

# Regionalisierung des Bodenwasserhaushalts für Klimaszenarien als Grundlage für die forstliche Planung

WINFRIED RIEK, ALEXANDER RUSS

## 1 Einleitung

Vor dem Hintergrund des regionalen Klimawandels wird am Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde in Kooperation mit der Hochschule für nachhaltige Entwicklung (FH) Eberswalde seit mehreren Jahren an einem forstlichen Planungsinstrument gearbeitet, das die für Brandenburg zu erwartenden Veränderungen von Standortseigenschaften explizit bei der Baumartenwahl mit einbeziehen soll. Im Zentrum steht hierbei die Frage nach der Dynamisierung von forstlichen Wuchsräumen auf der Grundlage szenarischer Klimadaten und regionalisierter Parameter zum Wärme-, Wasser- und Nährstoffhaushalt. Der konzeptionelle Ansatz dieses Vorhabens und die verwendete Ausgangsdatenbasis wurden im Winterkolloquium 2010 erstmals präsentiert und sind bei RIEK (2010) im Einzelnen beschrieben.

Erstes Etappenziel dieses Projektes war die Schaffung flächendeckender Rasterdaten zur Kennzeichnung des Wärme- und Wasserhaushaltes für den Zeitraum 2000–2100 unter Verwendung des statistischen Regionalmodells WettReg und des IPCC-Szenario A1B. Umfangreiche statistische Auswertungen dieses Datensatzes zur Analyse der Hauptkomponenten des Wärmehaushaltes und deren mögliche Veränderungen wurden von RIEK et al. (2013) publiziert. Im Mittelpunkt des vorliegenden Beitrags stehen nun die Berechnung der Komponenten des Bodenwasserhaushalts und die raum-zeitliche Analyse von szenarischen Wassermangelsituationen für die Gesamtwaldfläche Brandenburgs. Darauf aufbauend wird ein erster Modellansatz zur Entscheidungsfindung bei der Baumartenwahl im Hinblick auf die Anpassung der Wälder an den Klimawandel vorgestellt.

## 2 Datengrundlage und Regionalisierungsansätze

Die Regionalisierung der standörtlichen Daten erfolgte – ausgehend vom Maßstab der Forstlichen Standortskarte sowie praktischen Überlegungen hinsichtlich Datenumfang und Rechenzeiten – auf der Grundlage eines kontinuierlichen Punkterasters mit einer Rasterweite von 100 × 100 m. Flächenrepräsentative Informationen zu Wuchsräumen (forstliche Wuchsgebiete, Wuchsbezirke und ggf. Teilwuchsbezirke) wie auch kleinräumigere Aussagen auf Abteilungsebene lassen sich durch stratifizierte Mittelwertbildung und Angabe von Streuungsmaßen auf der Grundlage dieses Punkteraster gut realisieren.

Insgesamt wurden für die Waldfläche Brandenburgs 1.076.222 Rasterpunkte definiert, für welche nachfolgend ein Überblick der aktuell vorliegenden Standortsinformationen in Bezug auf die Modellierung des Wasserhaushalts gegeben wird. Die Erweiterung dieser bestehenden Daten-

basis um bodenchemische Eigenschaften und Kennwerte des Nährstoffhaushalts ist zeitnah geplant. Hierfür sind noch adäquate Regionalisierungsansätze zu entwickeln und zu testen. Die Grundlage dafür sollen im Wesentlichen die Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald bilden.

### 2.1 Klimadaten

Verwendung fanden regionalisierte Angaben zu Niederschlag und potenzieller Verdunstung auf Tagesbasis sowie tägliche Minimum-, Maximum- und Mitteltemperaturen, die mit Hilfe des statistischen Regionalmodells WettReg für die IPCC-Szenarien A1B, A2 und B1 erzeugt wurden. Im vorliegenden Beitrag werden für zeitliche Vergleiche die Daten des Szenarios A1B für die Dekaden 2000–2010, 2050–2060 sowie 2090–2100 – nachfolgend als D2005, D2055 und D2095 bezeichnet – verwendet.

Das WettReg-Modell geht von der Beziehung zwischen Großwetterlagen und der regionalen Ausprägung meteorologischer Kenngrößen aus und schließt von den Ergebnissen der Globalmodelle auf regionale Klimaänderungen (SPEKAT et al. 2007, ENKE et al. 2005a, b). Die Übertragung der Klimadaten von Stationswerten in die Fläche erfolgte durch abstandsgewichtete und höhenabhängige Interpolation (KREIENKAMP und SPEKAT 2009). Methodische Details und eine kritische Würdigung dieser Daten finden sich bei RIEK et al. (2013).

Die mittleren Jahresniederschläge für Brandenburg werden sich nach diesem Modellszenario bis 2100 kaum verändern (Tab.1). Die Niederschläge im Winter steigen leicht an, die im Sommer verringern sich geringfügig. Deutlicher verändert sich dagegen die potenzielle Verdunstung. Sie steigt im Vergleich der Dekaden D2005 und D2095 im Sommerhalbjahr um durchschnittlich 60 mm an. Als Differenz von Niederschlag und Verdunstung ergibt sich für die Klimatische Wasserbilanz auf das Jahr gesehen eine Abnahme. Diese ist auf das stark erhöhte Wasserdefizit im Sommerhalbjahr zurückzuführen; im Winterhalbjahr nimmt die Klimatische Wasserbilanz indes infolge der erhöhten Niederschläge leicht zu. Zusammenfassend ist also mit einem deutlich stärkeren Wassermangel während der Vegetationszeit zu rechnen. Dieses zeigt sich nicht nur in den durchschnittlichen Ausprägungen der Wasserbilanz sondern auch in den regionalen Extremen. So liegt das 90-Perzentil der sommerlichen Klimatischen Wasserbilanz der Dekade D2095 mit -192 mm noch weiter im negativen Bereich als das 10-Perzentil der Dekade D2005 (-173 mm); das heißt: die feuchtesten Gebiete Brandenburgs im Jahr 2100 werden trockener sein als die trockensten heute. Diese Aussage ist allerdings nur in Bezug auf reine Klimakenngrößen zutreffend. Da der Bodenwasserspeicher als Puffer für

Wassermangel wirksam ist, wird diesem insbesondere vor dem Hintergrund ansteigender Winterniederschläge eine zunehmende Bedeutung zukommen. Böden mit erhöhten Wasserspeicherkapazitäten, wie zum Beispiel humusreiche Böden und Böden aus bindigem Ausgangssubstrat (aber auch Feinsande im Vergleich zu größeren Sanden) sind bevorteilt, weil sie hohe Mengen des Winterniederschlages speichern und in der Vegetationszeit bei reduzierten Sommerniederschlägen und erhöhten potenziellen Verdunstungsraten den Pflanzen zur Verfügung stellen können. Aus diesem Grund erscheint es besonders wichtig, nicht allein die klimatische Wasserbilanz zur Einschätzung von Wassermangel heranzuziehen, sondern den Bodenwasserhaushalt berücksichtigende integrierende Trockenstresskennwerte zu berechnen (vgl. Abschn.3). Ein geeignetes Werkzeug für die großflächige Berechnung solcher Kennwerte stellen statistische Wasserhaushaltsmodelle dar.

## 2.2 Daten zum Grundwasserflurabstand

Die Angaben zum Flurabstand des oberflächennahen Grundwassers wurden aus Daten von Grundwassermessstellen und Oberflächenwasserpegeln unter Verwendung eines digitalen Höhenmodells geostatistisch für vier ausgewählte Stichzeiträume ermittelt (HANNAPPEL et al. 2009). Neben den terminbezogen gemessenen Grundwasser- und Pegelständen wurden weitere Archivdaten in die Bearbeitung integriert, die auf die gesuchten Zeiträume mittels eines statistischen Verfahrens transformiert wurden. Je nach Stichzeitraum konnten somit brandenburgweit 15.733 bis 16.609 Stützstellen mit Angaben zu Grund- bzw. Oberflächenwasserständen bei der Regionalisierung berücksichtigt werden. Die verwendeten Regionalisierungsansätze und Datengrundlagen sind bei HANNAPPEL und RIEK (2011) ausführlich dargelegt. Die Berechnung der Grundwasserflurabstände erfolgte mit dieser Methode für alle Punkte, die sich in Gebieten mit ungespanntem, oberflächennahem Grundwasser befinden. In den Grund- und Endmoränenbereichen mit gespanntem Grundwasser können Vernässungen lokal und saisonal begrenzt durch Schichten-, Stau- und Hangzuschusswasser auftreten. Diese Bereiche wurden mit Hilfe von Angaben aus der Forstlichen Standortkarte unter Verwendung des Höhenmodells identifiziert. In den Übergangsbereichen von gespanntem und ungespanntem

Grundwasser erfolgte ein räumlicher Abgleich der beiden Ansätze (RUSS und RIEK 2011a, c).

