präzision ließen sich mit einem höher aufgelösten Digitalen Geländemodell (DGM) erzielen. Die Schätzung der Bodenparameter Potenzielle Nutzbare Wasserkapazität (NWS_{pot}) und Durchlässigkeitseiwert (K_{eff}) aus den Substratangaben der Standortserkundung sollte verfeinert und durch Geländebe-funde abgesichert werden.

4.3 Durchwurzelungstiefe

Eine Unschärfe, die aber erhebliche Auswirkungen auf die Zielgröße T_{diff} hat, besteht in der Festlegung der für die Was-

serversorgung von Bäumen relevanten Durchwurzelungstiefe (vgl. Raissi et al. 2001). An zwei Beispielen wurden deshalb Wasserhaushaltsberechnungen mit abgestuften Durchwurzelungstiefen durchgeführt. Die langjährige Variation des Wasserangebots bei unterschiedlicher Durchwurzelungstiefe wurde anschließend mit auf diesen Standorten erhobenen Jahrringdaten der Fichte unter Verwendung eines nichtlinearen Wachstumsmodells verglichen (Elling et al. 2001). Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass mit dem Einbeziehen sehr schwach und schwach durchwurzelter Bodenbereiche (1-2 bzw. 3-5 Feinwurzeln pro dm^2) möglicherweise der für die Wasserversorgung effektive Bodenraum überschätzt wird. Die gleichmäßig unterstellten Durchwurzelungstiefen von 80 cm (Buche) und 50 cm (Fichte) dürften für viele Standorte dem Hauptwurzelraum entsprechen.

4.4 Wasserhaushaltsmodelle

Die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung werden nicht nur von den Eingangsdaten, sondern auch von den verwendeten Modellen selbst beeinflusst. Aus Modellvergleichen sind die zum Teil deutlichen Differenzen bekannt, die sich zwangsläufig aus den unterschiedlichen Modellkonzepten und verschiedenen Modellparametern ergeben (vgl. Kremb et al. 2000, Level II Ad hoc AG Wasserhaushalt 2003, Rötzer 2004). Das Modell BROOK 90 ist jedoch mittlerweile gut an mitteleuropäische Verhältnisse angepasst und liefert plausible Ergebnisse (vgl. Kennel 1998, Hammel u. Kennel 2001, Jandl u. Zotrin 2000). Es wird routinemäßig im Wasserhaushaltsmoni-

Tab. 4. Ergebnisse der Regression mit den Klimagrößen, der Exposition und Hangneigung und den Bodengrößen. Modell 3. Parameter estimates of regression (climate parameters, terrain parameters, and soil parameters, model 3).

Regression	BA	Regressionsgleichung : $T_{diff} =$	R ²
Klima, Neigung Exposition Boden (Modell 3)	Buche	$-2.16 + 0.053 \times T_{veg} + 0.00096 \times NS_{5-10} + 598 \times NS_{5-10}^{-1} + 0.00013 \times T_{veg} \times Exp - 0.00023 \times T_{veg} \times Neig - 0.0000030 \times NS_{5-10} \times Exp + 0.000074 \times Exp \times Neig + 0.000093 \times NS_{5-10} \times K_{eff} + 0.000023 \times T_{veg} \times nWS_{pot} + 5.60 \times nWS_{pot}^{-1} - 0.000012 \times Neig \times nWS_{pot}$	0.7035
Klima, Neigung Exposition Boden (Modell 3)	Fichte	$-2.86 + 0.10 \times T_{veg} + 0.0012 \times NS_{5-10} + 765 \times NS_{5-10}^{-1} + 0.00016 \times T_{veg} \times Exp - 0.00063 \times T_{veg} \times Neig - 0.0000037 \times NS_{5-10} \times Exp + 0.000091 \times Exp \times Neig + 0.00016 \times NS_{5-10} \times K_{eff} - 0.00012 \times T_{veg} \times nWS_{pot} - 1.42 \times nWS_{pot}^{-1} + 0.000015 \times Neig \times nWS_{pot}$	0.7736

toring an den Bayerischen Waldklimastationen angewendet und dort den gemessenen Bodenfeuchten gegenüber gestellt (Schultze et al. 2004). Wenn auch an der absoluten Präzision der Wasserhaushaltsmodelle Zweifel bestehen, so ist ihre Eignung, den Wasserhaushalt verschiedener Standorte in der Relation zueinander zu beschreiben, ungleich höher.

