

# **Endbericht**

**Kennzeichen: 203015**

**Auftragnehmer:** Technische Universität Berlin  
Institut für Ökologie, FG Standortkunde und Bodenschutz  
Salzufer 12, 10587 Berlin  
Tel.: 030-31473533, Fax: 030-31473548  
Email: Gerd.Wessolek@TU-Berlin.de

Auftragsbezeichnung: GLOWA-Elbe, Teilthema „Spreewald“ (TV2.6):

## **Auswirkungen von Klimaänderungen auf bodenhydrologische Zustandsgrößen:**

Veränderungen des Bodenwasserhaushaltes, der Biomasseproduktion  
und der Degradierung der Niedermoore  
als Folgen des globalen Wandels

Laufzeit des Auftrags: 01.05.00 – 30.04.03

Berichtszeitraum: 2000-2003

Bearbeiter: Prof. Dr. Gerd Wessolek  
Dipl.-Ing. Marco Lorenz  
Dr. Kai Schwärzel  
Dr. Matthis Kayser

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>2</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Zielstellung</b> .....	<b>9</b>
<b>2 Voraussetzung zur Durchführung des Projektes</b> .....	<b>9</b>
<b>3 Planung und Ablauf des Projektes</b> .....	<b>9</b>
<b>4 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde</b> .....	<b>10</b>
<b>5 Arbeitsschritte</b> .....	<b>111</b>
<b>6 Methodik</b> .....	<b>12</b>
6.1 Erstellung einer Bodenartenhauptgruppenkarte für den Spreewald.....	12
6.2 Berechnung des Bodenwasserhaushaltes .....	13
6.3 Berechnung des Grünlandertrages .....	17
6.4 Berechnung des Torfschwundes und der Lebensdauer der Moore .....	19
<b>7 Ergebnisse</b> .....	<b>23</b>
7.1 Bodenartenhauptgruppenkarte .....	23
7.2 Bodenhydraulik .....	27
7.3 Bodenwasserhaushalt .....	37
7.4 Grünlandertrag .....	49
7.5 Torfschwund und Lebensdauer der Niedermoore im Spreewald.....	54
<b>8 Zusammenfassung</b> .....	<b>62</b>
<b>9 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse</b> .....	<b>64</b>
<b>10 Während der Bearbeitung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen</b> ...	<b>65</b>
<b>11 Danksagung</b> .....	<b>65</b>
<b>12 Literatur</b> .....	<b>66</b>
12.1 Projektliteratur.....	66
12.2 Literaturverzeichnis.....	68
12.3 Karten .....	71
<b>13 Anhang</b> .....	<b>72</b>
13.1 Bodenhydraulik .....	72
13.2 Kapillare Aufstiegsraten.....	74
13.3 Trockenstressfaktoren .....	76

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematische Darstellung des Simulationsmodells (nach WESSOLEK 1989) .....	13
Abb. 2: Modellparameter des Bodenwasserhaushaltsmodells (nach WESSOLEK 1989) .....	16
Abb. 3: Schematische Beziehung zwischen Ertragsdepression und mittlerem Grundwasserflurabstand [m] bei drei verschiedenen Böden (nach WESSOLEK 1989) .....	19
Abb. 4: Respirocondanlage der Firma Nordgreen Innovations zur Messung der CO <sub>2</sub> -Freisetzung.....	21
Abb. 5: Vorgehen bei der Berechnung und Regionalisierung des Torfschwundes .....	22
Abb. 6: Hauptgenesegruppen im Spreewald (nach BAURIEGEL ET AL. 2001).....	23
Abb. 7: Bodenarten(haupt)gruppen im Spreewald.....	25
Abb. 8: Flächenanteil der Bodenarten(haupt)gruppen im Untersuchungsgebiet Spreewald ...	26
Abb. 9: Flächenanteil der Landnutzungsklassen im Untersuchungsgebiet Spreewald .....	26
Abb. 10: Wasserretentionsfunktionen der einzelnen Bodenartengruppen im Spreewald.....	27
Abb. 11: Entwässerbares Porenvolumen der fünf Bodenartenhauptgruppen bei Grundwasserabsenkung .....	30
Abb. 12: Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeiten der einzelnen Bodenartengruppen im Spreewald .....	32
Abb. 13: Mittlerer kapillarer Aufstieg [mm] für die verschiedenen Bodenartengruppen in der Vegetationsperiode (01.04 - 30.09.) unter Grünland im Referenz- und B2-Basissszenario bei Durchwurzelungstiefen nach Tab. 9 .....	33
Abb. 14: Einfluss unterschiedlicher Böden und Nutzungen auf das pflanzenverfügbare Bodenwasser im Referenzszenario .....	36
Abb. 15: Niederschlag (Nd) .....	37
Abb. 16: FAO-Grasreferenzverdunstung (ET <sub>0</sub> ).....	38
Abb. 17: Potenzielle Verdunstung nach Haude (E_Haude).....	38
Abb. 18: Klimatische Wasserbilanz der DWD-Station Burg (Spreewald) für das jeweilige Gesamtjahr.....	39
Abb. 19: Klimatische Wasserbilanz (Niederschlag – FAO-Grasreferenzverdunstung) .....	40
Abb. 20: Klimatische Wasserbilanz (Niederschlag – potenzielle Verdunstung nach HAUDE (1955)) .....	41