## 2.3 Standortformen nach SEA 95

Methodisch sind bei der Ermittlung der Standortform für die Punkte des 100 × 100 m-Rasters vier Fälle zu unterscheiden (Tab.2). Im einfachsten Fall 1 lässt sich die punktuelle Angabe zur Standortform unmittelbar dem entsprechend eindeutig definierten Polygon der Forstlichen Standortkarte entnehmen. Im zweiten und dritten Fall handelt es sich um sogenannte Wechselkartierungen. Diese weisen auf kleinflächige Standortwechsel hin. In den Polygonen der Standortkarte sind in diesem Fall zwei oder drei unterschiedliche Standortformen mit Anteilzehnteln ihres flächenhaften Auftretens ausgewiesen. Die punktgenaue Schätzung der Standortform erfordert eine Disaggregation dieser Angaben. Für Wechselformen im grundwasserbeeinflussten Bereich erfolgte diese durch Verschneidung von Standortkarte und Digitalem Höhenmodell (Fall 2). Für Wechselkartierungen im grundwasserfernen Bereich (Fall 3) wurden Zusammenhänge zwischen verschiedenen aus dem Digitalen Höhenmodell abgeleiteten Reliefkennwerten. Dabei wurde das statistische Verfahren der linearen Diskriminanzanalyse eingesetzt. Verwertbare Angaben aus der Forstlichen Standortkarte liegen für 70 % der brandenburgischen Waldfläche vor. Für die nicht abgedeckte Fläche (Fall 4) wurde die Feinbodenform nach einem statistischen Entscheidungsmodell (CHAID-Analyse; KASS 1980) aus den Legendeneinheiten von Bodenübersichtskarte und geologischer Karte, dem Grundwasserflurabstand, Klimadaten sowie aus Reliefattributen nach dem Digitalen Höhenmodell geschätzt.

Die Entwicklung der Regionalisierungsansätze ist Gegenstand eines Promotionsvorhabens an der HNEE und TU Berlin (RUSS et al. 2013). Im Rahmen dieses Vorhabens wurden für sämtliche Feinbodenformen im Nordostdeutschen Tiefland auf der Grundlage des „Feinbodenformenkatalogs“ der SEA (SCHULZE 2005) und unter Berücksichtigung bereits bestehender Merkmalsspiegel (KONOPATZKY 1998, KOPP und JOCHHEIM 2002, KONOPATZKY 2012) Profilauffolgen zu Horizontbezeichnung, Bodenart, Grobboden- und Carbonatgehalten abgeleitet. Zur Bestimmung der Schichtmächtigkeiten der oft an periglaziären Lagen und Perstruktionszonen orientierten

[mm]		D2005			D2055			D2095		
		-0,1	Med	-0,9	-0,1	Med	-0,9	-0,1	Med	-0,9
Nd	Jahr	499	543	594	508	545	588	478	538	570
	So	272	315	373	263	295	331	231	281	315
	Wi	206	224	247	231	250	272	234	255	273
PET	Jahr	530	570	605	553	594	632	584	631	674
	So	420	447	471	441	471	497	474	507	535
	Wi	110	122	135	111	122	135	110	125	142
KWB	Jahr	-84	-21	35	-98	-45	10	-149	-94	-50
	So	-173	-129	-75	-211	-172	-139	-262	-223	-192
	Wi	79	102	130	105	128	154	103	130	157

Tab. 1: Median, 10- und 90-Perzentil von Niederschlag (Nd), potenzieller Verdunstung (PET) und Klimatischer Wasserbilanz (KWB) jeweils für Gesamtjahr, Sommer- und Winterhalbjahr der Dekaden D2005, D2055 und D2095 (n=1.076.222)

tierten Definitionen des Feinbodenformenkataloges wurden ergänzende Angaben aus der Standortserkundungsanleitung sowie von ALTERMANN et al. (2008) herangezogen.

Anhand der punktuell ermittelten Feinbodenformen lassen sich Aussagen zu deren regionaler Verbreitung treffen, wenn für jeden Rasterpunkt eine Fläche von 1 ha angesetzt wird. In Brandenburg finden sich 539 Feinbodenformen, die in Tab. 3 nach ihrem flächenhaften Auftreten stratifiziert wurden. Aus dieser Darstellung geht hervor, dass die Flächenanteile der Feinbodenformen einer logarithmischen Häufigkeitsverteilung unterliegen: wenige unterschiedliche Feinbodenformen decken einen Großteil der Waldfläche ab, während zahlreiche Feinbodenformen eher selten auftreten. Die häufigsten 10 Feinbodenformen sind in der Reihenfolge ihres Anteils an der Waldfläche (Bezeichnungen nach SCHULZE 2005) die folgenden:

- BäS Bärenthorener Sand-Braunerde (201.064 ha)
- NeS Nedlitzer Sand-Braunerde (98.822 ha)
- GmS Grubenmühler Sand-Braunerde (93.282 ha)
- LwS Lienewitzer Sand-Braunerde (74.863 ha)
- FtS Finowtaler Sand-Braunerde (37.866 ha)
- KdS Kersdorfer Sand-Ranker (36.176 ha)
- BoS Bodenseichener Sand-Braunerde (35.491 ha)
- SoS Sonnenburger Bändersand-Braunerde (26.719 ha)
- BgS Bergrader Sand-Braunerde (22.497 ha) und
- RüS Rütznicker Sand-Rumpfrosterde (20.267 ha).

In Summe decken die genannten Feinbodenformen 647.047 ha, d. h. ca. 60 % der Waldfläche Brandenburgs ab.

### 2.4 Nutzbare Feldkapazität und verfügbares Bodenwasser

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) wurde mit Hilfe einer für den Untersuchungsraum validierten Pedotransferfunktion (PTF) tiefenstufenweise berechnet (RUSS und RIEK 2011b). Abb. 1 zeigt die Häufigkeitsverteilung der bis 0,80 m Bodentiefe aufsummierten Werte. Die Grundlage für die verwendete PTF bilden zum einen bodenphysikalische Kennwerte der typisierten Profilauffolgen aller Feinbodenformen (RUSS et al. 2013) und zum anderen tiefenstufenweise regionalisierte Humusgehalte und Bodendichten.

Für die Schätzung der Humusgehalte und Bodendichten (TRD) wurde in einem ersten Schritt ein Regressionsmodell zur Schätzung der Kohlenstoffvorräte im gesamten Solum auf Grundlage vorliegender Inventurdaten (BZE) ermittelt. Als Prädiktoren konnte ein umfangreiches Spektrum an bodenbildenden Faktoren (Klima, Vegetation, Relief, Ausgangsmaterial, Zeit) orientierten Kennwerten eingesetzt werden. Diese wurden zuvor aus Klimadaten, Datenspeicher Wald, DGM, forstlicher Standortskarte und Grundwasserkarten abgeleitet. In Anlehnung an das durch McBRATNEY et al. (2003) erweiterte Modell der bodenbildenden Faktoren („SCORPAN“) wurde im Anschluss an die Modellentwicklung der Einfluss der räumlichen Lage mit geostatistischen Methoden getestet.

Den zweiten Schritt bildet die Regionalisierung der Kohlenstoffvorräte in den einzelnen Bodentiefen. Dieses erfolgte in Anlehnung an KEMPEN et al. (2011) auf Grundlage natür-

	Datenherkunft	Regionalisierungsverfahren	Anzahl der Punkte
Fall 1	Standortskarte enthält Polygon mit eindeutiger Angabe der Standortform	Unmittelbare Verwendung der Angabe der Standortskarte	556.330 (52%)
Fall 2	Standortskarte weist Wechselkartierung im grundwasserbeeinflussten Bereich aus	Disaggregation durch Verschneidung mit Geländehöhen des Digitalen Geländemodells (DGM)	30.775 (3%)
Fall 3	Standortskarte weist Wechselkartierung im grundwasserfernen Bereich aus	Diskriminanzanalyse (Prädiktoren: 44 aus dem DGM abgeleitete - mit bodenbildenden Faktoren assoziierte – Reliefattribute)	156.702 (15%) davon zwei Wechselformen: 129.248 (12%), drei Wechselformen: 27.454 (3%)
Fall 4	Keine verwendbare Angabe aus der Standortskarte verfügbar (Altkartierung, Komplexstandorte, Sonderstandorte, nicht kartierte Fläche)	Prognose mittels CHAID-Analyse (Prädiktoren: Legendeneinheiten der Bodenübersichtskarte und Geologischen Übersichtskarte, Grundwasserflurabstände, Klimakennwerte sowie Reliefattribute)	332.415 (30%)

Tab.2: Ableitung der Feinbodenformen für die Rasterpunkte auf der Grundlage der Forstlichen Standortskarte

Fläche der einzelnen Feinbodenform [ha]	Anzahl der betroffenen Feinbodenformen [n]	Gesamtfläche der betroffenen Feinbodenformen [ha]	Flächenanteil der Feinbodenformen an der Gesamtwaldfläche [%]
1 – 10	121	529	0,05
10 – 100	184	7.389	0,69
100 – 1.000	143	49.121	4,56
1.000 – 10.000	70	239.105	22,22
> 10.000	21	780.078	72,48

Tab.3: Flächenanteile der Feinbodenformen in Brandenburg

licher Tiefengradiententypen, welche mittels Clusteranalyse (WARD) ermittelt und anschließend mit Hilfe eines optimal beschnittenen Klassifikationsbaummodells (CART; BREIMAN et al. 1984) regionalisiert wurden. Dafür konnte wieder auf die gleichen Prädiktoren zurückgegriffen werden, welche bereits bei der Regionalisierung der Vorräte verwendet wurden. In Abhängigkeit von der jeweiligen Tiefenstufe, konnten bei der Vorhersage der Kohlenstoffvorräte Bestimmtheitsmaße im Bereich von 0,20 bis 0,55 erreicht werden.

