

Erfassung und Bewertung des Wasserhaushalts von Waldstandorten in der forstlichen Standortskartierung: Gegenwärtiger Stand und künftige Anforderungen

Measurement and assessment of water dynamics of forest sites within the framework of forest site mapping: current conditions and future requirements

Jürgen Gauer, Karl-Heinz Feger & Kai Schwärzel

Abstract

Measuring and assessing water dynamics is crucial for site-adapted and sustainable management as well as for the multifunctionality of forests. This paper outlines the importance of a differentiated analysis of water conditions within the framework of applied forest site mapping in Germany. The differences and similarities that have evolved over time in the methodological approaches taken by the individual federal states are also presented. The limitations of current practices for the assessment of water dynamics are discussed in the context of future requirements related both to modifications in forest management and to the already-perceptible effects of climate change. Manifold challenges will result, related in particular to model-based enhanced quantification of the water regime and the integration of dynamic properties of climate, soils, and stands, as well as the regionalization and upscaling to the catchment level.

Keywords: *water regime, forest sites, forest site mapping, determination procedures, climate change, model-based quantification*

Zusammenfassung

Die Erfassung und Bewertung des Wasserhaushalts ist von zentraler Bedeutung für die standortgerechte und nachhaltige Bewirtschaftung sowie Multifunktionalität von Wäldern. Im vorliegenden Artikel wird die Bedeutung einer differenzierten Wasserhaushaltsansprache in der Praxis der forstlichen Standortskartierung Deutschlands dargestellt sowie historisch gewachsene Unterschiede und Gemeinsamkeiten in den Verfahren der einzelnen Bundesländer erörtert. Im Zusammenhang mit den künftigen Anforderungen, die sich aus einer veränderten Bewirtschaftung aber gerade auch aus dem bereits erkennbaren Klimawandel ergeben, werden zudem Grenzen der gegenwärtig praktizierten Wasserhaushaltsansprache diskutiert. Daraus ergeben sich perspektivisch vielfältige Herausforderungen. Diese liegen vorrangig in der modellgestützten stärkeren Quantifizierung des Wasserhaushaltes, der Integration dynamischer Klima-, Boden und Bestandseigenschaften sowie in der Übertragung vom Punkt auf die Fläche und die Einzugsgebietsebene.

Schlüsselwörter: Wasserhaushalt, Waldstandorte, forstliche

Standortskartierung, Ansprache-Verfahren, Klimawandel, modellgestützte Quantifizierung

1 Bedeutung der Wasserhaushaltsansprache in der forstlichen Standortskartierung

Wachstum und Stabilität von Wäldern werden wesentlich durch die abiotischen Faktoren Licht, Wärme, Nährstoffe und Wasser bestimmt. Die forstliche Standortskartierung erfasst und klassifiziert deshalb die (Wechsel-)Wirkung und Intensität dieser Faktoren, um darauf aufbauend die Standortsgegebenheiten mit den Standortsansprüchen von Waldbäumen und Waldgesellschaften vergleichen zu können. Damit schafft sie Grundlagen für die standortgerechte Waldbewirtschaftung. Als typisch nutzungsorientiertes Bewertungsverfahren wendet die Standortskartierung dazu iterative, je nach Stand des Wissens und des verwendeten Verfahrens effektive oder kausale Methoden an (Tabelle 1).

Bereits sehr früh sah G.A. Krauss, der „Pionier“ der forstlichen Standortskartierung, im Wasser den zumeist wichtigsten Wachstumsfaktor (KRAUSS 1936, KRAUSS & SCHLENKER 1954). Denn die Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche, Traubeneiche, Douglasie und Europäische Lärche, aber auch Pioniere wie die Birke, reagieren in einem sehr weiten Nährstoffrahmen eher bodenvag, zeigen aber deutliche Wachstumsunterschiede in Reaktion auf den Wasserhaushalt (BENINDE et al. 1960, MITSCHERLICH 1971, BORK et al. 1984, RAKEI et al. 1992, RIEK et al. 1994/1995, ELLENBERG 1963/1986/1996). Die beiden Fotos verdeutlichen diese Tatsache exemplarisch für Eichenbestände auf Schiefer-Standorten in Rheinland-Pfalz. Besonders die Oberhöhe gilt als guter Indikator für die Beziehung zwischen Wasserhaushalt und Baumwachstum.

Für die Standortsansprache des Wasserhaushaltes ist v. a. der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat, der sich aus dem jahreszeitlichen Verlauf der Bodenwassergehaltsänderungen ergibt, von Interesse. Der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat ist ein Indikator für die Wassermenge, die der aufstockenden Vegetation zur Aufnahme zur Verfügung steht. Als Faustformel

wird dieser Wassermenge häufig ein Wasserverbrauch von 3 mm/m²/Tag durch einen voll transpirierenden Baumbestand gegenüber gestellt.

Bäume reagieren in einem weiten Spektrum auf unterschiedliche Bodenwasservorräte. Die primäre Grundausrüstung mit mehr oder weniger xeromorphen anatomischen und morphologischen Strukturen dient einer passiven Anpassung an die jeweils typischen Standortverhältnisse, bei denen die Baumart konkurrenzfähig ist. Im Zuge der Austrocknung von Böden reagieren Bäume zunächst aktiv durch Reduktion der Transpiration über das Schließen der Stomata bis zu kutikulären Reaktionen (LYR et al. 1992). Bei darüber hinausgehender Trockenheit haben die Bäume dann noch eine mehr oder weniger ausgeprägte Toleranz, Trockenphasen zu erdulden, bevor es zu größeren letalen Absterbeprozessen kommt (vgl. WAGNER 1994).

Die Bestimmung und Klassifikation des Wasserhaushalts ist deshalb eine der zentralen Größe innerhalb der forstlichen Standortskartierungsverfahren. Übergeordnet werden grundsätzliche folgende Formen des Bodenwasserregimes im forstlichen Sinne unterschieden: Terrestrische Standorte (I) sind Standorte, bei denen der Bodenwasservorrat des Hauptwurzelraumes ausschließlich von Niederschlägen gespeist wird. Stauwasserböden (II) werden gesondert erfasst, weil Wasserstau im Oberboden (oberhalb 30/60 cm unter Geländeoberfläche) die Durchlüftung und damit das Wurzelwachstum einschränkt. Gleichzeitig ist damit auch eine Beeinflussung des Wärmehaushalts verbunden, da sich nasse Böden langsamer erwärmen. Dies macht sich besonders zu Beginn der Vegetationsperiode bemerkbar. Dauer und Höhe des Einstaues, sowie der Grad der Austrocknung während der Vegetationsperiode sind bei dieser Standortgruppe die Beurteilungskriterien. Außerdem können Stauwasserböden je nach Lage im Gelände durch Zwischenabfluss Zuschusswasser abgeben oder erhalten. Der Wasserhaushalt von Grundwasserstandorten (III) ist von der Tiefenlage und der jahreszeitlichen Dynamik eines Grundwasserleiters (Aquifer) abhängig. Die Erreichbarkeit des Grundwasserspiegels durch die Wurzeln oder der kapillare Wasseraufstieg aus dem Grundwasser in den Wurzelraum ermöglicht eine zusätzliche Wasserversorgung der Bestände. Unter mitteleuropäischen Bedingungen wurde bei Baumarten eine abnehmende Wirkung des Grundwassers bis zu einer Tiefe von maximal 3 m unter der Geländeoberfläche beobachtet. In Auenböden im noch rezenten Überflutungsbereich der großen Ströme bestimmt die Höhe und Länge sowie die Auftretenshäufigkeit von Hochwässern die Baumarteneignung (MICHIELS & ALDINGER 2002, DIESTER 1983, KRAUSE 1982).