Abb. 21: Reale Verdunstung (ETI) für die Variante Grünland auf Sand bei mittleren jährlichen Grundwasserständen von 30 cm und 90 cm unter GOF für die reale und die B2-Klimareihe .....	42
Abb. 22: Mittlere, langjährige reale Verdunstung [ $\text{mm a}^{-1}$ ] für unterschiedliche Böden und Nutzungen (Referenzszenario) .....	43
Abb. 23: Mittlere, langjährige reale Verdunstung [ $\text{mm a}^{-1}$ ] für unterschiedliche Böden und Nutzungen (B2-Basisszenario) .....	44
Abb. 24: Differenz der mittleren realen Verdunstungen zwischen Referenz- und B2-Basisszenario für unterschiedliche Böden und Nutzungen .....	44
Abb. 25: Verdunstung und Grundwasserneubildung ( $\text{GW}_{\text{neu}}$ ) für die Variante Grünland auf Torf .....	45
Abb. 26: Zusatzwasserbedarf im Referenz- und B2-Basisszenario .....	46
Abb. 27: Trockenstressfaktoren für Grünland bei einem Grundwasserstand von 30 cm unter GOF für die jeweilige Vegetationsperiode und die unterschiedlichen Bodenartengruppen .....	50
Abb. 28: Trockenstressfaktoren für Grünland bei einem Grundwasserstand von 90 cm unter GOF für die jeweilige Vegetationsperiode und die unterschiedlichen Bodenartengruppen .....	50
Abb. 29: Trockenstressfaktoren für die Variante Grünland auf Sand für drei unterschiedliche GW-Stände in der jeweiligen Vegetationsperiode .....	51
Abb. 30: Karte der potenziellen Grünlandertragsänderungen zwischen den Perioden 2003/07 und 2048/52 des B2-Basisszenarios .....	53
Abb. 31: $\text{CO}_2\text{-C}$ -Freisetzung [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ] bei unterschiedlichen Temperatur- und Feuchtestufen .....	54
Abb. 32: $\text{CO}_2\text{-C}$ -Freisetzung in Abhängigkeit von GW-Stand und Klimaverhältnissen im Vergleich unterschiedlicher Standorte .....	55
Abb. 33: Mittlerer Torfschwund [ $\text{mm/a}$ ] im zeitlichen Verlauf für die unterschiedlichen Szenarien .....	56
Abb. 34: Akkumulierter mittlerer Torfschwund [ $\text{mm}$ ] über den betrachteten Zeitraum .....	57
Abb. 35: Akkumulierte, mittlere $\text{CO}_2\text{-C}$ -Freisetzung [ $\text{t/ha}$ ] über den betrachteten Zeitraum..	58
Abb. 36: Unterschiede des Torfschwundes zwischen Referenz- und B2-Basiszenario in den einzelnen Staubereichen .....	59
Abb. 37: Torfschwund [ $\text{mm}$ ] zwischen 2003 und 2052 des B2-Basisszenarios .....	59
Abb. 38: Abschätzung der Abnahme der Lebensdauer von Niedermooren nach WESSOLEK ET AL. (1999) .....	61