Die für die eingesetzte nFK-PTF benötigten Humusgehalte und Bodendichten konnten abschließend anhand der etablierten Umrechnungsfaktoren der ARBEITSGRUPPE BODEN (2005) sowie auf Grundlage der für die brandenburgische BZE-Stichprobe rekalierten TRD-PTF von ADAMS (1973) ermittelt werden.

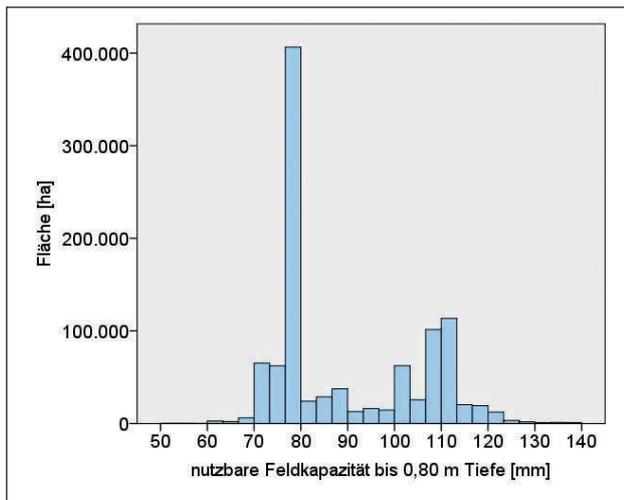


Abb. 1: Häufigkeitsverteilung der nutzbaren Feldkapazität bis 0,80 m Bodentiefe

Für die Anwendung im Wasserhaushaltsmodell wurde die nFK tiefenstufenweise bis zur effektiven Durchwurzelungstiefe aufsummiert. Zur Abschätzung des effektiven Wurzelraums wurde auf die Tiefenfunktionen für die Berechnung der ausschöpfbaren Bodenwassermenge nach RIEK (1995) zurückgegriffen. Diese Funktionen erlauben die Abschätzung der durch den Bestand in jeder Bodentiefe effektiv ausschöpfbaren Bodenwassermenge in Abhängigkeit von Bestandesalter und hydrischen Anreizen zur Tiefendurchwurzelung. In Anlehnung an die Zuwachsentwicklung der meisten Hauptbaumarten wurde davon ausgegangen, dass die vertikale Erschließung des Wurzelraumes im Alter von 40 Jahren i. d. R. abgeschlossen und der Einfluss des Bestandesalters entsprechend limitiert ist. Auf Grundlage dieser für jeden Punkt ermittelten Tiefenfunktion konnte der effektive Wurzelraum dann entsprechend dem Ansatz von RENGER und STREBEL (1980) ermittelt werden.

Im Fall von grundwasserbeeinflussten Böden erfolgte eine Begrenzung des berechneten effektiven Wurzelraums auf die jeweilige Grundwasserspiegeltiefe. Als minimaler Wurzelraum wurde hierbei unabhängig vom Grundwasserflurabstand eine Durchwurzelungstiefe von 30 cm unterstellt. Bei Grundwasseranschluss trägt zusätzlich zur nutzbaren Feldkapazität der kapillare Aufstieg aus dem Grundwasser zur Wasserversorgung der Pflanzen bei. Für die Schätzung der kapillaren Aufstiegsraten wurden die Tabellen und Gleichungen von WESSOLEK et al. (2009) verwendet. Auf deren Grundlage lässt sich der kapillare Aufstieg aus dem

Grundwasser anhand von Grundwasserflurabstand zur Untergrenze des effektiven Wurzelraums, der Bodenart, der nutzbaren Wasserspeicherkapazität im effektiven Wurzelraum sowie potenzieller Verdunstung und Niederschlag im Sommerhalbjahr abschätzen.

Die Summe aus nutzbarer Feldkapazität und kapillarem Aufstieg (= pflanzenverfügbares Bodenwasser Wpfl) ist als Mittelwert der brandenburgischen forstlichen Wuchsbezirke nach Rängen aufsteigend sortiert in Abb. 2 dargestellt. Vor allem die aufgrund ihrer erhöhten Lage grundwasserfernen Platten- und Endmoränengebiete weisen sehr geringe Durchschnittswerte um 100 mm auf. Dabei handelt es sich meist um Standorte mit Geschiebesanden, da die bindigeren Substrate eher unter Ackernutzung stehen. Beispiele sind die Wuchsgebiete Lausitzer Grenzwall, Beeskower Platte, Jüterboger Flämingrücken und Zauche Platte. Weiterhin zeichnen sich die grobkörnigen Sanderbereiche, wie Gadower Sander oder Rühnicker Sander im Durchschnitt durch sehr geringe pflanzenverfügbare Wasserspeicherkapazitäten aus. Demgegenüber weisen die Wuchsgebiete im Grundwassereinflussbereich der Niederungen mit beträchtlichen kapillaren Aufstiegsraten und einem teilweise erhöhten Anteil an Mooren sehr hohe pflanzenverfügbare Wassermengen auf. Dabei handelt es sich häufig um sehr kleinflächige bzw. wenig bewaldete Wuchsbezirke, wie Uckerseerinn, Rhinluch sowie Unter- und Oberspreewaldniederung mit nutzbaren Wassermengen von durchschnittlich mehr als 220 mm.

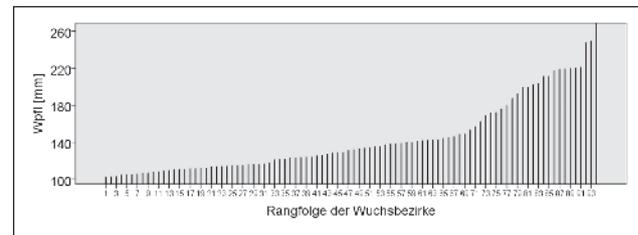


Abb. 2: Rangfolge der brandenburgischen Wuchsbezirke (n=94) nach dem Mittelwert der pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge (Wpfl)

### 3 Wasserhaushaltsmodellierung

Bei der Wasserhaushaltsmodellierung werden Kenngrößen des Klimas (Niederschlag, potenzielle Verdunstung) und physikalischen Bodeneigenschaften (Wasserspeicherkapazität, kapillare Leitfähigkeit und Grundwasserflurabstand) rechnerisch miteinander verknüpft. Als integrierende Kenngrößen des Wasserhaushalts liefert das Modell die Sickerwasserraten und die reale Verdunstung (aktuelle Evapotranspiration AET) pro Zeiteinheit. Letztere dient in Verbindung mit der potenziellen Verdunstung (PET) in Form des Quotienten AET/PET oder der Differenz AET-PET zur Quantifizierung von Wassermangel und ggf. Trockenstress bei Waldbäumen.

Die Wasserhaushaltsmodellierung erfolgte mit dem Simulationsmodell TUB-BGR (WESSOLEK et al. 2008, WESSOLEK et al. 2009). Eingangsgrößen sind Bodenart, nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum, Grundwasserflurabstand, Bestandestyp, Niederschlag und potenzielle Evapotranspiration. Alle benötigten Angaben konnten flächendeckend für die Punkte des 100 × 100 m-Rasters mit den genannten Regionalisierungsansätzen geschätzt werden. Dabei kamen

sowohl die aktuellen Klimadaten (Dekade D2005) als auch szenarische Daten (D2055, D2095) zum Einsatz. Problematisch ist die Festlegung von Grundwasserständen für die Szenarien der Dekaden D2055 und D2095. Hier wurden vorläufig die regionalisierten niedrigsten Grundwasserstände der Zeitreihe 1960–2010 verwendet (HANNAPPEL und RIEK 2011). Es wird jedoch angestrebt mit weiteren szenarischen Varianten zu rechnen, wenn belastbare Informationen zu klimabedingten Grundwasserabsenkungen aus Fallstudien vorliegen, die dann anhand der stichtagsbezogenen Flurabstandskarte in die Fläche übertragen werden können.

Die für die Modellierung von AET-PET abgeleiteten Eingangsgrößen sowie die für deren Ermittlung verfügbaren Datengrundlagen sind schematisch in Abb.3 dargestellt. Alle Verbindungspfeile zwischen den Boxen stehen für Ursache-Wirkungszusammenhänge, die bei der Modellierung bzw. Regionalisierung berücksichtigt worden sind.