2 Geschichtliche Entwicklung der Wasserhaushaltsansprache in der Standortskartierung

Krauss und Mitarbeiter (vgl. Übersichtsartikel von KRAUSS & SCHLENKER 1954) ordneten die bis dahin bereits verwendeten Begriffe (dürr, trocken, frisch, feucht, nass) als iterative Definitionen für ein charakteristisches Bodenwasserklima, das neben Wasser auch den Luft- und Wärmehaushalt berücksichtigte. Diese bodenklimatische Kennzeichnung war zwar nicht streng vergleichbar über ganz Deutschland anwendbar, lieferte aber zumindest für größere Wuchsregionen (z. B. in Südwestdeutschland) vergleichbare Beschreibungen. Nachdem sich diese Definitionen allgemein durchgesetzt hatten, wurden sie als qualitative Definitionen des Wasserhaushalts 1966 in die „Forstliche Standortsaufnahme“ aufgenommen. Unterschieden werden – mit Übergangsformen und weiteren Differenzierungen – trockene bis frische Standorte mit terrestrischem Wasserregime, wechselfeuchte bis wechselfeuchte Standorte unter Stauwassereinfluss und feuchte und nasse Standorte mit langfristig hoch anstehendem Grund- oder Stauwasser. Die Bezeichnungen wurden dann auch zur Gliederung der Wasserhaushaltsstufen ökologischer Artengruppen verwendet, die damit zu Indikatoren für die Wasserhaushaltsansprache wurden (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003).

Die Beobachtung von großen Wuchsunterschieden auf lokaler Ebene in Abhängigkeit von der Lage der Standorte im Relief und deren Exposition hat dazu geführt, dass in den Kartiereinheiten häufig eine einfache Geländeklimaklassifikation in Form von Grundformen oder Standortgruppen (Winter- und Sonnhänge etc.) der weiteren Standortgliederung des Wasserhaushalts vorgeschaltet wird.

3 Verfahren der Wasserhaushaltsansprache in den Systemen der einzelnen Bundesländer

Die Durchführung oder Koordination der forstlichen Standortskartierung obliegt den Landesforstverwaltungen. Aufgrund dessen haben sich aus den Anfängen der Standortskartierung in den 1930er Jahren bis in die 1960er Jahre deutschlandweit – je nach forstlicher Tradition – verschiedene Kartierverfahren und -einheiten entwickelt (Zusammenstellung in Tabelle 1). Diese unterscheiden sich deutlich, selbst wenn zum Teil die gleiche Terminologie verwendet wird. Übergeordnet spielt die grundlegende „Philosophie“ der Kartierverfahren eine differenzierende Rolle. Generell wird zwischen zweistufigen und einstufigen Kartierverfahren unterschieden (vgl. AK STANDORTSKARTIERUNG 2003).

Die zweistufigen Verfahren regionalisieren den klimatisch bedingten Wassereintrag und das Wärmeklima auf der Ebene

Tab. 1: Die unterschiedliche Ansprache des Wasserhaushalts in den Verfahren der deutschen Bundesländer (nach AK STANDORTSKARTIERUNG 2003).

Tab. 1: The contrasting ways for determining the water regime using the site survey procedures of the different German federal states (according to AK STANDORTSKARTIERUNG 2003).

Bundesland	Arbeitsweise	Schwerpunkte unter den Standortmerkmalen	Charakterisierung von		Bezeichnung und Elemente der Standortstypen/-einheiten	Ergänzende Einheiten / Hilfseinheiten
			Wasserhaushalt	Nährstoffhaushalt		
(im zweistufigen Verfahren innerhalb des Wuchsbezirkes)						
Baden-Württemberg	regional (zweistufig: Regional- bzw. Zonal- und Standortswald)	Bodensubstrat und Vegetation	Geländewasserhaushaltsstufen nach G. A. Krauss (substratbezogen)	Humusform, Bodenvegetation (Oberboden); Öko-Serien (Ausgangsmaterial)	Standortseinheit (5 Elemente): Standortswald, Substrat; Trophie, Geländewasserhaushalt, Geländeform	Regionale ökologische Artengruppen, Bodenchemische Analysen von Leitprofilen, Einzelsignaturen, Kennzeichnung der Befahrunggefährdung
Bayern	regional (zweistufig)	Substrat, teils Vegetation	Geländewasserhaushaltsstufen nach G. A. Krauss (erweitert)	Substrattyp im ökologischen Sinn, Podsoligkeitsstufen, chemischer Bodenzustand	Standortseinheit (3 Elemente): Substratgruppe, Trophie (u. Besonderheiten), Wasserhaushaltsstufe	Höhenstufen u. Neigung, ökolog. Artengruppen, Standortsgesellschaften, Muttergestein
Hessen	überregional (einstufig)	Vegetation und Boden	9 Stufen nach landeseinheitlicher qualitativer Definition	3 Trophiestufen (und 2 Zwischenstufen)	Standortstyp (4 Elemente): Wuchszone (6 Zonen / 3 Gruppen), Klimafeuchte (7 Stufen / 2 Gruppen), Geländewasserhaushalt (9 Stufen), Trophie (3 Stufen), Benennung ggf. zusätzlich mit Geländewasserhaushalt, pot. nat. Waldgesellschaft u. Bodenform	Bodenform: Ausgangssubstrat, Bodentyp
Niedersachsen	regional (zweistufig)	Substrat und Vegetation (gleichranig im Bergland, Substrat vorrangig im Flachland)	14 Wasserhaushaltsstufen	6 Nährstoffhaushaltsstufen	Standortstyp (4 Elemente): Bodenfeuchtigkeit u. Geländeform (29 Eh.), Nährstoffversorgung (6 Stf.), geologisches Substrat + Lagerungsverhältnisse (Bodenart) (6/3 bis 6 Eh.)	Symbole für Varianten
Nordrhein-Westfalen	regional (zweistufig)	Boden und Vegetation	Wasserhaushaltsstufen	Öko-Serie (in Kombination mit Waldgesellschaft)	Standortstyp (3 Elemente): Waldgesellschaft, Geländewasserhaushalt, Öko-Serie	Höhenstufen, Standortorte, Geländeform (falls charakteristisch)
Rheinland-Pfalz	überregional (einstufig) und regional (zweistufig)	Klima, Boden, Potentielle Ertragsleistung der Baumarten	12 (Gesamt) wasserhaushaltsstufen, 5 Stau-/Grundwasserstufen	bodenchemisch analysierte und bewertete Substratreihen, (10 empirische Trophiestufen)	Standortstyp (3 Elemente): Wärmestufe (4, überregional), Wasserhaushaltsstufe (12, überregional), Substratreihe (regional) und gegebenenfalls Stau-/Grundwasserstufe (5, überregional)	Niederschlagsgruppen (5), Reliefgruppen (3), nWSK-Gruppen (9)