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Zur Verfügung stehende Kartenwerke zur Ableitung einer Bodenkarten für den Spreewald .....	13
Tab. 2: Klasseneinteilungen innerhalb des Bodenwasserhaushaltsmodells.....	17
Tab. 3: Flächenanteil der Hauptgenesegruppen im Biosphärenreservat Spreewald .....	24
Tab. 4: Eigenschaften der einzelnen Bodenartengruppen im Spreewald.....	28
Tab. 5: Vergleich zwischen Mess- und Schätzwerten am Beispiel der Sande.....	28
Tab. 6: Kennwerte des Bodenwasserhaushalts der verwendeten Bodenartengruppen .....	29
Tab. 7: Vergleich der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf) in [cm/d] zwischen der eigenen Messung und den Werten nach AG BODEN (1994) .....	31
Tab. 8: Mittlerer kapillarer Aufstieg [mm] für die verschiedenen Bodenartengruppen innerhalb der Vegetationsperiode (01.04 - 30.09) im Referenz- und B2-Basisszenario bei Durchwurzelungstiefen nach Tab. 9 .....	34
Tab. 9: Durchwurzelungstiefen [dm] unter Grünland für die verschiedenen Bodenartengruppen bei unterschiedlichen Grundwasserständen .....	34
Tab. 10: Nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum (nFKwe) für unterschiedliche Durchwurzelungstiefen.....	35
Tab. 11: Mittlerer kapillarer Aufstieg ( $V_{\text{kap}}$ ) während der Vegetationsperiode im Referenz- und B2-Basisszenario für unterschiedliche GW-Stände und Wurzelräume.....	35
Tab. 12: Pflanzenverfügbare Wassermenge für die Vegetationsperiode von Grünland im Referenz- und B2-Basisszenario .....	35
Tab. 13: Mittlere Werte der Verdunstung der realen Klimareihe und der B2-Klimareihe .....	39
Tab. 14: Unterschiede der Eintrittshäufigkeiten verschiedener Indikatoren zwischen Referenz- und B2-Basisszenario für trockene, mittlere und feuchte Jahre .....	48
Tab. 15: Trockenmasseerträge für unterschiedliche Grünlandgesellschaften im Spreewald (nach Käding) .....	52
Tab. 16: CO <sub>2</sub> -C-Freisetzungsfunktionen bei unterschiedlichen Wasserspannungen.....	54
Tab. 17: Indikatoren zur Beschreibung des Torfschwundes und der CO <sub>2</sub> -Freisetzung.....	61
Tab. 18: Zuordnung der verwendeten Substrate zu den Horizonten der Bodenprofile aus denen sie entstammen.....	72
Tab. 19: Eigenschaften des aufgenommenen Bodenprofils am Standort I .....	72
Tab. 20: Eigenschaften des aufgenommenen Bodenprofils am Standort II.....	72

---

Tab. 21: Eigenschaften des aufgenommenen Bodenprofils am Standort III.....	73
Tab. 22: Eigenschaften des aufgenommenen Bodenprofils am Standort IV .....	73
Tab. 23: MvG-Parameter der verschiedenen Bodenartengruppen bei der pF-Anpassung.....	73
Tab. 24: MvG-Parameter der verschiedenen Bodenartengruppen bei der Ku-Anpassung .....	73
Tab. 25: Kapillare Aufstiegsraten [mm/d] aus dem Grundwasser an die Untergrenze des Wurzelraums für unterschiedliche Böden im Referenzszenario .....	74
Tab. 26: Kapillare Aufstiegsraten [mm/d] aus dem Grundwasser an die Untergrenze des Wurzelraums für unterschiedliche Böden im B2-Basiszenario .....	75
Tab. 27: Trockenstressfaktoren für unterschiedliche Böden und Grundwasserstände [cm unter GOF] im Referenz- und B2-Basiszenario .....	76