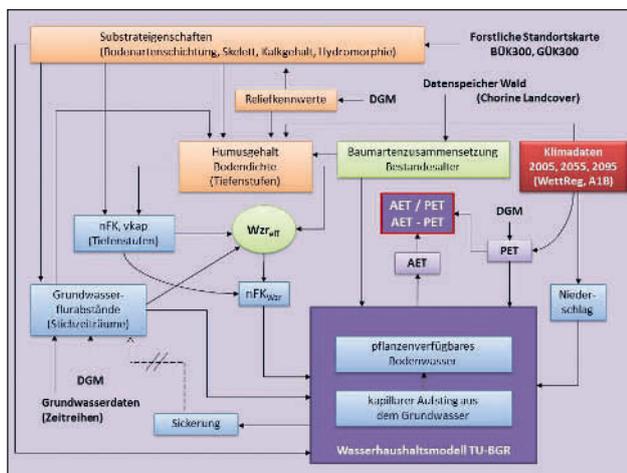


Abb.3: Datenquellen und Ursache-Wirkungsbeziehungen bei der Wasserhaushaltsmodellierung und Regionalisierung  
 AET = aktuelle Evapotranspiration; BÜK = Bodenübersichtskarte; DGM = digitales Geländemodell; GÜK = Geologische Übersichtskarte; vkap = kapillarer Aufstiegsrate aus dem Grundwasser; nFK = nutzbare Feldkapazität; nFKWE = nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum; PET = potenzielle Evapotranspiration; WE = effektiver Wurzelraum

Die Häufigkeitsverteilungen der jährlichen Wasserdefizite (AET-PET) sind für die ausgewählten Dekaden in Abb. 4 dargestellt. Für die Modellierung der Szenarien wurden die Bestandesdaten (Alter, Bestockung) aus Vergleichbarkeitsgründen konstant gehalten. Die zweigipfelige Verteilung dieser Wasserdefizite ist auf die Differenzierung des Kollektivs in grundwassernahe und -ferne Standorte zurückzuführen. Bei den grundwassernahen Rasterpunkten ist eine positive Bilanz zu verzeichnen. Die tatsächliche Verdunstung liegt hier über der Grasreferenzverdunstung, bei der es sich um die Verdunstung einer Grasdecke auf standardisiertem Boden handelt. Wälder können aufgrund ihrer größeren Verdunstungsfläche die Grasreferenzverdunstung übertreffen, wenn die Transpiration der Bäume bei optimalen Grundwasserflurabständen nicht durch die Bodenwasser-  
 verfügbare-keit limitiert wird.

Für die grundwasserfreien Flächen liegt das Wasserdefizit indes schon heute (D2005) deutlich im negativen Bereich. Die Modellierung mit den szenarischen Klimadaten (D2055, D2095) weist auf eine Zunahme der zu erwartenden Wasserdefizite. Der Vergleich der Diagramme zeigt

darüber hinaus aber auch, dass es eine nicht unerhebliche Überschneidung der Verteilungskurven der verschiedenen Dekaden gibt. Betrachtet man die grundwasserfernen Standorte, weisen ca. 142.000 Rasterpunkte in der Dekade D2005 Wasserdefizite auf, die innerhalb der Wertespanne (10- bis 90-Perzentil) der Dekade D2095 liegen. Dieses zeigt, dass heute auf einem Flächenanteil von ca. 16% der grundwasserfernen Standorte Ausprägungen von Wassermangel auftreten, wie sie klimawandelbedingt zukünftig verbreitet sein werden. Dieses ermöglicht die Ausweisung von Flächen, die für ein „prognostizierendes Klima-Monitoring“ (RIEK et al. 2013), d. h. für die Beobachtung artspezifischer Reaktionsnormen im laufenden Witterungsgeschehen und Projektion in die Zukunft, besonders geeignet sind.

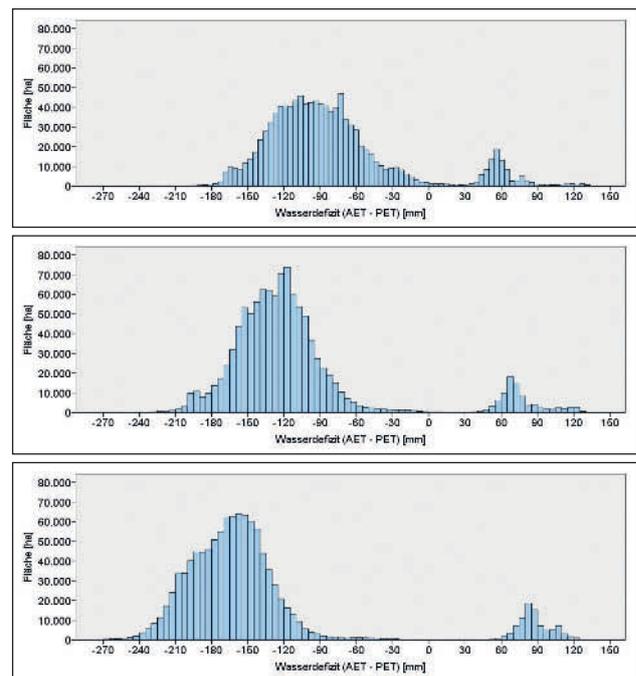


Abb.4: Häufigkeitsverteilungen der Differenzen aus aktueller und potenzieller Evapotranspiration (Wasserdefizit) modelliert für die Dekaden D2005 (oben), D2055 (Mitte) und D2095 (unten) für konstante Bestandesdaten

Für den in Tab. 4 dargestellten Vergleich der Wasserdefizite in den Dekaden D2005, D2055 und D2095 wurde zwischen grundwasserfernen und grundwassernahen Standorten unterschieden. Als Grenzkriterium dienten kapillare Aufstiegsraten größer bzw. kleiner als 10 mm/a. Bei den grundwasserfernen Standorten nimmt das Wasserdefizit im Szenarienzeitraum (2000–2100) von durchschnittlich 98 mm auf 165 mm zu. Auch die 10- und 90-Perzentile aller Szenarien weisen hier negative Werte auf. Bei den vom Grundwasser beeinflussten Standorten sind nur die 10-Perzentile negativ. Im Durchschnitt (Median) ist die Differenz AET-PET bei diesen Standorten positiv. Insbesondere wird durch den regionalen Klimawandel zunehmend Wasser über die Grasreferenzverdunstung hinausgehend aus dem Grundwasserspeicher entnommen, so dass die Bilanzwerte für die Grundwasserstandorte ansteigen. Voraussetzung hierfür ist allerdings die bislang unterstellte Modellannahme, dass das Grundwasser in Zukunft nicht unter die minimalen Grundwasserstände des Zeitraums 1960 bis 2010 fällt (s. o.).

Jahr	Flächen mit kap. Aufstiegsraten	Wasserdefizit (AET - PET)			n
		10%	Med	90%	
2005	$v_{\text{kap}} < 10 \text{ mm/a}$	-140	-98	-53	940.324
	$v_{\text{kap}} > 10 \text{ mm/a}$	-82	53	79	135.898
2055	$v_{\text{kap}} < 10 \text{ mm/a}$	-166	-128	-93	949.924
	$v_{\text{kap}} > 10 \text{ mm/a}$	-109	65	96	126.298
2095	$v_{\text{kap}} < 10 \text{ mm/a}$	-207	-165	-131	946.515
	$v_{\text{kap}} > 10 \text{ mm/a}$	-137	80	105	129.707

Tab.4: Wasserdefizite (AET-PET) für die Dekaden D2005, D2055 und D2095 differenziert nach Grundwassernähe (kapillare Aufstiegsraten  $v_{\text{kap}}$  kleiner / größer 10 mm/a)

Für eine erste Abschätzung und regionale Darstellung des Störungspotenzials infolge verschlechterter Wasserhaushaltsbedingungen wurde für die grundwasserfernen Standorte die Veränderung des Wasserdefizits  $\Delta$  (AET-PET)<sub>2005,2095</sub> wie folgt berechnet:

$$\Delta (\text{AET-PET})_{D2005,D2095} = [(\text{AET-PET})_{D2005} - (\text{AET-PET})_{D2095}] * (-1)$$

Umso negativer die berechneten Werte, desto größer ist das zu erwartende Störungspotenzial für die Waldbestände, da davon auszugehen ist, dass diese mehr oder weniger an die aktuelle Wasserverfügbarkeit angepasst sind. Zwischen den Dekaden D2005 und D2095 nimmt das Wasserdefizit im Mittel aller grundwasserfernen Rasterpunkte um 71 mm zu (Minimum: 8 mm, Maximum: 171 mm). Die regionale Verteilung der Werte geht aus dem Kartogramm in Abb.5 hervor. Danach findet die stärkste Veränderung des Wasserdefizits (AET-PET) im Südosten Brandenburgs statt und umfasst das Wuchsgebiet *Düben-Niederlausitzer Altmooränerland* sowie die Wuchsbezirke *Beskower Platte* und östlicher *Berlin-Fürstenwalder Talsand*. Eine überdurchschnittliche Verschlechterung des Wasserhaushalts ist ferner auch im Osten des Wuchsgebiets *Nordbrandenburger*