Saarland	regional (zweistufig)	Bodensubstrat und ökologische Artengruppen	Wasserhaushalts- stufen nach G. A. Krauss	Ökoserie, Nähr- stoffanalysen (C/N, C/P, C/K, C/ Ca, pH)	Standortstyp (3 Elemente): Standortsgesellschaft, Frühestufe (7), Öko-Serie (26)	Einzelsignaturen für Varianten und Gelän- debesonderheiten, regionale ökologische Artengruppen
Schleswig- Holstein	regional (zweistufig)	vorrangig geologisches Substrat	14 Wasserhaus- haltsstufen	6 Nährstoffhaus- haltsstufen	Standortstyp (4 Elemente): Wasserhaushalt, Nährstoff- versorgung, geologisches Substrat, Substratlagerung (Bodenarten)	ergänzende Symbole für Varianten des Standortstyps
Ost- deutsche Bundes- länder	überregional (einstufig) induktive Abgrenzung höherer Einheiten	Klima, Relief, Bden, Vegetation	9 reliefbedingte, 5 Stau -, 6 Grund- wasser(haushalts)- stufen	bodenchemisch analysierte Stamm-Eigen- schaften (Boden) und Zustands- Eigenschaften (Humusformen)	5 Stamm-Elemente: Makroklimaform, Relief- form, reliefbedingte Wasserhaushaltsstufe und Mesoklimaform, Grund- und/oder Stau- wasserstufe, Bodenform, 2 Zustands-Elemente: Zustands-Nährkraftstufe u. -Feuchtestufe erfasst in der Humusform über die aktu- elle Vegetationsform	Großklimabereiche, Höhen- und Feuchte- klima, Boden- und Humusformen, Vegetationsformen, Aggregation zu Mosa- iken, Wuchs-bezirk und Wuchsgebiet (Mikro-Mesochoren, Makrochoren)

der Wuchsbezirke und können sich deshalb bei der lokalen Standortsdifferenzierung auf eine qualitative Beschreibung im Sinne von Krauss beschränken, die dann aber genau genommen auch nur für den jeweiligen Wuchsbezirk gilt. Einstufige Verfahren wollen dagegen die Standortsfaktoren am Einzelstandort differenzieren und müssen deshalb stärker quantifizierende Klassifikationen verwenden. Gemeinsam ist allen Verfahren, dass nicht der konkrete Wasserhaushalt des aktuell vorhandenen Bestandes angesprochen wird, sondern der Wasserhaushalt eines der potentiell natürlichen Vegetation angenäherten Altbestandes oder eines Altbestandes einer Hauptbaumart (z. B. Fichte im Alter 100). Mit der Wahl spezifizierter Altbestände als Bezugsgröße wird die Standortsansprache vergleichbar und unabhängig vom zufälligen Entwicklungs- und Nutzungsstadium des jeweiligen Bestandes und den damit verbundenen Unterschieden bei Interzeption und Transpiration.

In den meisten Bundesländern werden inzwischen auch Kennwerte zur Quantifizierung des Bodenwasservorrates zumindest zur Orientierung bei der Ansprache des Standortswasserhaushaltes hinzugezogen. Dabei werden meist die in der Bodenkundlichen Kartieranleitung (3. bis 5. Auflage) abgelegten Tabellenwerte, die eine Schätzung des pflanzenverfügbaren Bodenwasser in Abhängigkeit von Textur, Trockenrohdichte und Humusgehalt ermöglichen, genutzt (AG BODEN 2005). Da die dortigen Tabellenwerte jedoch v. a. auf der Untersuchung landwirtschaftlich genutzter Standorte beruhen, die im Vergleich zu den Oberböden von Waldstandorten höhere Trockenrohdichten und geringere Humusgehalte aufweisen, ist die Verwendung dieser Kennwerte bei Ansprache

des Standortswasserhaushaltes von Wäldern mit beträchtlichen Unsicherheiten verbunden. Nur in einem geringen Umfang liegen für mitteleuropäische Waldstandorte Ergebnisse zur Schätzung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers vor (z. B. TEEPE et al. 2003, SCHINDLER et al. 2004, PUHLMANN & VON WILPERT 2011). Auch für die Bestimmung des effektiven Wurzelraums, als modellhaften Ausschöpfungsraum für das pflanzenverfügbare Bodenwasser, fehlen bisher spezielle Pedotransfer-Funktionen für Waldböden (vgl. RAISSI et al. 2001).

Im zweistufigen Südwestdeutschen Standortskundlichen Verfahren (z. B. Baden-Württemberg) erfolgt eine qualitative Bewertung des Wasserhaushaltes, die sich aus der Lage am Hang, Exposition, Bodenentwicklungstiefe, Humosität, Bodenvegetation und der Wuchshöhe der Bäume ergibt und immer auf die jeweilige Ökoserie bezogen wird. Die normale Ausprägung der Ökoserie in einem Wuchsbezirk wird i. d. R. als „mäßig frisch“ klassifiziert (vgl. SEEMANN 2007). Trockene oder frische Ausprägungen beziehen sich relativ auf diesem mittleren Wert. Im einstufigen Verfahren der Standortskartierung, wie es in den neuen Bundesländern angewendet wird, basiert die Charakterisierung des Wasserhaushalts terrestrischer Standorte im Hügel- und Bergland allein auf Reliefausbildung und Exposition (vgl. SCHWANECKE 1970, KOPP & SCHWANECKE 1994). Der Geländewasserhaushalt in den Verfahren in Hessen und Niedersachsen ergibt sich aus einer Zusammenschau der (passiven) nutzbaren Wasserspeicherkapazität und der Geländelage (Relief, Exposition) als Verdunstungsfaktor. Zur waldbaulichen Beurteilung der so eingeschätzten Wasserhaushaltsstufen wird dann z. B. die hygri-sche Kontinentalität

(Klimafeuchte) als aktive Komponente des Wasserhaushalts herangezogen (GAUER 2009).