4.5 Regressionsmodelle

Durch die hohe Zahl von knapp 8000 Simulationsläufen mit einer Vielzahl von Kombinationen der Eingangsgrößen sind die erhaltenen Regressionsmodelle gut abgesichert. Hohe Bestimmtheitsmaße dokumentieren die gute Anpassung der Modelle an den Datensatz. Die Gleichungen gelten für die be-

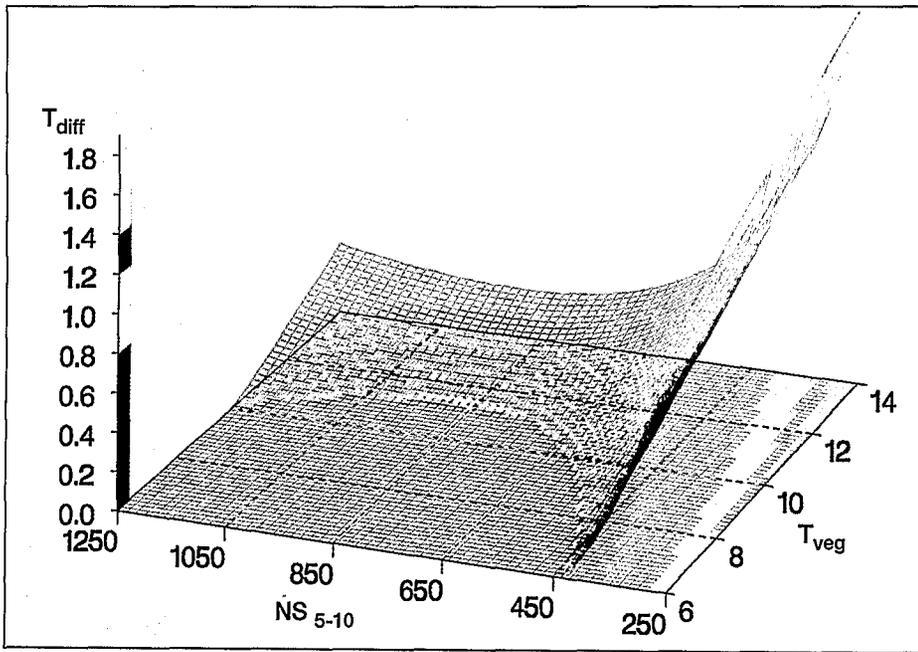


Abb. 3. Ableitung des Index T_{diff} aus Temperatur in der Vegetationsperiode T_{veg} und dem Niederschlag in der Vegetationsperiode NS_{5-10} (Modell 1, Fichte).
Regression of T_{diff} on mean temperature T_{veg} and sum of precipitation in vegetation period NS_{5-10} as independent parameters (Model 1, spruce).

trachtete Region Bayern und das klimatische Mittel von 1961 bis 1990. Für benachbarte Regionen oder andere, in der Zukunft liegende Klimaperioden müssten neue Simulationen gerechnet, daraus neue Regressionsmodelle abgeleitet und auf aktualisierte Flächendaten angewandt werden. Verbesserungen der Vorhersagequalität werden sich durch die Verwendung eines höher aufgelösten DGM ergeben. Auch ist die Zuordnung von bodenphysikalischen Daten zu den Standortseinheiten verbesserungsfähig und durch Analysedaten von Leitprofilen abzusichern.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

5.1 Validierung

Wasserhaushaltsmodelle, Regressionsrechnung und GIS-Anwendung sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt

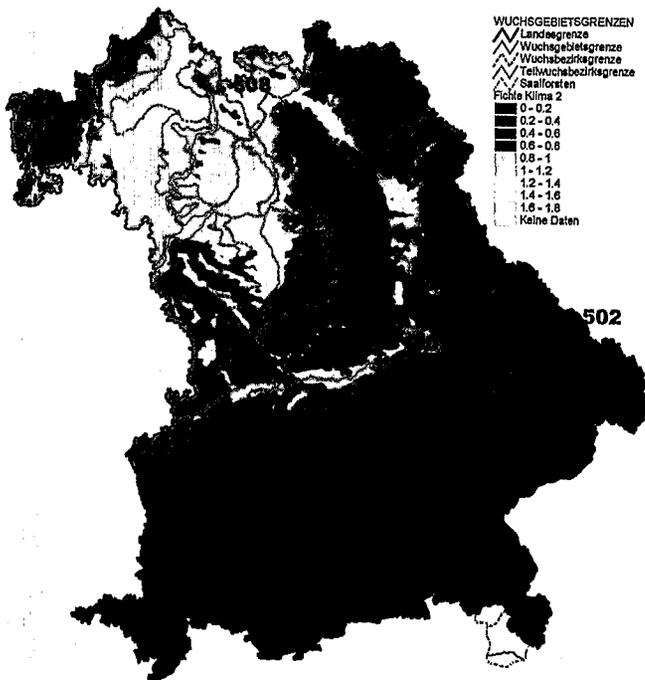


Abb. 4. Geografische Verteilung der allein aus Klimagrößen (Modell 1) geschätzten Werte für den Index T_{diff} in Bayern. Die Lage der vier Modellforstämter (508 Bad Königshofen, 435 Wolfratshausen, 502 Bodenmais, 509 Kelheim) ist blau markiert.
Spatial distribution of estimated values of T_{diff} using climate parameters only. Model areas are indicated with blue color (Model 1).

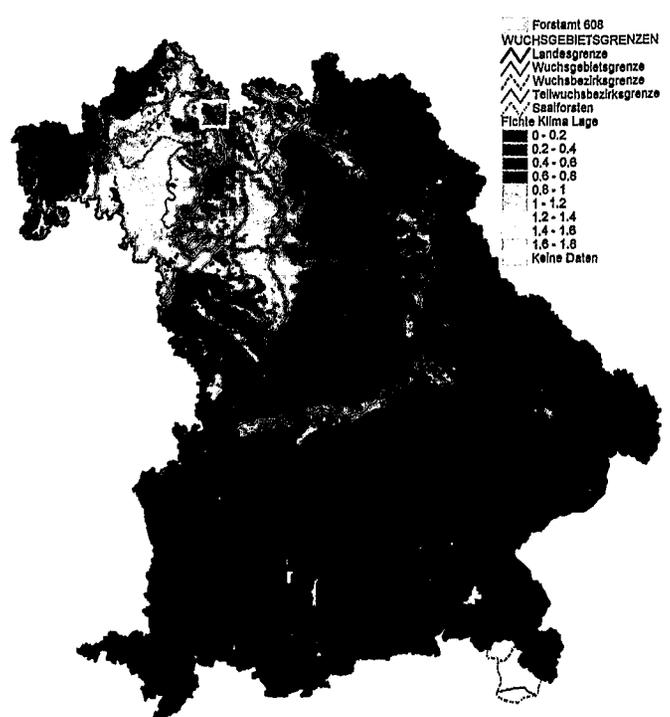


Abb. 5. Geografische Verteilung der aus Klimagrößen und Lagegrößen (Modell 2) geschätzten Werte für den Index T_{diff} in Bayern.
Spatial distribution of estimated values of on T_{diff} using climate parameters and terrain parameters only (Bavaria, Model 2).

Abb. 6 (rechts). Modifikation des Index T_{diff} durch Neigung und Exposition (Geländelage) in Abhängigkeit von den nur aus dem Klima geschätzten Werten (gesamte Landesfläche).

Modification of T_{diff} (estimated only with climate parameters) using additional terrain parameters (Bavaria).

Abb. 7 (rechts Mitte). Geografische Verteilung der aus Klimagrößen, Lagegrößen und Bodengrößen (Modell 3) geschätzten Werte für den Index T_{diff} im Staatswald des Bayerischen Forstamts Bad Königshofen (608).