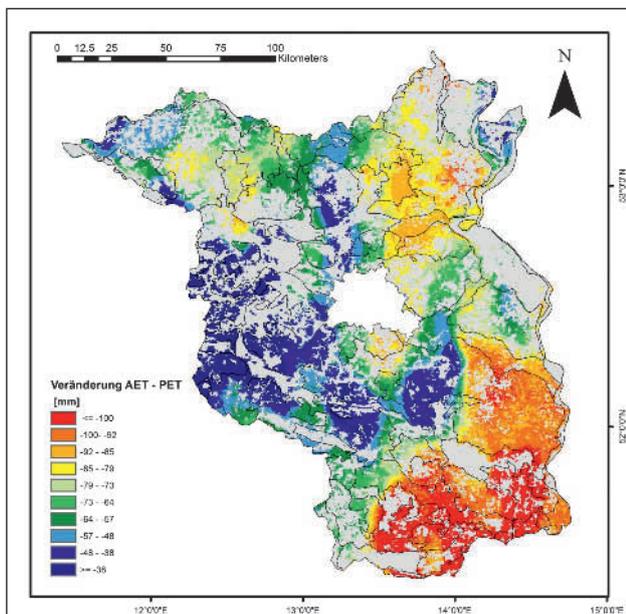


Abb.5: Kartogramm der Veränderung des Wasserdefizits (AET-PET) zwischen den Dekaden D2005 und D2095 für grundwasserferne Standorte

*Jungmoränenland* insbesondere in den Wuchsbezirken *Angermünder-Strasburger Grundmoräne* sowie *Eberswalder Talabschnitt* und *Kienschorfheide* zu erwarten

## 4 Anwendung in Forstplanung und -praxis

Im Ergebnis der flächendeckenden Szenariorechnungen wird deutlich, dass durch den Klimawandel bedeutende Veränderungen des Wasserhaushalts der brandenburgischen Waldökosysteme zu erwarten sind. Insgesamt wird die Wahrscheinlichkeit für Wassermangel und damit verbundenen Trockenstress während der Vegetationsperiode zunehmen. Bedingt durch großräumige Unterschiede der klimatischen Parameter und durch die Variabilität der bodenphysikalischen und -hydraulischen Standortseigenschaften zeichnen sich regionale und lokale Muster der Wasserhaushaltskenngößen und deren Veränderung bis zum Jahr 2100 ab. Analoge Befunde zu den zu erwartenden Veränderungen des Wärmehaushalts wurden bereits publiziert (RIEK et al. 2013). Insgesamt ist davon auszugehen, dass sich im Zuge des regionalen Klimawandels die Grenzen zwischen den derzeitigen Wuchsgebieten verschieben und sich neue räumliche Strukturen herausbilden werden. Die Dynamisierung ökologisch begründeter Wuchsräume und deren waldbauliche Neuinterpretation erscheinen vor diesem Hintergrund zwingend erforderlich, um die Gefahr von Fehlentscheidungen in der forstlichen Planung gering zu halten.

Um sowohl die dargelegten Befunde zum Wasserhaushalt als auch die Ergebnisse abgeschlossener Auswertungen zur Veränderung des Wärmehaushalts praktisch umsetzen und für die Forstplanung nutzbar machen zu können, sollten diese in den Entscheidungsprozess bei der Ableitung von Bestandeszieltypen einfließen. Hierzu wurde ein Ansatz auf der Grundlage statistischer Klassifikationsmodelle entwickelt. Durch diesen sollen einerseits die wissenschaftlichen Erkenntnisse aus Szenariorechnung, Modellierung und Regionalisierung und andererseits das empirische Wissen der vor Ort agierenden Forstpraktiker, das sich im derzeit ausgewiesenen Bestandeszieltyp manifestiert, miteinander verknüpft werden. Konkret waren hierzu zunächst die im Datenspeicher Wald ausgewiesenen Bestandesszieltypen als Funktion der regionalisierten Standortseigenschaften darzustellen und darauf aufbauend Schätzer für Bestandeszieltypen in die Fläche zu übertragen. Eine dynamische Komponente erhalten diese Zieltypen anschließend durch die Verwendung von szenarischen Klimadaten bei der Berechnung der berücksichtigten Standortparameter.

### 4.1 Statistische Ableitung von „dynamischen Bestandeszieltypen“

Gegenwärtig erfolgt die Ableitung eines standörtlich geeigneten Bestandeszieltyps anhand der qualitativen Angaben aus der Forstlichen Standortskarte zu Nährkraft, Feuchte und Klima unter Verwendung des Bestandeszieltypenerlasses des Landes Brandenburg (MLUV 2006). Die Zuordnung zwischen Standort und Zieltyp basiert dabei auf den Prämissen der Standortgerechtigkeit, Naturnähe sowie einer Wirtschaftszielorientierung, die sich an der Wert- und Volumen-Leistungserwartung der Bestände bemisst. Im Bestandeszieltypenerlass finden sich in Abhängigkeit von

Nährkraft-, Feuchte- und Klimastufe meist zwischen 5 bis 15 (von insgesamt 46) definierten Bestandeszieltypen, die für den Einzelfall prinzipiell als möglich erachtet werden. Die konkrete bestandesweise Einzelplanung der Bestandeszieltypen erfolgt im Zuge der Forsteinrichtung. Hierbei stellt der Forsteinrichter zunächst seine Empfehlung aus dem Pool möglicher Bestandeszieltypen vor. Der Revierleiter hat dann in einem nächsten Schritt die Möglichkeit auf diese Empfehlung Einfluss zu nehmen und Einwände geltend zu machen. Insbesondere bei diesem Schritt fließen Erfahrungen des ortskundigen Revierleiters in den Entscheidungsprozess ein, die unter anderem auch durch standörtliche lokale Gegebenheiten empirisch begründet sind. Der daraus abgeleitete Bestandeszieltyp wird im Datenspeicher Wald abschließend dokumentiert und in der Regel alle 10 Jahre überprüft und ggf. neu festgelegt.

Im Bestandeszieltyp manifestiert sich somit ganz wesentlich das empirische Wissen der Forsteinrichter und Revierleiter. Mit Hilfe von Diskriminanz- und Klassifikationsbaummodellen (KASS 1980) lässt sich dieses Wissen numerisch fassen, vereinheitlichen und zielgerichtet so bündeln, dass alle lokalspezifischen Standortbedingungen anschließend im Entscheidungsprozess der Baumartenwahl flächendeckend und in standardisierter Form berücksichtigt werden können. In einem ersten Schritt wurden mit dem Klassifikationsverfahren der Diskriminanzanalyse Modelle zur Schätzung der derzeit im Datenspeicher Wald dokumentierten Bestandeszieltypen anhand von regionalisierten Standortseigenschaften der Gesamtwaldfläche Brandenburgs entwickelt. Dabei konnten Angaben zum Bestandeszieltyp für 268.796 Rasterpunkte verwendet werden. Für maximale Stichprobenumfänge innerhalb der zu schätzenden Gruppen wurden die Bestandeszieltypen zunächst nach den Hauptbaumarten Buche, Eiche (TEi), Kiefer und Sonstige zusammengefasst. Ausschlaggebend für die Gruppierung der Bestandeszieltypen war die dominierende Baumart, die nach der Betriebsregelungsanweisung zur Forsteinrichtung im Landeswald BRA-Brandenburg (LFE 2000) mit mehr als

50% am Bestandeszieltyp beteiligt ist. Es wird angestrebt in zukünftigen Auswertungen die Gruppe der sonstigen Baumarten noch weiter zu unterteilen, was hinsichtlich des Stichprobenumfangs prinzipiell möglich erscheint. Auch soll das Verfahren später auf die Nebenbaumarten der Bestandeszieltypen ausgeweitet werden.

Nach Ermittlung der Diskriminanzmodelle wurden in einem zweiten Schritt für die Fläche ohne Angaben zum Bestandeszieltyp (807.426 Rasterpunkte) diese bzw. deren Hauptbaumarten aus den diskriminierenden Standortparametern geschätzt. Schließlich flossen in einem dritten Schritt die Daten der Klimaszenarien für die Dekaden D2055 und D2095 in die Entscheidungsmodelle ein, um erneut Hauptbaumarten der Bestandeszieltypen zu schätzen. Bei der Wasserhaushaltsmodellierung und Anwendung von Pedotransferfunktionen wurde bei diesem Schritt einheitlich ein Bestandesalter von 100 Jahren angenommen. Zudem erfolgte die Modellierung an jedem Punkt sowohl für einen Laubbaum- als auch für einen Nadelbaumbestand. Der Vergleich der ermittelten Zuordnungswahrscheinlichkeiten für die Bestandeszieltypen bzw. Hauptbaumarten erfolgte dann ausschließlich für die jeweils passenden Modelltypen (Laubbaum-Modell: Eiche, Buche, Sonstige Laubbaumarten; Nadelbaummodell: Kiefer, Sonstige Nadelbaumarten).

Als diskriminierende Parameter wurden das Wasserdefizit – berechnet aus AET-PET – sowie die von RIEK et al. (2013) abgeleiteten Hauptkomponenten des Wärmehaushalts als Kovariaten verwendet. Bei letzteren handelt es sich um diverse aus täglichen Temperaturangaben berechnete Durchschnittswerte, Über- und Unterschreitungen von Temperaturschwellenwerten, Wärmesummen usw., die mit dem Verfahren der Hauptkomponentenanalyse verdichtet worden waren.