Ein halbquantitatives Verfahren zur Abschätzung der Wasserversorgung von Waldbeständen, das in Ansätzen in Bayern verwendet wird, hat LAATSCH (1969a, b) vorgeschlagen: Beobachtet wird das monatliche Bodenwasser durch Addition der monatlichen klimatischen Wasserbilanz zum Bodenwassergehalt zu Beginn der Vegetationsperiode. Als Indikator für Trockenstress wird das Verschwinden von „leicht verfügbarem Bodenwasser“ (= pauschal 50 % des potenziell pflanzenverfügbaren Wassers) gewertet.

Die Ansprache des Gesamtwasserhaushalts in Rheinland-Pfalz entspricht einem Vorhersagemodell (vgl. BENECKE 1992). Dabei werden die „passiven Elemente“ des Wasserhaushalts (pflanzenverfügbares Bodenwasser, Relief- und Exposition) mit den „aktiven“ Komponenten (Niederschlag und Verdunstung) im Sinne einer klimatischen Wasserbilanz als Matrixtabelle kombiniert. Die klimatische Wasserbilanz wird durch Niederschlagsgruppen gegliedert, die – auf Landesebene – auch ein bestimmtes Wärmeklima beinhalten. Die Grundlage für das Verfahren bildeten Ertragsklassenuntersuchungen an Fichten und Buchen eines engen Alterskollektives in Beziehung zu pflanzenverfügbares Bodenwasser, Relief/Exposition und Niederschlag auf von der Nährstoffversorgung her vergleichbaren Standorten (WALLESCH 1959). Die primäre Skalierung der Gesamtwasserhaushaltsstufen wurde auf halbe Ertragsklassen der Fichte vorgenommen. Die Korrelation wurde von EDER (1980) im Bereich der Pfalz überarbeitet (vgl. GAUER 2009).

4 Komplexe heutige Anforderungen

Mit der Entwicklung vom reinen Forstbetrieb hin zu einer multifunktionalen Forstwirtschaft haben sich die Anforderungen an Standortskarten wesentlich erweitert. Zwar stehen die klassischen waldbaulichen Fragestellungen zur Baumarteneignung, Ertragsleistung, Standortgerechtigkeit, Konkurrenzverhalten und Verjüngungsfreudigkeit noch immer im Zentrum standortkundlicher Überlegungen. Daneben haben jedoch die Anzeichen einer Klimaveränderung, insbesondere die Zunahme klimatischer Extreme (Dürren, Hochwasser, Stürme), das Risikopotential von Standorten stark in den Fokus gerückt (z. B. WAGNER 2004, KÖLLING & ZIMMERMANN 2007, BOLTE & IBISCH 2007). Daneben sind auch für die adäquate Behandlung vieler Fragen im Zusammenhang mit den wasser- und bodengebundenen Ökosystemdienstleistungen des Waldes (Hochwasserretention, Filter- und Pufferleistung im Hinblick auf den Gewässerschutz) flächendifferenzierte Informationen zum Wasserhaushalt erforderlich (vgl. CALDER et al. 2007, PILAŠ et al. 2010). So verlangt die neue EU-Wasserrahmenrichtlinie den flächendeckenden Schutz von Grundwasser und Fließgewässern, was somit auch Waldflächen betrifft. Direkt mit forsthydrologischen Eigenschaften von prädisponierten Waldstandorten beschäftigt

sich die Bemühungen um einen Wasserrückhalt im Wald zur Minderung von Hochwasserspitzen. Dazu ist die Identifizierung von Standorten, die in Hochwasserlagen besonders rasch zum Oberflächenabfluss beitragen, notwendig (z. B. SCHÜLER 2006, WAHREN et al. 2007).

Bei der Waldbewirtschaftung ist die Bodenverdichtung bzw. der Grundbruch durch Befahrung und die bodenfeuchteabhängige Tragfähigkeit von Rückegassen im Rahmen der Holzernte zum Thema geworden. Gleichzeitig werden die Reviere größer, die Ortskenntnisse geringer. Thematisch erweiterte Standortskarten könnten hierbei zur Vermeidung von Schäden beitragen, nicht nur durch die Darstellung von Feucht- und Nassstandorten, sondern auch durch Ausweisung von Standorten, die jahreszeitlich bedingt, bei höheren Bodenfeuchten ihre Tragfähigkeit einbüßen.

Zur nachhaltigen Waldbewirtschaftung gehört die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und eines ökologisch günstigen bodenchemischen Milieus der Waldböden. Bedrohungen ergeben sich aus einer anthropogenen Versauerung, Stickstoffsättigung, Basenexporte durch verstärkten Biomasseentzug für die energetische Nutzung (vgl. FEGER 1997/98). Eine differenzierende Rolle im Bodenchemismus der Standorte spielt die Bodenwasserdynamik. Für differenzierte Betrachtungen, insbesondere Risikoabschätzungen, werden daher quantitative Angaben zu Sickerung und Abfluss benötigt.

Mit den NATURA-2000-Richtlinien der EU hat der Naturschutz auch in deutschen Wäldern einen neuen Stellenwert erhalten. Über größere Gebiete vergleichbare Standortdaten helfen bei der Identifizierung von Lebensraumtypen und Habitaten als Grundlage für das dazu notwendige Naturschutz-Management. Auch die Erkenntnisse aus der forsteigenen Naturwaldreservatsforschung können nur über quantifizierbare Standortdaten eine überregionale Bedeutung erlangen. Die Gradationen von Schadinsekten aber auch Schadereignisse wie Feuer sind häufig mit Störungen des Bodenwasserhaushalts verbunden. Wenn es gelingt, solche Situationen zeitnah zu simulieren, wird ein wichtiger Beitrag zur Vorbeugung geleistet.

Besonders der prognostizierte Klimawandel stellt neue Herausforderungen an die Standortskartierung. Bisher sind forstliche Standortskartierungen in der Regel einmalig erstellt worden, nur bei Kartenwerken, die noch aus den Anfängen der Standortskartierung stammen, sind Wiederholungskartierungen erfolgt. Die Standortfaktoren selbst werden bisher als mehr oder weniger konstant aufgefasst, wobei die zu Grunde liegenden Klimadaten häufig auf die Periode 1931–1960, teilweise auch auf die Periode 1891–1930 zurückgehen, je nachdem welche Klimaatlanten bei der Erstellung zur Verfügung standen. Die Anpassung der Waldbewirtschaftung an die prognostizierten Änderungen des Klimas erfordert dagegen dynamische Standortdaten, insbesondere zum Klima (z. B. HÄNTZSCHEL et al. 2006) und zu den Wasserhaushaltskomponenten (vgl.