Spatial distribution of estimated values of an T_{diff} using climate parameters, terrain parameters and soil parameters (Model 3, model area 608).

allgemein verfügbare Hilfsmittel. Die vorhandenen Datengrundlagen reichen aus, die Wendung von den eher geschätzten ökologischen Feuchtestufen hin zu berechneten quantitativen Indexgrößen wie der Transpirationdifferenz T_{diff} zu vollziehen. Bevor jedoch die Regionalisierungsmodelle auf die gesamte Landesfläche angewendet werden, sollten die erhaltenen Schätzgrößen unbedingt mit Größen des Baumwachstums validiert werden. Nur so kann die ökophysiologische Relevanz des Index T_{diff} abschließend beurteilt und das gesamte Verfahren abgesichert werden. Hierzu bieten sich drei Verfahren an:

- Überprüfung mit Wachstumsdaten aus Waldinventuren (Betriebsinventur bzw. Bundeswaldinventur)
- Überprüfung mit Hilfe von Jahrringanalysen
- Überprüfung mit Waldzustandsdaten (Dürre, Schädlingsbefall).

Bei derartigen Validierungen muss man sich allerdings bewusst sein, dass die Ursache-Wirkungsbeziehung Wasserhaushalt-Baumwachstum und Wasserhaushalt-Waldzustand durch eine Vielzahl weiterer Größen beeinflusst ist. Diesem Umstand ist durch Stratifizierung der Daten und durch Einbeziehung kovariater Größen Rechnung zu tragen.

5.2 Klimaszenarien

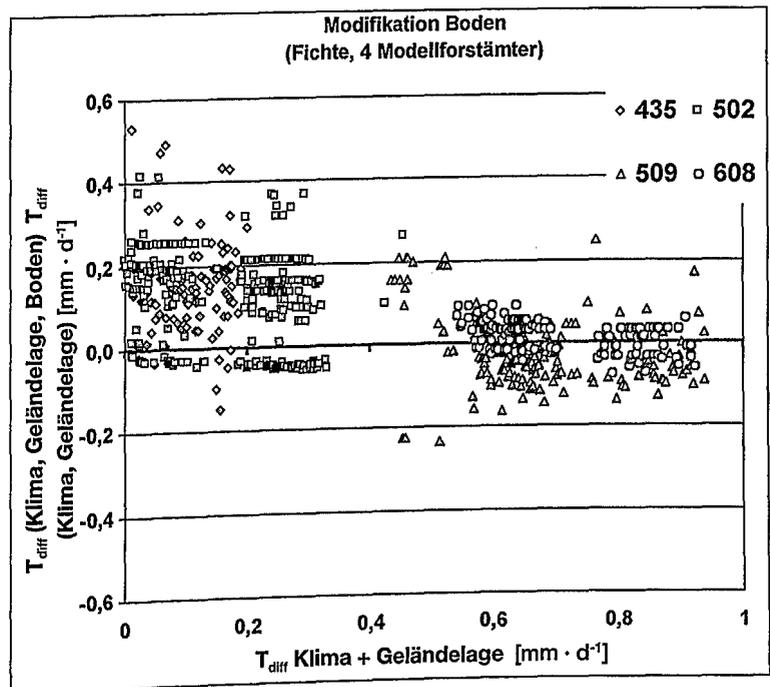
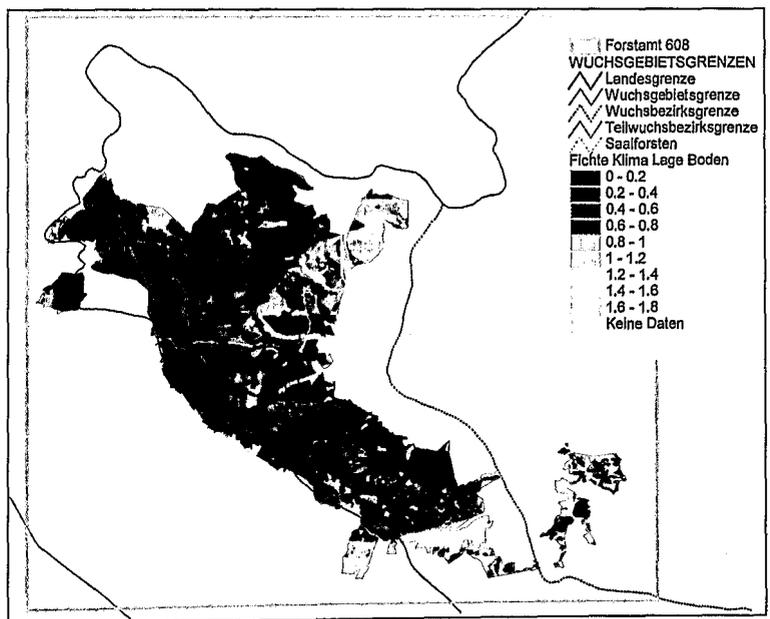
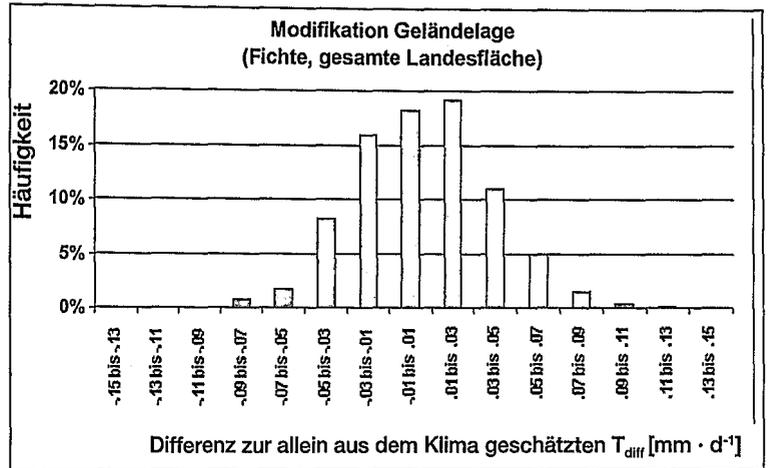
Mit relativ geringem Aufwand lassen sich mit dem geschilderten Verfahren auch die Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt der Waldbestände anschätzen. Hierzu wären in hoher zeitlicher Auflösung vorliegende modellierte Klimadaten zu verwenden und entsprechend zu regionalisieren.