Damit erscheint der Einfluss des Wasser- und Wärmehaushalts hinreichend berücksichtigt. Da die Regionalisierung von Kennwerten des Nährstoffhaushalts bislang noch nicht erfolgt ist, wurde dieser vorläufig vereinfacht durch die Nährkraftstufen nach SEA 95 (SCHULZE 2005) berücksichtigt. Die Nährkraft

Buche		geschätzt (n)		korrekt [%]	korrekt gesamt [%]
		nein	ja		
tatsächlich	nein	195.081	52.333	78,8	<b>78,6</b>
	ja	4.983	16.399	76,7	
Eiche		geschätzt (n)		korrekt [%]	korrekt gesamt [%]
		nein	ja		
tatsächlich	nein	139.594	82.735	62,8	<b>62,6</b>
	ja	17.969	28.498	61,7	
Kiefer		geschätzt (n)		korrekt [%]	korrekt gesamt [%]
		nein	ja		
tatsächlich	nein	64.145	35.384	64,4	<b>71,5</b>
	ja	41.177	128.090	75,7	
Sonstige Baumarten		geschätzt (n)		korrekt [%]	korrekt gesamt [%]
		nein	ja		
tatsächlich	nein	209.470	27.373	88,4	<b>85,1</b>
	ja	12.695	19.258	60,3	

Tab.5: Vergleich von tatsächlichen und vorhergesagten Gruppenzugehörigkeiten für die Hauptbaumarten Buche, Eiche, Kiefer und Sonstige in der Dekade D2005

der Standorte wurde anhand der Feinbodenformen in Form von insgesamt 25 rangskalierten Stufen von reich bis arm ( $R^1, R^2, \dots, A^4, A^5$ ) semiquantitativ parametrisiert.

Mit den Daten der Dekade D2005 wurden insgesamt vier Diskriminanzanalysen, d. h. für jede Hauptbaumart eine eigenständige Analyse auf der Grundlage der 268.796 Rasterpunkte umfassenden Stichprobe durchgeführt. Die Baumarten Buche, Eiche, Kiefer und Sonstige gehen jeweils als dichotomisierte Zielvariablen in die Analyse ein. Für ihre Gruppenzuordnung werden in Abhängigkeit von den Standortseigenschaften Zuordnungswahrscheinlichkeiten geschätzt.

#### 4.2 Modellergebnisse und Interpretation

Bei allen Diskriminanzanalysen erwiesen sich das Wasserdefizit AET-PET und die Nährkraftstufe als signifikante Diskriminanzparameter. Von den berücksichtigten Kennwerten des Wärmehaushaltes besitzen die folgenden drei voneinander stochastisch unabhängigen Kennwerte die höchste Trennkraft zwischen den Hauptbaumarten und wurden im finalen Modell als Dekadenmittelwerte berücksichtigt:

- 1) Temperatursumme bis zum Zeitpunkt 15.04., ermittelt durch Addition der gewichteten Tagesmitteltemperaturen  $>0^\circ\text{C}$  ab Jahresbeginn (Gewichtung im Januar mit Faktor 0,5; im Februar mit Faktor 0,75; ab März mit Faktor 1)
- 2) Minimale Tagesmitteltemperatur in der Nichtvegetationszeit; alternativ: Anzahl „kalter Tage“ (= Tage mit Tagesmitteltemperatur  $<10^\circ\text{C}$ )
- 3) „Spätfrostsumme“ (= Summe der Tagesminimumtemperaturen aller Tage mit Tagesminimumtemperatur  $<0^\circ\text{C}$  in den Monaten April und Mai)

Durch das entwickelte Diskriminanzmodell werden aufgrund der genannten Standortparameter zwischen 62% und 85% der Gruppenzugehörigkeiten korrekt klassifiziert. Bei der Baumart Eiche ist die Vorhersagegenauigkeit im Vergleich zu den anderen Baumarten am schlechtesten (Tab. 5). Insgesamt erscheint die Trefferquote aber befriedigend, wenn berücksichtigt wird, dass der Standort bei der Findung des Bestandeszieltyps vor Ort nicht das alleinige Entscheidungskriterien darstellt.

Da bei dieser Analyse lineare Diskriminanzmodelle verwendet wurden, kommt es beim Einsatz der szenarischen Klimadaten teilweise zu ausreißenden Diskriminanzwerten,

welche die Gruppenzuordnung dann fraglich erscheinen lassen. Daher wurde für die Schätzung der Bestandeszieltypen für die Dekaden D2055 und D2095 das Klassifikationsbaumverfahren der CHAID-Analyse (KASS 1980) verwendet. Bei der Entwicklung des Klassifikationsbaums gingen die Gruppenzugehörigkeiten aller Punkte der Dekade D2005 und dieselben Prädiktoren wie bei der vorausgegangenen Diskriminanzanalyse ein. Die Modellbewertung erfolgte durch Kreuzvalidierung.

Die Anwendung der szenarischen Klimadaten wirkt sich maßgeblich auf die Kennzeichnung des standörtlichen Wasser- und Wärmehaushalts aus und führt zu entsprechend abweichenden Wahrscheinlichkeiten bei der Gruppenzuordnung. Am Beispiel der Buche zeigt dies Abb.6 vergleichend für die drei Dekaden. Auffallend ist hier, dass die prozentuale Zuordnungswahrscheinlichkeit für Buche zwischen den Dekaden D2005 und D2055 regional ansteigt, dann aber bis zur Dekade 2095 insgesamt sehr deutlich abnimmt.

Die dargestellten Zuordnungswahrscheinlichkeiten an jedem Rasterpunkt sind im statistischen Sinne als durchschnittliche Bestandeszieltypempfehlung aller in Brandenburg am Entscheidungsprozess beteiligten Akteure zu interpretieren und stehen für deren auf standörtlicher Grundlage objektiviertes und standardisiertes Erfahrungswissen.

Die Anteile der Bestandeszieltypen mit den Hauptbaumarten Buche, Kiefer, Eiche und Sonstige innerhalb der Wuchsbezirke sind in Abb. 7 für die Dekaden D2005, D2055 und D2095 vergleichend dargestellt. Für jeden Rasterpunkt wurde hierbei die Hauptbaumart mit der höchsten Zuordnungswahrscheinlichkeit zugrunde gelegt. Die Quantitäten sind als vorläufig anzusehen und sollten hier in erster Linie dazu dienen, die prinzipiellen Möglichkeiten des verwendeten Ansatzes zu präsentieren und zur Diskussion zu stellen. Gleichwohl lassen sich aus den vorläufigen Ergebnissen Trends erkennen, wonach die Buche als Hauptbaumart des Bestandeszieltyps langfristig flächenmäßig eine geringere Bedeutung einnehmen wird und dieses vor allem zugunsten der Hauptbaumart (Trauben-)Eiche. Es ist ausdrücklich zu betonen, dass hierbei das genetische und physiologische Anpassungspotenzial der Baumarten möglicherweise nicht hinreichend berücksichtigt ist, da das entwickelte Entscheidungsmodell ausschließlich auf dem bislang vorliegenden Wissen zu den Standorts-Leistungsbezügen der Baumarten, wie sie aktuell bei der Baumartenwahl zugrunde gelegt werden, basiert. Es gilt nun das Wissen über die Anpassungs-

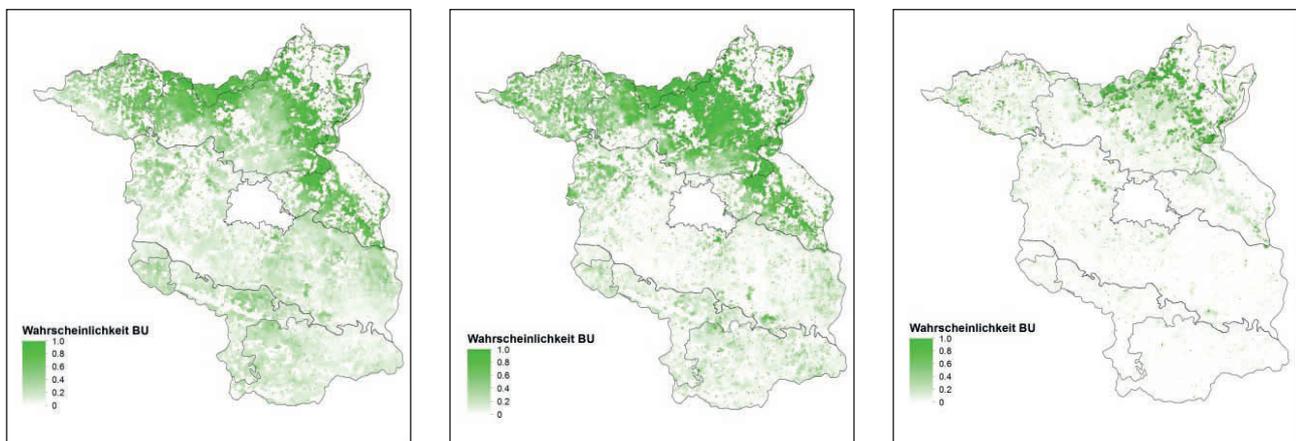


Abb.6: Wahrscheinlichkeit für die Zuordnung von Bestandeszieltypen mit der Hauptbaumart Buche in den Dekaden D2005, D2055 und D2095 (die Werte von 0 bis 1 entsprechen 0–100% Zuordnungswahrscheinlichkeit)

fähigkeiten der Baumarten in ausgewählten Gebieten, die sich für ein Klimamonitoring besonders eignen, zu vertiefen. Hierzu wurden anhand der Wärmehaushaltskomponenten bereits Vorschläge unterbreitet (RIEK et al. 2013), die unter Berücksichtigung der regionalen Ausprägung von Kennwerten zum Wasserhaushalt weiter zu konkretisieren sind.