KÖLLING & ZIMMERMANN 2007, BOLTE & IBISCH 2007). Beim Klima bedeutet das z. B. die Definition von Höhenstufen (= Wärmestufen) anhand von Temperaturgrenzwerten. Für die Bewertung des Wasserhaushalts sind kausale Beziehungen zwischen Bestandeswachstum, klimatischen Faktoren und Bodeneigenschaften abzuleiten. Voraussetzung dafür ist, die Bewertung des Standortwasserhaushalts an modellgestützte Berechnungen des Wasserumsatzes (vgl. SCHWÄRZEL et al. 2011). Bisher kennzeichnet die Standortkartierung mit ihren Wasserhaushaltsstufen den Standortwasserhaushalt für Bedingungen, welche die durchschnittlichen Wuchsbedingungen einer längeren, meist mehr als 30-jährigen Wuchsphase repräsentieren. Damit wird die mittlere Wuchsdynamik von Baumarten (oder einer Leitbaumart), die Konkurrenzstärke dieser Baumarten und deren Ertragspotential bezogen auf den Faktor Bodenwasser für durchschnittliche Witterungsbedingungen eingeschätzt. Bei dieser Vorgehensweise wird angenommen, dass das Baumartenspektrum des betrachteten Standorts in der Lage ist, Einschränkungen der Wasserversorgung auch im

Extrembereich der auftretenden Witterungsschwankungen zu ertragen. Als Folge des Klimawandels ist jedoch zu erwarten, dass die bekannten extremen Witterungssituationen häufiger auftreten und hinsichtlich Dauer und Intensität zunehmen. Daher stellt sich die Frage, ob diese Änderungen der Klimausprägung für einige Baumarten, die bisher zum Spektrum eines Standortes gehörten, eine letale Wirkung ausüben. Sind diese Baumarten dann auf bestimmten Standorten künftig auszuschließen?

Da die mittlere Temperatur sich bereits zwischen der Periode 1891–1930 und 1971–2000 im Mittel um knapp ein Grad erhöht hat (Beispiel Hohenpeißenberg, Bayern: Abb. 1) müssten solche Phänomene an den ökologischen Rändern der Baumartenvorkommen bereits sichtbar werden. Das Erkennen ist jedoch nicht trivial, da sich Wasserhaushaltsphänomene und die Begünstigung von Antagonisten durch Wärme komplex überlagern.

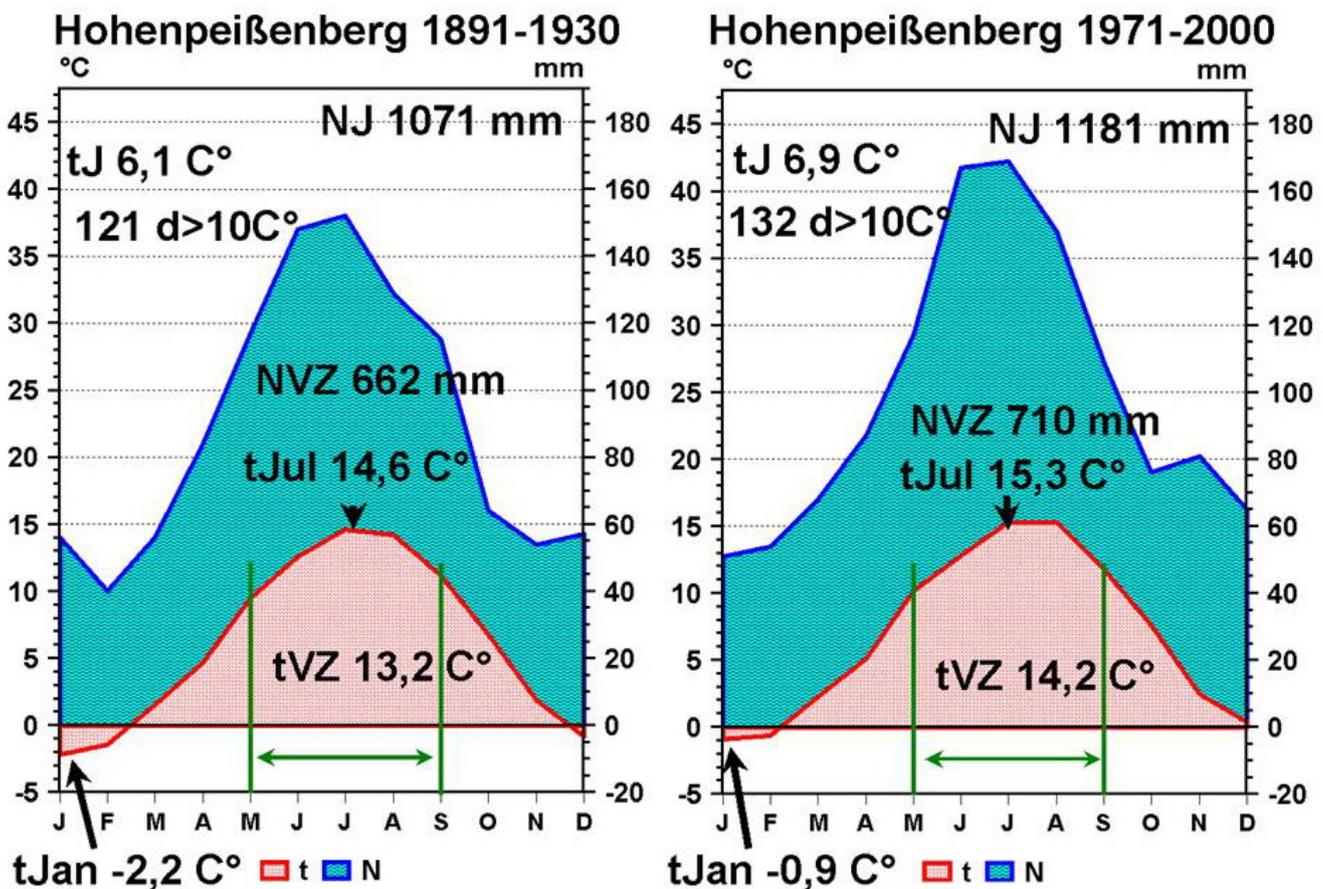


Abb. 1: Klimawandel zwischen der Periode 1891–1930 und 1971–2000 am Beispiel der Station Hohenpeißenberg/Bayern (Daten des DWD) (t_J – mittlere Jahrestemperatur; t_{VZ} – mittlere Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit Mai – September; t_{Jan} – mittlere Januartemperatur; t_{Jul} – mittlere Julitemperatur; $d > 10^\circ\text{C}$ – Summe der Tage mit einer Tagesmitteltemperatur über 10°C als Vegetationszeitage; N_J – mittlere Jahresniederschlagssumme; N_{VZ} – mittlere Vegetationszeitniederschlagssumme).