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AG	Arbeitsgruppe
ArcGRM	Wasserbewirtschaftungsmodell
B2	Emissionsszenario des IPCC
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BOWAS	Bodenwasserhaushaltsmodell
BÜK	Bodenübersichtskarte
DGM	Digitales Geländemodell
EB	Endbericht
$E_{pot}$	potenzielle Verdunstung
$E_{real}$	reale Verdunstung
$E_{real}/E_{pot}$	Trockenstressfaktor
ETI	reale Verdunstung
GIS	Geographisches Informationssystem
GRUENLAND	Grünlandertragsmodell
GW-Stand	Grundwasserstand
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
Kap.	Kapitel
KA4	Bodenkundliche Kartieranleitung (AG BODEN 1994)
kf	gesättigte Wasserleitfähigkeit [cm/d]
ku	ungesättigte Wasserleitfähigkeit [cm/d]
KWB	klimatische Wasserbilanz
LGRB	Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg
LUA	Landesumweltamt Brandenburg
MEZ	Mitteuropäische Zeit
MODAM	Multi-Objective Decision Support Tool for Agroecosystem Management
MvG	Anpassung von Wasserretentions- und Wasserleitfähigkeitsfunktionen nach VAN GENUCHTEN (1980) mit dem Ansatz von MUALEM (1976)
n.b.	nicht bestimmt
pF	Wasserspannung
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
PV	entwässerbares Porenvolumen
SHG	Substrat-Horizontgruppen-Ansatz nach RIEK ET AL. (1995)
So.	Sommer
Tab.	Tabelle
TGP	Teilgebietsprojekt
TP	Teilprojekt
TUB	Technische Universität Berlin
TV	Teilvorhaben
u.a.	unter anderem
UG	Untersuchungsgebiet
u. GOF	unter Geländeoberfläche
u.U.	unter Umständen
VEGMOS	Vegetationsentwicklungsmodell
vgl.	vergleiche
VH	Vorhaben
$V_{kap}$	kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser in den effektiven Wurzelraum [mm/d]
Wi.	Winter

---

$W_{\text{pfl}}$	pflanzenverfügbare Bodenwassermenge [mm]
ZALF	Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung München
z.T.	zum Teil
$\Theta$	Wassergehalt
$\Psi$	Wasserspannung



## 1 Zielstellung

Ziel des Teilvorhabens 2.6 (TV 2.6) war die Untersuchung der Auswirkungen des globalen Klimawandels unter Verwendung vorgegebener Szenarien auf:

- den Bodenwasserhaushalt (u.a. Veränderungen des Wasserverbrauches und der Sickerwasserrate) bei unterschiedlichen Grundwasserständen (GW-Stände), Böden und Nutzungen,
- die Ertragssicherheit und -höhe bei unterschiedlichen GW-Ständen, Böden, Nutzungen und Nutzungsintensitäten,
- die ökologische Bodenfeuchte (Indikator für Trockenstress) sowie
- die Entwicklung der Niedermoor torfe und damit auf die Lebensdauer von Feuchtgebieten.

Hierzu wurde im TGP Spreewald ein komplexes Feuchtgebietsmodellsystem (ArcGRM-BOWAS-Vegmos-Modam) entwickelt, mit dem Gebietsaussagen zu obigen Punkten und anderen (vgl. auch Berichte TV 2.3, 2.7, 2.8) abgeleitet werden können.

## 2 Voraussetzung zur Durchführung des Projektes

Durch das BMBF wurden 0,5 Wissenschaftlerstelle für 36 Monate und eine Studentische Hilfskraft mit 40 Stunden pro Monat für 30 Monate finanziert.

Die Infrastruktur für das Forschungsvorhaben wurde von der TU-Berlin, FG Standortkunde/Bodenschutz zur Verfügung gestellt. Hierzu zählte die notwendige Rechner-technik, Fahrzeuge, Laborausstattung, Messtechnik und das notwendige wissenschaftliche Umfeld. Das Projekt wurde weiterhin durch die Arbeit haushaltsfinanzierter Mitarbeiter unterstützt.

Zu den Voraussetzungen zählen weiterhin die enge Zusammenarbeit mit den Teilvorhaben im TGP Spreewald (TV 2.3, 2.7 und 2.8), ebenso wie die Kooperation mit entsprechenden Fachbehörden wie dem Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe, dem Landesumweltamt Brandenburg und der Biosphärenreservatsverwaltung Spreewald sowie mit Institutionen wie der Versuchsstation Paulinenaue des ZALF.