5.3 Bedeutung der einzelnen Komponenten des Wasserhaushalts

Aus den Modellergebnissen lässt sich der Beitrag der einzelnen Wasserhaushaltskomponenten (Niederschlag, Verdunstung und Bodenspeicherung) zum Gesamthaushalt abschätzen. Die Klimagrößen, unter ihnen vor allem der Niederschlag, dominieren fast immer die Größenordnung der Zielgröße T_{diff} .

Abb. 8 (rechts). Modifikation des Index T_{diff} durch Bodengrößen in Abhängigkeit von den nur aus Klima und Geländelage geschätzten Werten für die vier Modellforstämter Wolfraatshausen (435), Bodenmais (502), Kelheim (509) und Bad Königshofen (608).

Modification of T_{diff} (estimated with climate and terrain parameters only) using additional soil parameters (Model areas).



Der Einfluss der Bodenspeicherung ist je nach Variabilität der Größen Speicherkapazität und Durchlässigkeit unterschiedlich. Der Beitrag der Geländeparameter Hangneigung und -exposition ist zumeist geringer. Diese wirken lediglich über die Strahlung auf das Modellergebnis.

Damit wird die schon bekannte große Abhängigkeit der forstlichen Produktion vom Standortfaktor Klima ersichtlich. Mit dem vorhergesagten Klimawandel werden viele Waldstandorte daher zwangsläufig von empfindlichen Veränderungen der Standortqualität betroffen werden. Umso wichtiger werden in diesem Zusammenhang die korrekte Erfassung und Prognose des Standortwasserhaushalts.

5.4 Digitale Standortskarten der Zukunft

Die Bemühungen, den Wasserhaushalt von Waldstandorten objektiver und mehr quantitativ zu beschreiben, laufen zusammen mit Bestrebungen, die Standortserkundung zu einem modernen digitalen Flächeninformationssystem weiterzuentwickeln (vgl. Schulz u. Asche 2000, Jansen et al. 2002). Durch GIS-Modellierung von Standortdaten können nicht nur die Qualität und die Nutzbarkeit der Standortskarten gesteigert werden, es eröffnet sich auch die Möglichkeit, den Begangsaufwand bei Neukartierungen oder Bearbeitungen kostensparend zu reduzieren.