Fig. 1: Climate change between the period 1891–1930 and 1971–2000 using the example of the station Hohenpeissenberg/Bavaria (data from the DWD) (t_J – average annual temperature; t_{VZ} – average temperature during the forestry growing season May–September; t_{Jan} – average January temperature; t_{Jul} – average July temperature; $d > 10^\circ\text{C}$ – sum of days with a daily average temperature greater 10°C as growing season days; N_J – average sum of annual precipitation; N_{VZ} – average sum of precipitation in the growing season).

Die o. a. Beispiele verdeutlichen, dass die bisherigen semiempirischen Definitionen des Standortwasserhaushaltes, verbunden mit einer unvermeidlich subjektiv gefärbten Ansprache und beschränkt auf regionale Wuchsbezirke an Grenzen stoßen. Notwendig ist daher eine überregionale, kausale Klassifikation des Standortwasserhaushalts, die sich stark an einer quantitativen Betrachtung des Wasserhaushalts orientiert. Nur ein solches Klassifikationssystem erlaubt es unter den Bedingungen prognostizierter Klimaänderungen, die Komponenten des Wasserhaushalts im erforderlichen Maße zu dynamisieren und damit die notwendigen Informationen für ein standortsangepasstes und multifunktionales Waldmanagement zu liefern.

5 Perspektiven

Durch die Entwicklung von Desktop-Geoinformationssystemen (GIS) haben die (häufig unterbesetzten) Standortskartierungsgruppen der Länder ein Instrumentarium an die Hand bekommen, das die notwendige Quantifizierung und Dynamisierung von Standortdaten erlaubt. Die Basis bilden hoch auflösende Geländemodelle in 5 m x 5 m bis 20 m x 20 m

Rasterdatensätzen und einer Höhengenaugigkeit im dm- bis m-Bereich. Geostatistisch basierte Programme zur Berechnung des Lückenersatzes bei Waldklimastationen wurden zu räumlichen Interpolationsverfahren für Wetterdaten unter Einbeziehung von Höhenmodellen weiterentwickelt. Mit dieser Methode wurde z. B. in Rheinland-Pfalz ein Klimadatensatz von Tageswerten (Tagesmitteltemperatur, Niederschlag, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit) der Periode 1961–2006 in einer Rasterauflösung von 1 km x 1 km berechnet, für zwei Testgebiete auch in der Auflösung 20 m x 20 m. Im Rahmen der BZE II wurde ein bundesweiter Rasterdatensatz (50 m x 50 m) mit einer Reliefkorrektur der Globalstrahlung erstellt und erste Schritte zur Erzeugung eines Rasterdatensatzes zur Exponiertheit des Reliefs unternommen.

Mit solchen Daten lassen sich bereits einfache Annäherungen an einen quantitativen Wasserhaushalt wie z. B. klimatische Wasserbilanzen berechnen. Diesen einfachen Annäherungen stehen Indikatoren gegenüber, die mit Hilfe numerischer Wasserhaushaltsmodelle abgeleitet werden können (z. B. HAMMEL & KENNEL 2001, FALK et al. 2011, PETERS et al. 2011a, SCHWÄRZEL et al. 2011). Wenn es gelingt, engere Korrelationen zwischen

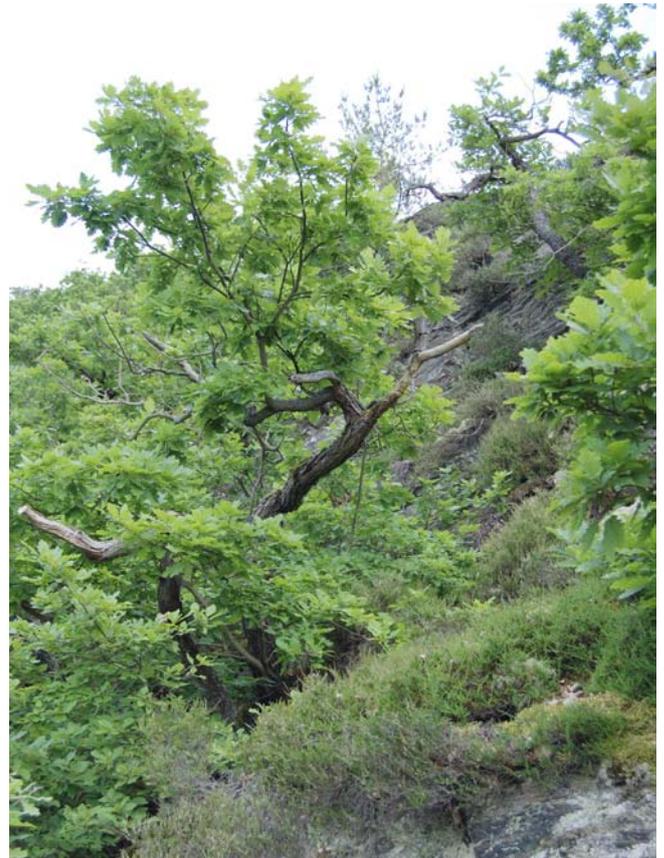


Abb. 2: Die beiden Aufnahmen zeigen am Beispiel der Eiche, in welchem Spektrum die Bäume auf den Wasserhaushalt reagieren (links: mittlerer Standort auf der Westlichen Hunsrückhochfläche (kolline Stufe, RLP sehr frisch) in ebener Lage; rechts: Sonnenhang am Rhein (Rheinsteig), Oberes Mittelrheintal, RLP äußerst trocken). Das Ausgangsgestein ist auf beiden Standorten Schiefer.

Fig. 2: Using the example of oak, the two pictures show the spectrum of the species's reaction to differences in the water supply (on the left: a typical site on the Western Hunsrück High Plain (colline stage, RLP water regime class 'very fresh') in flat situation; to the right: sunny slope in the Rhine (Rheinsteig), Upper Central Rhine Valley (RLP water regime class 'extremely dry'). The parent rock is slate at both sites.

einfachen Näherungen, vorhandenen Standortskarten und den für stratifiziert repräsentative Gebiete (als Rahmen und Stützgerüst) genau berechneten Indikator herzuleiten, kann ein solcher Indikator relativ einfach, z. B. über Fuzzy-Inference-Systeme (PETERS et al. 2011b) flächenhaft dargestellt werden. Der Maßstab für die Qualität des Indikators sollte eine enge Beziehung zum Oberhöhenwachstum (Bonität) einer Leitbaumart sein. Die Betrachtung von letalen Trockenphasen wäre eine zweite Ebene. Für die Übertragung von Ergebnissen aus komplexen in einfache Wasserhaushaltsberechnungen kann es bereits ausreichen, klimatische Extreme und Mittelwerte zu berechnen, die als Rahmen für eine lineare Interpolation dienen könnten. Um Standorten mit unterschiedlichen nutzbaren Wasserspeicherkapazitäten gerecht zu werden, sollte dieser Indikator in ähnlicher Weise für ein Kollektiv typischer Böden erzeugt werden, die dann ebenfalls als Rahmen und Stützwerte dienen könnten (Abb. 2).