Darüber hinaus zeigen die vorliegenden Befunde aber auch, dass es in der Dekade D2095 Flächen geben wird, die sich für Bestandeszieltypen mit Buchendominanz eignen werden. Die Aufgabe der aktuellen Waldumbauplanung sollte es daher sein, diese Areale beim Waldumbau mit Buche prioritär zu behandeln.

### 5 Ausblick

Der Klimawandel hat fundamentale Unsicherheiten bei der forstlichen Planung zur Folge. Ein transdisziplinärer Ansatz für die Anpassung lokaler waldbaulicher Entscheidungen an die derzeit als am wahrscheinlichsten geltenden Klimaszenarien wurde aufgezeigt. Die Herausforderung der Zukunft wird darin bestehen, einerseits die Regionalisierungsansätze auf eine noch bessere Datengrundlage zu stützen und zum zweiten die Ergebnisse verstärkt in die Praxis zu integrieren und als festen Bestandteil der nachhaltigen Forstplanung zu etablieren.

Perspektivisch sind in diesem Zusammenhang nachstehende Schritte zielführend:

- 1) Parametrisierung der Nährstoffverfügbarkeit und Regionalisierung
- 2) Integration des neu verfügbaren DGM2, welches mit einer Höhenauflösung von +/- 15 cm fundamental verbesserte Genauigkeiten der hier entwickelten maßgeblich auf Reliefkennwerten basierenden Regionalisierungsmodelle ermöglichen wird
- 3) Verwendung verbesserter Klimaregionalmodelle sowie aktualisierter Klimaszenarien
- 4) Integration aktualisierter Bestandeszieltypen aus dem Datenspeicher Wald und fortgesetzte Verbesserung des transdisziplinären Entscheidungsmodells in einem iterativen Prozess

Auf die beständige Ausweisung von Bestandeszieltypen ist dabei besonderer Wert zu legen, denn über diese fließt das aktuelle Praxis- und Erfahrungswissen kontinuierlich in den iterativen Prozess der Modellentwicklung ein. Umgekehrt

werden sich neue wissenschaftliche Erkenntnisse zur Baumarteneignung im Bestandeszieltypenkatalog niederschlagen. In dieser Form der Rückkopplung sehen die Autoren in besonderem Maße Möglichkeiten den Forschungs- und Entwicklungsprozess voranzubringen und praxisrelevante Handlungs- und Lösungsstrategien für die nachhaltige Waldnutzung im Klimawandel zu entwickeln.

Darüber hinaus und parallel gilt es, ein Konzept für das Klimamonitoring weiterzuentwickeln, das der Überwachung von Reaktionen der Baumarten in klimatischen Extremjahren und auf hinsichtlich ihrer Klimasensitivität besonders exponierten Standorten dient. Bei den Häufigkeitsverteilungen der AET-PET-Werte der Dekaden D2005 und D2095 zeigte sich, dass es einen Überlappungsbereich der Merkmalsausprägungen gibt (Abschn.2.4). Hierin besteht die Chance für ein „prognostizierendes Klimamonitoring“, da sich zukünftige Störungen des Wasserhaushaltes und Adaptionsprozesse in diesen „Weisergebieten“ in situ bereits jetzt beobachten lassen. Ähnliches wurde auch hinsichtlich der Kennwerte des Wärmehaushalts beschrieben (RIEK et al. 2013). Das bestehende Monitoring und Versuchsflächendesign stellt daher auch in diesem Zusammenhang weiterhin ein unverzichtbares Werkzeug der Forstplanung dar.

Zusammenfassend sind in Abb.8 die essentiellen Grundlagen für die Ableitung „dynamischer Bestandeszieltypen“ schematisch illustriert.

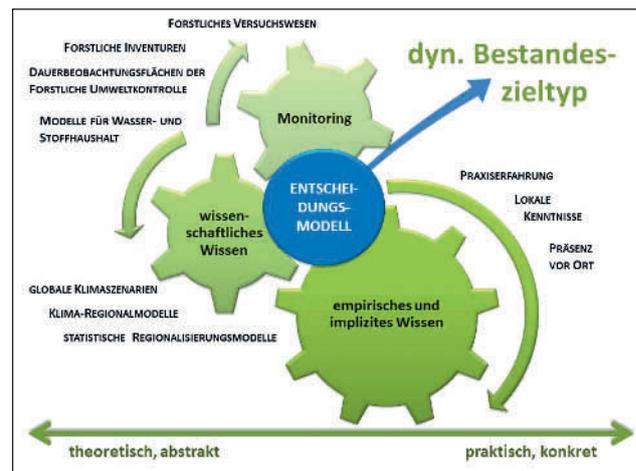


Abb. 8: Forstliche Planung im Klimawandel als transdisziplinärer Prozess

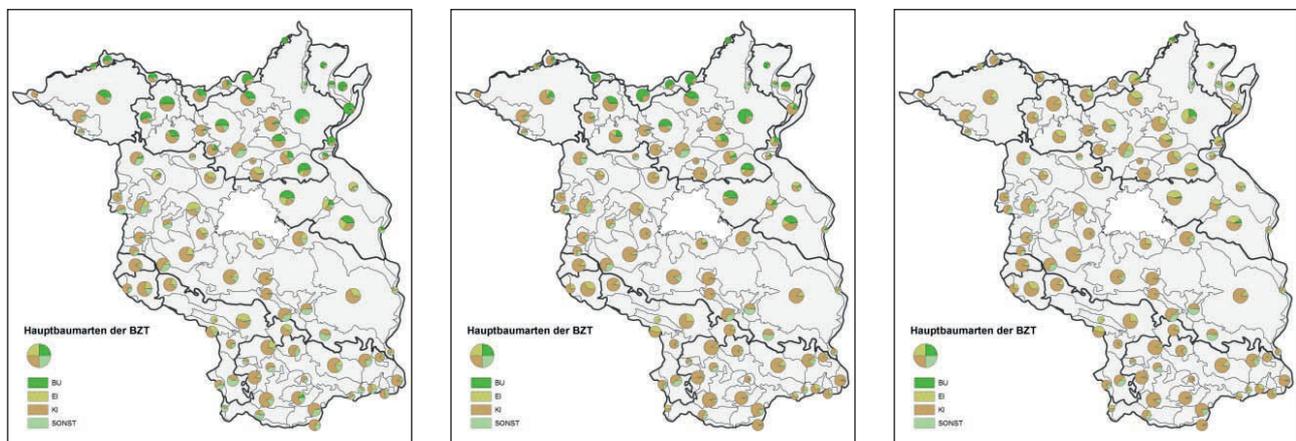


Abb. 7: Anteile der Bestandeszieltypen nach Hauptbaumarten in den forstlichen Wuchsbezirken für die Dekaden D2005, D2055 und D2095 (die Größe der Tortendiagramme korrespondiert mit der Waldfläche im jeweiligen Wuchsbezirk)

## 6 Zusammenfassung

Im vorgestellten Projekt soll ein dynamisches, d. h. den Klima- und Standortwandel auf der Gesamtwaldfläche Brandenburgs berücksichtigendes Planungsinstrument für nachhaltige forstliche Planungsprozesse im Landschaftsmaßstab entstehen. Hierzu wurde ein Ansatz zur Ableitung der Hauptbaumart von „dynamischen Bestandeszieltypen“ entwickelt. Grundlage dafür bilden einerseits flächendeckend regionalisierte Standorteigenschaften für die Dekaden 2000–2010, 2050–2060 und 2090–2100 und andererseits aktuell im Datenspeicher Wald ausgewiesene Bestandeszieltypen, die mittels eines statistischen Klassifizierungsansatzes miteinander verknüpft werden. In diesem Ansatz verschmelzen somit wissenschaftliches Wissen in Form von Szenariorechnungen und multivariat-statistischen Regionalisierungsmodellen mit relevantem Praxiswissen, wie es die empirischen Erkenntnisse zur Baumarteneignung an konkreten Standorten darstellen und im Bestandeszieltyp zum Ausdruck kommen. Der Ansatz kann insofern als Beispiel für eine explizit transdisziplinäre methodische Herangehensweise an das vor dem Hintergrund regionaler Klimaveränderungen zunehmend komplexer werdende Problem der nachhaltigen forstlichen Planung betrachtet werden.