5.5 Grenzen und Möglichkeiten

Das Verfahren eröffnet der forstlichen Standortkunde neue Möglichkeiten. Es soll jedoch nicht verschwiegen werden, dass die Grenze zur Praxisreife noch nicht überschritten ist. Vielmehr müssen wesentliche Validierungsschritte unternommen werden. Insbesondere ist der Einfluss der Indexgröße T_{diff} auf Bestandeswachstumsgrößen an einem großen Datenkollektiv zu überprüfen. Weiterhin sollte der Zusammenhang der Indexgröße zu Waldgefährdungen (Trockenheit, Schädlingsbefall) überprüft werden. Nur so kann der Anspruch der forstlichen Standortkunde, die waldbaulichen Möglichkeiten, die Ertragsfähigkeit und die Gefährdung der Waldstandorte adäquat zu beschreiben (Arbeitskreis Standortkartierung 2003, S. 15-16), eingelöst werden.

Danksagung

Wir danken der Bayerischen Staatsforstverwaltung für die Finanzierung des Vorhabens im Rahmen der Vorhaben ST 102 und ST 156. Den Herren R. Schulz und C. Döring von der Georg-August-Universität Göttingen sowie zwei unbekanntem Gutachtern danken wir für gute Hinweise zum Manuskript.

Literatur

Arbeitskreis Standortkartierung 2003. Forstliche Standortaufnahme. 6. Aufl. IHW-Verlag Eching

BayForKlim 1996. Klimaatlas von Bayern. Bayerischer Klimaforstungsverbund, Meteorologisches Institut Univ. München

Beese, F., van der Ploeg, R.R., Richter W. 1977. Test of a soil water model under field conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, 979-984

Benecke, P. 1984. Der Wasserumsatz eines Buchen- und eines Fichtenwaldökosystems im Hochsolling. *Schr. Forstl. Fakultät Univ. Göttingen u. Nieders. Forstl. Versuchsanstalt 77*

Dittmar, C., Kölling, C. 2002. Verbesserte Wasserhaushaltsansprache von Waldstandorten an ausgewählten Beispielen der Bodenprofildatenbank der LWF. Schlussbericht zum Projekt ST 102. Bayer. Landesanstalt f. Wald u. Forstwirtschaft Freising

Durner, W. 1994. SHYFFIT Users Manual. Research Report 94.1, University of Bayreuth, Dept. of Hydrology, D-95540 Bayreuth, Germany

Federer, C.A. 1995. BROOK90: A simulation model for evaporation, soil water and streamflow, Version 3.1 Computer freeware and documentation. USDA Forest Service, PO Box 640, Durham NH, USA

Elling, W., Häckel, H., Ohmayer, G. 1990. Schätzung der aktuell nutzbaren Wasserspeicherung des Wurzelraums von Waldbeständen

mit Hilfe eines Simulationsmodells. *Forstwiss. Centralbl.* 109, 210-219

Elling, W., Dittmar, C., Meschederu, M., Pfaffelmooser, K., Pretsch, H., Rötzer, T., Utschig, H. 2001. Prüfung statistischer Zusammenhänge zwischen Zuwachsgang/Schädigungsmerkmalen der Fichte und Witterungseinflüssen sowie der Belastung durch schwefelhaltige Immissionen und der Bezug zu Standortfaktoren innerhalb von Bayern. Schlussbericht zum Projekt W32

Hammel, K., Kennel, M. 2001. Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushaltes von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90, Forstl. Forschungsber. München 185

Jandl, R., Zotrin, R. 2000. Wasserhaushalt und Stoffbilanz von Wäldern. *Forstzeitung (Wien)* 7, 8-9

Jansen, M., Judas, M., Saborowski, J. 2002. Spatial modelling in Forest Ecology and Management - A case study. Springer, Berlin