## 3 Planung und Ablauf des Projektes

Die Projektplanung sah folgende Bearbeitungspunkte vor:

- Ableitung benötigter Daten aus vorhandenen Karte und Schätztabelle als Eingangsgrößen für die Bodenwasserhaushaltsmodellierung
- Modellierung des Bodenwasserhaushaltes (nach WESSOLEK 1989)
- Untersuchung der Auswirkungen von Klima- und Grundwasserstandsänderungen auf:
  - den Bodenwasserhaushalt
  - die Ertragslage von Grünland
  - die CO<sub>2</sub>-Freisetzung und den Torfschwund der Niedermoo-remit Hilfe von Szenarienberechnungen

Der erste Punkt stellte sich als problematisch heraus, da der Spreewald aufgrund seiner Genese und der spezifischen Auendynamik nicht mit gängigen Schätzwerttabellen und Karten in ausreichendem Maße zu erfassen war (vgl. Kap. 6.1 und 7.1). Aus diesem Grund wurden in Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg bodenhydrologische Einheiten für den Spreewald definiert, denen auf Grundlage eigener Messungen bodenhydraulische Werte zugewiesen wurden. In diesem Zusammenhang entstand eine Bodenübersichtskarte, die auf den Bodenartenhauptgruppen der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 1994) aufbaut. Auf diesem Weg wurde eine Datengrundlage geschaffen, welche die weiteren Arbeiten erst ermöglichte und als Grundlage für die anderen TV im TGP Spreewald diente.

Die weiteren aufgeführten Arbeitspunkte wurden im Laufe des Projektes alle abgearbeitet, wobei sich die Reihenfolge am aktuellen Kenntnisstand, dem Fortschreiten der Zusammenarbeit mit den anderen TV im TGP sowie mit den aufgeführten Behörden und Institutionen und der Szenarienentwicklung in Absprache mit den Stakeholdern im Untersuchungsgebiet orientierte. Am Ende des Projektzeitraumes, inklusive einer 2-monatigen kostenneutralen Verlängerung, wurden alle aufgeführten Arbeiten fertiggestellt.

#### **4 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde**

Es konnte in diesem Projekt auf langjährige Erfahrungen im FG Standortkunde/Bodenschutz in den Bereichen der Bodenwasserhaushaltsmodellierung, der bodenhydrologischen Messverfahren, der Auswirkungen von Änderungen im Wasserhaushalt auf den Ertrag und die Degradierung von Niedermooren, deren CO<sub>2</sub>-Freisetzung und des Torfrückgangs zurückgegriffen werden. In diesem Zusammenhang ist z.B. das interdisziplinäre DFG Projekt „Grundlagen umweltschonender Bodennutzungsstrategien im nordostdeutschen Tiefland – Kennzeichnung der Bodenentwicklungsprozesse von Niedermooren“ (WESSOLEK ET AL. 1999) zu nennen. Nachfolgend ein Auszug entsprechender Veröffentlichungen:

- RENGER, M., O. STREBEL, H. SPONAGEL & G. WESSOLEK (1984)  
 RENGER, M., RIEK, W. & WESSOLEK, G. (1995)  
 RENGER, M., WESSOLEK, G. & RIEK, W. (1996)  
 RENGER, M. & G. WESSOLEK (2000)  
 RENGER, M., K. SCHWÄRZEL, G. WESSOLEK, R. SAUERBREY & V. SIEWERT (2001)  
 SCHWÄRZEL, K. (2000)  
 SCHWÄRZEL, K. & H. BOHL (2001)  
 SCHWÄRZEL, K., G. WESSOLEK (2001)  
 WESSOLEK, G. (1989)  
 WESSOLEK, G. & M. RENGER (1993)  
 WESSOLEK, G. & ASSENG, S., (1994)  
 WESSOLEK, G. (1996)  
 WESSOLEK, G., GERSTENGARBE, F.-W., WERNER, P.C. (1998)  
 WESSOLEK, G., D. ESCHNER, M. RENGER, K. SCHWÄRZEL & R. SAUERBREY (1999)  
 WESSOLEK, G. & K. SCHWÄRZEL (2001)

## 5 Arbeitsschritte

Folgende Arbeitsschritte wurden durchgeführt:

- Ableitung einer neuen Bodenkarte für den Spreewald (BÜK 200) unter Berücksichtigung bestehender Materialien und durchgeführter Kartierungen in Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (LGRB, AG Dr. Kühn) und dem TV 2.3. (vgl. Kap. 6.1)
- Repräsentative Beprobung der in der erstellten Bodenkarte ausgewiesenen fünf bodenhydrologischen Einheiten (vgl. Kap. 6.1)
- Ermittlung der bodenhydraulischen Parameter im Labor für die fünf Bodenartengruppen als Eingangsparameter für die Modellierung (SCHWÄRZEL ET AL. 2002, LORENZ 2002):
  - die Beziehungen zwischen Wassergehalt ( $\Theta$ ) und Wasserspannung ( $\Psi$ ) sowie zwischen Wasserleitfähigkeit ( $K$ ) und Wasserspannung ( $\Psi$ ) (vgl. Kap. 6.2)
  - die Speicherkennlinien der verschiedenen Böden, Übergabe der Daten an TV 2.3 (vgl. Kap. 6.2)
- Für unterschiedliche Grundwasserstände, Nutzungen und Böden (vgl. Tab. 2) erfolgte für Referenz- und B2-Basisszenario:
  - die Modellierung des Bodenwasserhaushaltes (WESSOLEK ET AL. 2002), Übergabe der Daten an TV 2.3 (vgl. Kap. 6.2) sowie
  - die Ermittlung des Ertragsniveaus für Grünland, Übergabe der Daten an TV 2.8. (vgl. Kap.6.3)
- Ermittlung der  $\text{CO}_2$ -Freisetzung im Labor für verschiedene Spreewaldböden (HERLITZ 2002) (vgl. Kap. 6.4)
- Abschätzung des Torfschwundes und damit der Lebensdauer der Niedermoore im Spreewald unter Verwendung der Ergebnisse von RENGER ET AL. (2002) und HERLITZ (2002) (vgl. Kap. 6.4)

## 6 Methodik

### 6.1 Erstellung einer Bodenartenhauptgruppenkarte für den Spreewald

Für die Berechnung von Stoff- und Wasserflüssen im Boden werden hydraulische Parameter wie das Porenvolumen und die hydraulische Leitfähigkeit eines Bodens benötigt. Beide Parameter liegen für dieses Gebiet nicht flächendeckend vor. Dementsprechend wurden im Spreewald in Zusammenarbeit mit der FH Eberswalde und dem LGR Brandenburg Bodenprofile angelegt und beprobt, die einen möglichst repräsentativen Charakter tragen.

In einem nächsten Schritt mussten im Spreewald Bodenareale gefunden werden, denen die ermittelten bodenphysikalischen Daten zugeordnet werden konnten. Hierzu eigneten sich vor allem Bodenkarten, die Auskunft über die Verteilung der Substrate im Spreewald geben. In die Berechnung der Verdunstung mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodells nach WESSOLEK (1989) fließen die Eigenschaften der Porenräume ( $pF$ ,  $K_u$ ,  $K_f$ ) ein. Diese lassen sich u.a. über einfache Pedotransferfunktionen aus Tabellenwerken für Substrate, für die Bodenarten bekannt sind, ableiten. Die durch die Kartierungsarbeiten im Spreewald ermittelten Porenraumeigenschaften wiesen jedoch große Differenzen zu vergleichbaren Werten aus Tabellenwerken auf. Es wurde daher der Versuch unternommen, die gemessenen bodenphysikalischen Kenngrößen auf die wichtigsten Substrate des Spreewaldes zu übertragen. Aufgrund der begrenzten Datenlage wurden als kartographische Grundlage nur die Bodenartenhauptgruppen (Ton  $t$ , Lehm  $l$ , Sand  $s$ ) berücksichtigt. Dafür sollte aus bestehenden Kartierungen eine entsprechende Bodenartenhauptgruppenkarte mit einem Gültigkeitsbereich in einem Maßstab zwischen 1 : 100.000 bis 300.000 erstellt werden. Der gewählte Maßstab sollte dabei der aus der ungenügenden Kenntnis der kleinräumlichen Variabilität der Substrate/Bodenarten resultierenden Unschärfe gerecht werden.

Die dafür zur Verfügung stehenden Bodenkarten zeigt Tabelle 1. Alle Kartenwerke weisen Vor- und Nachteile auf, die im Folgenden erläutert werden sollen.