Mit einem solchen Vorgehen könnte der Wasserhaushalt räumlich-differenziert bewertet werden. Das Verfahren erfüllt auch die Anforderungen an eine Dynamisierung von Standortdaten, da die Berechnungen mit prognostizierten Klimawerten im selben Schema erfolgen und mit künftig aktualisierten Klimadaten wiederholt werden könnten.

Notwendig ist auch die Ableitung eines Wasserhaushaltsindex, der eng mit dem Baumwachstum korreliert ist. Der Datenpool dafür liefern Versuchsflächen, Stichprobeninventuren, Baumhöhenmessungen während der Standortkartierung und zukünftig auch Baumhöhen, die über Laserscanning-Verfahren ermittelt werden. Hier ergeben sich interessante Forschungsperspektiven aus der Kombination von prozessorientierter retrospektiver Modellierung des Standortwasserhaushalts und der feinstrukturellen Analyse von Baumringen (vgl. VON WILPERT 1990). Gleichzeitig ist es erforderlich, eine Basis zu erarbeiten für eine einfache Umsetzung solcher Kenntnisse (z. B. über Korrelationstabellen). Dies wird als wesentliche Grundlage dafür angesehen, Modellinformationen zur Wasserdynamik in Standortskarten zur Lösung praktischer Fragestellungen verfügbar zu machen. Dazu werden digitale Standortskarten benötigt, die aber inzwischen in den meisten Bundesländern vorliegen oder erstellt werden, sowie den Willen, die dahinter steckende Klassifikation dynamisch weiter zu entwickeln (ASCHE & SCHULZ 2004, BECK 2009, GAUER 2010).

Modellgestützte Aussagen zur Wasserdynamik erfolgten bislang fast ausschließlich an ebenen bis schwach geneigten und i. d. R. frei entwässernden Waldstandorten. In realen Waldlandschaften hat man es hingegen häufig mit mehr oder weniger stark geneigten Hängen zu tun. Dort bewegt sich das Wasser – zumindest in gewissen Jahreszeiten – nicht vertikal sondern lateral („Hangwasserzug“), Die sich hieraus ergebenden horizontalen Verknüpfungen des Wasserhaushalts von Einzelstandorten ist bislang wegen des hohen

Messaufwandes weder durch empirische Messungen noch modelltechnisch erfasst. Insofern erscheint es lohnenswert, hier künftig verstärkte Forschungsaktivitäten zu entfalten, um quantitative Werte für den lateralen Wassertransport und die häufig damit verbundene Stauwasserdynamik entlang von Catenen abzuleiten. Gerade hier bestehen interessante Schnittstellen zur Abflussbildung und damit zur Erfassung und modelltechnischen Beschreibung des Wasserhaushalts auf der Skalenebene ganzer Einzugsgebiete (z. B. Niederschlags-/Abflussmodelle oder Modelle zur Grundwasserneubildung auf großer Fläche).

Literatur

- AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover.
- AK STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2003): Forstliche Standortaufnahme. 6. Aufl., IHW-Verlag, Eching bei München.
- ASCHE, N., SCHULZ, R. (2004): Standortklassifikation mit digitalen Werkzeugen und die digitale Waldtypenkarte in Nordrhein-Westfalen. *Forst & Holz* **59**: 428-431.
- 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*. <http://www.dbges.de>; Jahrestagung der DBG 2009, Kommission III, Bonn.
- BENINDE, R., HOFFMANN, D., WALLECH, W. (1960): Zur Auswertung ertragskundlicher Erhebungen im Verfahren zur Standortkartierung des Forsteinrichtungsamtes Koblenz. *Allg. Forst- Jagdztg.* **131**: 121-125.
- BORK, H.-R., ROHDENBURG, H., BRANDTNER, W. (1984): Die landschaftsökologische Bewertung von Waldstandorten mit Hilfe multivariat-statistischer Verfahren. *Landschaftsgenese und Landschaftsökologie* **9**: 1-146.
- BENECKE, P. (1992): Vorhersagbarkeit der Wasserbindungs- und der Wasserleitfähigkeitsfunktion an bodenkundlichen Substratmerkmalen. – aus DFG: Regionalisierung in der Hydrologie.– *Mitteilgn. XI der Senatskommission für Wasserforschung*, 221-239, VCH, Weinheim.
- BOLTE, A., IBISCH, P.L. (2007): Neun Thesen zu Klimawandel, Waldnaturschutz. *AFZ/Der Wald* **61**: 572-576.
- CALDER, I., HOFER, T., VERMONT, S. & WARREN, P. (2007): Towards a new understanding of forests and water. *Unasylva* **229**: 3-10.
- DIESTER, E. (1983): Zur Hochwassertoleranz von Auenwaldbäumen an lehmigen Standorten. *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie* **10**: 325-336.
- EDER, W. (1980): Quantifizierung von bodenkundlichen Standortfaktoren als Grundlage für eine leistungsbezogene Standortkartierung insbesondere auf Buntsandsteinstandorten der Pfalz. *Mitteilgn. a. Forsteinrichtung u. Waldbau* **23**: 1-263.