Der vorliegende Beitrag widmet sich in erster Linie den Ergebnissen zur Veränderung des Wasserhaushalts durch Klimawandel. Es werden auf der Grundlage von Szenariorechnungen mit dem Regionalmodell WettReg und dem Wasserhaushaltsmodell TUB-BGR raum-zeitliche Muster des Wasserdefizits (AET-PET = Differenz von aktueller und potenzieller Evapotranspiration) präsentiert. Das Wasserdefizit wird demnach bis zum Jahr 2100 regional in unterschiedlichem Ausmaß zunehmen und zu erhöhtem Trockenstress in der Vegetationszeit führen.

Aufbauend auf diesen Befunden werden mögliche Konsequenzen für die Baumartenwahl räumlich differenziert für die Gesamtwaldfläche auf statistischer Basis quantifiziert. Im Ergebnis von Diskriminanz- und Klassifikationsbaumanalysen werden Empfehlungswahrscheinlichkeiten für die Hauptbaumarten von „dynamischen Bestandeszieltypen“ vorgelegt.

## 7 Literatur

ADAMS, W.A. (1973):

The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. *Journal of Soil Science* 24 (1): 10–17. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1973.tb00737.x>.

ALTERMANN, M., JÄGER, K.D., KOPP, D., KOWALKOWSKI, A., KÜHN, D., SCHWANECKE, W. (2008):

Zur Kennzeichnung und Gliederung von periglaziär bedingten Differenzierungen in der Pedosphäre. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* 6:5–42.

ARBEITSGRUPPE BODEN (2005):

Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 437 S.

BREIMAN, L., FRIEDMAN, J.H., OLSEN, R.A., STONE, C.J. (1984): *Classification and regression trees*. The Wadsworth Statistics/Probability Series, Wadsworth, Belmont, California, 358 S.

ENKE, W., DEUTSCHLÄNDER, T., SCHNEIDER, F., KÜCHLER, W. (2005a):

Results of five regional climate studies applying a weather pattern based downscaling method to ECHAM4 climate simulations. *Meteorol. Z.* 14: 247–257.

ENKE, W., SCHNEIDER, F., DEUTSCHLÄNDER, T. (2005b):

A novel scheme to derive optimized circulation pattern classifications for downscaling and forecast purposes. *Theor. Appl. Climatol.* 82: 51–63.

HANNAPPEL, S., RIEK, W. (2011):

Berechnung des Flurabstandes des oberflächennahen Grundwassers der Waldfläche Brandenburgs für hydrologisch typische Zeiträume. *Hydrologie und Wasserwirtschaft*. 55. Heft 1. S. 4–15.

HANNAPPEL, S., SUMMERER, R., REINHARD, S. (2009):

Ermittlung des Flurabstandes des oberflächennahen Grundwassers für die gesamte Waldfläche Brandenburgs. Unveröffentlichter Bericht im Auftrag des Landesbetriebs Forst Brandenburg, 70 S.

KASS, G.V. (1980):

An Exploratory Technique for Investigating Large Quantities of Categorical Data. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* 29 (2): 119–127. URL <http://www.jstor.org/stable/2986296>.

KEMPEN, B., BRUS, D.J., STOOVVOGEL, J.J. (2011):

Three-dimensional mapping of soil organic matter content using soil type-specific depth functions. *Geoderma* 162 (1–2): 107–123.

KONOPATZKY, A. (1998):

Informationen der Standortskarten zu grundwasserfernen Sandstandorten Brandenburgs als Hilfe bei der Auswahl von Flächen für die Laubholzverjüngung sowie zur Abschätzung der standörtlichen Leistungsfähigkeit - Berücksichtigung des substratbedingten Wasserhaushaltes, der Körnung im Oberboden und der Kalktiefe. Unveröffentlichter Bericht – Landesforstanstalt Eberswalde.

KONOPATZKY, A. (2012):

Das Wasser macht's – Substratfeuchte in der forstlichen Standortsgliederung – erste Skalierungs- und Bewertungsansätze in Brandenburg. In: Wissenstransfer in die Praxis – Beiträge zum 7. Winterkolloquium. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 49. Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft (MIL) des Landes Brandenburg, S. 73–82

KOPP, D., JOCHHEIM, H. (2002):

Forstliche Boden- und Standortformen des nordostdeutschen Tieflands als Datenbasis für die Landschaftsmo- dellierung. Kessel Verlag, Remagen-Oberwinter, 207 S.

- KREIENKAMP, F., SPEKAT, A. (2009):  
Regionalisierung standortsbezogener Kenwerte (1 x 1 km Raster-Interpolation) für Brandenburg. CEC, Potsdam GmbH. Unveröffentlichter Bericht im Auftrag des Landesbetriebs Forst Brandenburg. Potsdam: 30 S.
- LFE (2000):  
Betriebsregelungsanweisung zur Forsteinrichtung im Landeswald BRA – Brandenburg. Landesforstanstalt Eberswalde. (unveröffentlicht)
- MCBRATNEY, A., MENDONCA-SANTOS, M., MINASNY, B. (2003):  
On digital soil mapping. *Geoderma* 117: 3–52. URL [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).
- MLUV (2006):  
Bestandeszieltypen für die Wälder des Landes Brandenburg. Ministerium für ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hrsg.). [http://www.brandenburg.de/sixcms/media.php/4055/bzt\\_brdb.pdf](http://www.brandenburg.de/sixcms/media.php/4055/bzt_brdb.pdf).
- RENGER, M., STREBEL, O. (1980):  
Berechnungsbedarf landwirtschaftlicher Kulturen in Abhängigkeit vom Boden. *Wasser und Boden* 32 (12): 572–575.
- RIEK, W. (1995):  
Standorteigenschaften, Wuchsleistung und Schädigung von Kiefern- und Eichenforsten im Berliner Raum, Bodenökologie und Bodengenese, Bd. 16. Selbstverlag Technische Universität Berlin, 144 S.
- RIEK, W. (2010):  
Regionale und standortsbedingte Unterschiede zu den Auswirkungen des Klimawandels. *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe / Wissenstransfer in die Praxis*, Bd. 44: 38–48.
- RIEK, W., KALLWEIT, R., RUSS, A. (2013):  
Analyse der Hauptkomponenten des Wärmehaushalts brandenburgischer Wälder auf der Grundlage von regionalen Klimaszenarien. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* 13: 17–32. URL <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0041-afsv-01350>.
- RUSS, A., RIEK, W. (2011a):  
Methode zur Ableitung des Grundwasserflurabstandes aus Karten der forstlichen Standortkartierung und digitalen Geländemodellen in Brandenburg. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* 12: 85–91. URL <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0041-afsv-01293>.
- RUSS, A., RIEK, W. (2011b):  
Pedotransfunktionen zur Ableitung der nutzbaren Feldkapazität – Validierung für Waldböden des nordeutschen Tieflands. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* 11: 5–17. URL <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0041-afsv-01139>.
- RUSS, A., RIEK, W. (2011c):  
Vergleich zweier Ansätze zur Ableitung von Grundwasserflurabständen für die Waldfläche Brandenburgs. In: Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 2011: Böden verstehen – Böden nutzen – Böden fit machen. *Berichte der DGB*, S. 4. URL <http://eprints.dbges.de/552>.
- RUSS, A., RIEK, W., WESSOLEK, G. (2013):  
Regionalisierung bodenphysikalischer Kennwerte auf Grundlage forstlicher Standortskarten. In: Ausgleichs- und Reaktorfunktionen von Waldböden im Stoff- und Wasserkreislauf – Gemeinsames Kolloquium des DBG-Arbeitskreises Waldböden, der Sektion Wald und Wasser im DVFFA und der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft in Freiburg am 4.–5. Oktober 2012. *Freiburger Forstliche Forschung*, Freiburg. Heft 96. 113–127.
- SCHULZE, G. (2005):  
Anleitung für die forstliche Standorterkundung im nordostdeutschen Tiefland – (Standorterkundungsanleitung) SEA 95, Bd. D – Bodenformen-Katalog. 424 S.
- SPEKAT, A., ENKE, W., KREIENKAMP, F. (2007):  
Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WettReg auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Forschungsbericht des CEC Potsdam GmbH im Rahmen des FuE-Vorhabens „Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland – Phase I: Erstellung regionaler Klimaszenarios für Deutschland“ des Umweltbundesamtes: 106 S.
- WESSOLEK, G., DUIJNISVELD, W., TRINKS, S. (2008):  
Hydro-pedotransfer functions (HPTFs) for predicting annual percolation rate on a regional scale. *J. Hydrol.* 356 (1–2): 17–27. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.007>.
- WESSOLEK, G., DUIJNISVELD, W.H., TRINKS, S. (2009):  
Hydro-Pedotransferfunktionen zur Berechnung der Sickerwasserrate aus dem Boden – das TUB-BGR-Verfahren. In: *Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. Bodenökologie und Bodengenese*, Bd. 40. Technische Universität Berlin, Selbstverlag, S. 66–80.

### Danksagung

Unser besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Gerd Wessolek, TU Berlin, für die Beratung beim Einsatz des TUB-BGR-Wasserhaushaltsmodells und Frau Rea Schneider, HNEE, für die Erstellung von kartografischen Abbildungen.