Die **Moorkarte aus dem Moorarchiv der Humboldt-Universität** zu Berlin im Maßstab 1 : 25000 gibt einen guten Überblick über die Torf- bzw. Moormächtigkeiten. Ihre regionale Aussagefähigkeit bleibt jedoch auf den Oberspreewald begrenzt. Als methodisches Problem stellte sich die Angabe der Torf- bzw. Moormächtigkeiten heraus. In der Karte sind lediglich die Mächtigkeiten aufgeführt, eine detaillierte Aussage über den vertikalen Profilaufbau fehlt jedoch. D.h. es liegen keine Informationen vor, inwieweit Torfe mit Mineralboden überdeckt wurden. Nach eigenen Kartierungen und Angaben aus der Literatur (VÖTT 2000) sind jedoch im Spreewald mineralbodenüberdeckte Torfe verbreitet. Angaben über konkrete Flächenzuordnungen fehlen zur Zeit jedoch völlig.

Die **MMK** zeigt die pedologischen Verhältnisse des gesamten Spreewalds in einem geeigneten Maßstab (1 : 100 000). Ebenso finden sich flächenscharfe Angaben zu den Substraten bzw. Bodenarten. Problematisch ist jedoch, dass diese Angaben auf den Ergebnissen der Reichsbodenschätzung (1930er Jahre) beruhen. Ein weiteres Problem ist die Übertragbarkeit der Nomenklatur des TGL-Standards (1986) in die Nomenklatur der AG BODEN (1994). Eine Überführung der Ergebnisse in die für die Auswertung notwendigen Bodenarten der AG BODEN (1994) ist nur eingeschränkt möglich.

Mit der Bodengeologischen **Karte von VÖTT (2000)** liegt eine detaillierte Kartierung für den Unterspreewald im Maßstab 1 : 50000 vor. Sie kann, wie auch die Moorkarte für den Spreewald, nur eine Basis von mehreren für eine Überblickskarte bilden.

Die zur Zeit detaillierteste Kartierung für den Spreewald liegt mit der **Karte von WERBAN (1999)** im Maßstab 1:25000 vor. Hier fließen u.a. Informationen der Bodenschätzung und der forstlichen Standortkartierung ein. Für die gebietsbezogene hydraulische Modellierung ist die hohe räumliche Detailgenauigkeit jedoch ungeeignet, da der Verschnitt dieser Karte mit den 197 Staubereichen des Spreewaldes und den örtlich stark wechselnden Nutzungstypen zu einer Vielzahl von Einzelflächen führen würde, die für die gewählte Auflösung des Wasserhaushaltsmodells und die Zielstellung des Projektes nicht mehr handhabbar sind.

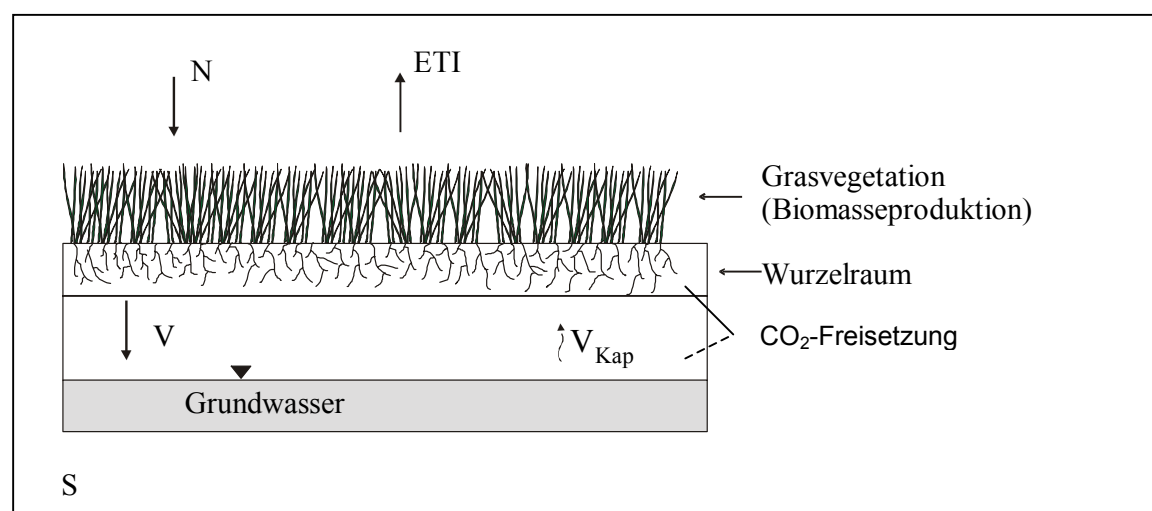
**Tab. 1: Zur Verfügung stehende Kartenwerke zur Ableitung einer Bodenkarte für den Spreewald**