- ELLENBERG, H. (1963/1986/1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. 1./4./5. Aufl., Ulmer, Stuttgart: 1.096 S.
- FALK, W., OSENSTETTER, S., DIETZ, E. (2011): Konzept für ein quantitatives Verfahren zur Kennzeichnung des Lufthaushaltes von Waldböden in Bayern. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 93-99.
- FEGER, K.H. (1997/98): Boden- und Wasserschutz in mitteleuropäischen Wäldern. I. Rahmenbedingungen. *Bodenschutz* **2**: 18-23; II. Gefährdungspotentiale und Bewertung. *Bodenschutz* **2**: 134-138; III. Waldbauliche Möglichkeiten und Maßnahmen des technischen Bodenschutzes. *Bodenschutz* **3**: 103-108.
- GAUER, J. (2009): 4.2.1 Böden als Waldstandorte – Handbuch der Bodenkunde 32. Erg.Lfg.06/09, Wiley-VCH, Weinheim.
- GAUER, J. (2010): GIS-gestützte Weiterentwicklung von forstlichen Standortskarten. *AFZ/DerWald* **64**: 32-35.
- HÄNTZSCHEL, J., FRANKE, J., GEMBALLA, R., BERNHOFER CHR. (2006): Forstliche Klimagliederung Sachsens im Klimawandel. *AFZ/Der Wald* **60**: 830-832.
- HAMMEL, K., KENNEL, M. (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushaltes von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. *Forstliche Forschungsberichte München* **185**: 1-136.
- KÖLLING, C., ZIMMERMANN, L. (2007): Die Anfälligkeit der Wälder Deutschlands gegenüber Klimawandel. *Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft* **67**: 259-268.
- KOPP, D., SCHWANECKE, W. (1994): Standortlich-naturräumliche Grundlagen ökologiegerechter Forstwirtschaft. Grundzüge und Verfahren und Ergebnissen der forstlichen Standortserkundung in den fünf ostdeutschen Bundesländern. DLV-Verlag, Berlin: 248 S.
- KRAUSE, A. (1982): Flußufer-Zonierung und gewässerkundliche Statistik. *Natur und Landschaft* **57**: 341-344.
- KRAUSS, G.A. (1936): Aufgaben der Standortskunde. *Jahresberichte des Deutschen Forstvereins*, Berlin.
- LAATSCH, W. (1969a): Das Abschätzen der Wasserversorgung von Waldbeständen auf durchlässigen Standorten ohne Grund- und Hangzugwasser – 1. Teil. Leicht durchlässige Standorte. *Forstw. Cbl.* **88**: 257-271.
- LAATSCH, W. (1969b): Das Abschätzen der Wasserversorgung von Waldbeständen auf durchlässigen Standorten ohne Grund- und Hangzugwasser – 2. Teil. Böden mit vorübergehenden Staunässe (Parabraunerden). *Forstw. Cbl.* **88**: 351-358.
- LYR, H., FIEDLER, H.-J., TRANQUILINI, W. (1992): Physiologie und Ökologie der Gehölze. Gustav Fischer Verlag, Jena. 444 S.
- MICHIELS, H.-G., ALDINGER, E. (2002): Forstliche Standortsgliederung in der badischen Rheinaue. *AFZ/Der Wald* **56**: 811-815.
- MITSCHERLICH, G. (1971): Wald, Wachstum und Umwelt. Zweiter Band: Waldklima und Wasserhaushalt. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a.M.: 365 S.
- PETERS, R., SCHWÄRZEL, K., CLAUSNITZER, F., BERNHOFER, C., FEGER, K.H. (2011a): Einfluss von Relief, Boden und Bestockung auf den Standortswasserhaushalt. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 101-109.
- PETERS, R., SCHWÄRZEL, K., FEGER, K.H. (2011b): Fuzzy-Inference-Systeme zur Regionalisierung des Standortswasserhaushaltes von Wäldern. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 111-117.
- PILAŠ, I., FEGER, K.H., VILHAR, U., WAHREN A. (2010): Multidimensionality of Scales and Approaches for Forest–Water Interactions. In: BREDEMEIER, M., COHEN, S., GODBOLD, D.L., LODE, E., PICHLER, V., SCHLEPPI, P. (Eds.): *Forest Management and the Water Cycle – An Ecosystem-Based Approach*. *Ecological Studies* 212, Springer, ISBN 978-90-481, (in press).
- PUHLMANN, H., WILPERT, K. (2011): Datenbank hydraulischer Eigenschaften von Waldböden – Test und Entwicklung von Pedotransferfunktionen. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 61-71.
- RAISSI, F., MÜLLER, U., MEESENBURG, H. (2001): Ermittlung der effektiven Durchwurzelungstiefe von Forststandorten. *Geofakten* 9: 8 S.
- RAKEI, A.K., RENGER, M., WESSOLEK, G. (1992): Wasserhaushalt eines Alt- und Jungkiefernbestandes im Grunewald (Berlin). *Allg. Forst- Jagdztg.* **163**: 169-171.
- RIEK, W., WESSOLEK, G., LÜHRTE, A. VON. (1994): Wasserhaushalt und Dickenwachstum von Kiefern (*Pinus sylvestris*) im Raum Berlin. *Allg. Forst- Jagdztg.* **166**: 138-144.
- RIEK, W., WESSOLEK, G., LÜHRTE, A. VON. (1995): Spektralanalytische Interpretation des langjährigen Wasserhaushalts und der Jahrringbreitenentwicklung von Kiefern. *Forstarchiv* **66**: 199-205.
- SCHÜLER, G. (2006): Identification of flood-generating forest areas and forestry measures for water retention. *Forest Snow Landscape Res.* **80**: 99-114.
- SCHWÄRZEL, K., PETERS, R., PETZOLD, R., HÄNTZSCHEL, J., MENZER, A., CLAUSNITZER, F., SPANK, U., KÖSTNER, B., BERNHOFER, C., FEGER, K.H. (2011): Räumlich-differenzierte Berechnung und Bewertung des Standortswasserhaushaltes von Wäldern des Mittelgebirges. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 119-126.
- SCHWANECKE, W. (1970): Richtlinie für die Bildung und Kartierung der Standortseinheiten im Hügelland und Mittelgebirge der DDR. VEB Forstprojektierung Potsdam: 98 S.
- WAGNER, I. (1994): Prüfung von Jugend-Alters-Korrelationen im Rahmen von Wasserhaushaltsuntersuchungen an 12 Klonen der Fichte (*Picea abies* L. Karst.) – Abbildung von Höhenwachstum. *Forstw. Cbl.* **113**: 125-136.
- WAGNER, S. (2004): Klimawandel – einige Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. *Forst & Holz* **59**: 394-398.

- WAHREN, A., SCHWÄRZEL, K., FEGER, K.H. (2007): Identification and model based assessment of the potential water retention caused by changes in land-use. – Proceedings "Integrated Catchment Management for Hazard Mitigation". Sept. 24-26, 2007, Trier.
- WALLESCH, W. (1959): Das Verfahren der Standortserkundung und -kartierung des Forsteinrichtungsamtes Koblenz. Allg. Forst- Jagdztg. **130**: 37-48.
- WILPERT, K. VON (1990): Die Jahrringstruktur von Fichten in Abhängigkeit vom Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde. Ein Methodenkonzept zur Erfassung standortsspezifischer Wasserstreßdisposition. Freiburger Bodenkundl. Abh. **24**: 1-222.

submitted: 05.01.2011
reviewed: 23.02.2011
accepted: 16.03.2011

Autorenanschrift:

Dr. Jürgen Gauer
Landesforsten Rheinland-Pfalz
Außenstelle Forsteinrichtung
Südallee 15-19, 56068 Koblenz
E-Mail: juergen.gauer@wald-rlp.de

Prof. Dr. Karl-Heinz Feger und Dr. Kai Schwärzel
Institut für Bodenkunde und Standortslehre, TU Dresden,
Piennner Str. 19, 01735 Tharandt
E-Mail: fegerkh@forst.tu-dresden.de
E-Mail: kai.schwaerzel@forst.tu-dresden.de