Kennel, M. 1998. Modellierung des Wasser- und Stoffhaushaltes von Waldökosystemen - Fallstudien: Forsthydrologisches Forschungsgebiet Krofdorf und Referenzzugsgebiet Große Ohe. Forstl. Forschungsber. München 168

Kölling, C. 2005. Waldbau im Klimawandel. Mit Mischwald nachhaltig die Zukunft gestalten. *Festschrift 20 Jahre VfS. Verein für Standortserkundung e.V. (Hrsg.)*, München, 20-23

Krauss, G.A. 1936. Aufgaben der Standortkunde. *Jahresber. Deutscher Forstverein*, Berlin

Kreml, S., Rötzer, T., Schaupp, H. 2000. Berechnung des Sickerwasseranfalls nach verschiedenen Wasserhaushaltsmodellen. *Boden u. Wasser* 52, 26-30

Laatsch, W. 1969a. Das Abschätzen der Wasserversorgung von Waldbeständen auf durchlässigen Standorten ohne Grund- und Hangzugwasser. I. Teil. Leicht durchlässige Standorte. *Forstwiss. Cbl.* 88, 257-271

Laatsch, W. 1969b. Das Abschätzen der Wasserversorgung von Waldbeständen auf durchlässigen Standorten ohne Grund- und Hangzugwasser II. Teil. Böden mit vorübergehender Staufläche (Parabraunerden). *Forstwiss. Cbl.* 88, 351-358

Level II Ad hoc AG Wasserhaushalt 2003. Wasserhaushalt von Waldökosystemen: Methodenleitfaden zur Bestimmung der Wasserhaushaltskomponenten auf Level II-Flächen. Bundesmin. Verbraucherschutz, Ernährung u. Landwirtschaft, Berlin

Mues, V., Jansen, M., Saborowski, J., Schulz, R. 1999. Regionalisierung von Klimatelementen für niedersächsische Waldstandorte mit statistischen und geostatistischen Methoden. *Ber. Freiburger Forstl. Forschung* 7, 33-38

Raissi, F., Müller, U., Meesenburg, H. 2001. Ermittlung der effektiven Durchwurzelungstiefe von Forststandorten. *GeoFakten* 9, 1-8

Renger, M., Riek, W., Wessolek, G. 1995. Beziehung zwischen Bodenwasserhaushalt, Evapotranspiration und Pflanzenwachstum. *Schriftenr. Vegetationskunde* 27, 307-316

Rötzer, T. 2000. Bestimmung von Transferfunktionen zur Berechnung der Witterung von Waldstandorten. *Projektber. FH Weihenstephan, FB Wald u. Forstwirtschaft*

Rötzer, T. 2004. Kausalanalytische Beziehungen zwischen Vitalität und Wachstum bei den wesentlichen Wirtschaftsbaumarten auf ausgewählten Level I und Level II Beobachtungsflächen. *Abschlussber. Projekt 00HS041 des Bundesmin. Verbraucherschutz, Ernährung u. Landwirtschaft, Berlin*

Rötzer, T., Dittmar, C., Elling, W. 2004. A model for site specific estimation of the actual soil water content and the evapotranspiration in forest ecosystems. *J. Environmental Hydrology* 12, 1-14

Schultze, B., Dietrich, H.-P., Grimmeisen, W., Raspe, S. 2004. Examination and advancement of soil water balance parameters by soil water content measurements in the drought 2003. *Ber. Freiburger Forstl. Forschung* 57, 46

Schulz, R., Asche, N. 2000. Forstliche Standortserkundung in NRW. *LOBF-Mitt.* 1, 47-56

Shuttleworth, W.J., Wallace, J.S. 1985. Evaporation from sparse crops - an energy combination theory. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 111, 839-855

Tepe, R., Dilling, H., Beese, F. 2003. Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166, 111-119

Wegehenkel, M. 2000. Development and test of a modelling system for simulation water balances and plant growth using different complex approaches. *Ecol. Modelling* 129, 39-64

Weiger, H. 1971. Das Abschätzen der Wasserversorgung von Waldbeständen auf Pseudogleyen. *Forstwiss. Cbl.* 90, 375-390