Kartenwerke	Maßstab
Moorkarte der HUB	1 : 25.000
MMK	1 : 100.000
WERBAN (1999)	1 : 25.000
VÖTT (2000)	1 : 50.000

Aus dem vorhandenen Datenmaterial wurde in Kooperation mit dem Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (LGRB, AG Dr. Kühn) eine Bodenkarte erstellt, die auf den Bodenartenhauptgruppen der bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN, 1994) beruht. Dabei wurde die vom LGRB herausgegebene Karte der bodenbildenden Substrate, unterschieden nach Hauptgenesegruppen, mit der im Rahmen von Kartierungen festgestellten Hauptbodenart verknüpft. Damit entstand eine neue Kartengrundlage, bei der in der horizontalen Auflösung nur die Bodenartenhauptgruppen enthalten sind. Der vertikale Profilaufbau für die Körnung wurde von BAURIEGEL ET AL. (2001) als Ein- bzw. Zweischichtprofil dargestellt. Die flächenhafte und inhaltliche Bedeutung der Lehmsande als Bodenartengruppe im Spreewald führt zur gesonderten Behandlung außerhalb der Bodenartenhauptgruppe der Sande (BAURIEGEL ET AL. 2001). Damit lässt sich der Spreewald in folgende Bodenarten(haupt)gruppen-Profile differenzieren: Sand, Lehmsand, Lehm über Sand, Torf über Sand und Torf. Diese Bodenkarte (vgl. Abb. 7) bildet die Grundlage für alle weiteren Berechnungen der beteiligten Teilvorhaben (TV 2.3, 2.6, 2.7, 2.8).

## 6.2 Berechnung des Bodenwasserhaushaltes

Zur Modellierung des Bodenwasserhaushaltes für das Spreewaldgebiet wurde das Modell von WESSOLEK (1989) verwendet. Es handelt sich hierbei um ein Zweischichtsimulationsmodell, das schematisch in Abbildung 1 dargestellt ist.



**Abb. 1: Schematische Darstellung des Simulationsmodells (nach WESSOLEK 1989)**

Hierbei ist:

- $N$  der Niederschlag,
- $ETI$  die Verdunstung,
- $V$  die Versickerung und
- $V_{\text{kap}}$  die kapillare Aufstiegsrate aus dem Grundwasser in den effektiven Wurzelraum.

Die ungesättigte Bodenzone setzt sich aus zwei Schichten zusammen: dem Wurzelraum sowie einer nichtdurchwurzelten Zone, die bis zur Grundwasseroberfläche reicht. Die durchwurzelte Zone wird im Modell als effektiv nutzbarer Wurzelraum behandelt. Der verfügbare Wasservorrat pro  $\text{m}^2$  setzt sich zusammen aus der Summe der nutzbaren Feldkapazität bis in diese Tiefe. Im effektiven Wurzelraum wird auf Tagesbasis der Wasserumsatz bilanziert, d.h. die reale Evapotranspiration als Funktion der Niederschläge, des Bodenwassergehalts und der Klimabedingungen berechnet.

Die Berechnung der potenziellen Verdunstung kann einerseits nach der von der FAO empfohlenen Grasreferenzverdunstung und andererseits nach dem Ansatz von Haude (1955) erfolgen.

Die **FAO-Grasreferenzverdunstung (ET0)** lässt sich mit den gemessenen bzw. angenommenen klimatischen Werten nach folgender empirischer Gleichung bestimmen:

$$ET0 = \frac{(R_G + 93) \cdot (T + 22)}{165 \cdot (T + 123) \cdot (1 + 0,00019 \cdot h)}$$

hierbei sind:

ET0: Grasreferenzverdunstung [mm]  
 $R_G$ : Globalstrahlung [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]  
 $T$ : Lufttemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $h$ : Seehöhe [m]

Die Globalstrahlung kann aus der Sonnenscheindauer abgeleitet werden:

$$R_G = R_0 \cdot (0,2 + 0,46 \cdot S_r)$$

Hierbei sind:

$R_0$ : extraterrestrische Sonnenstrahlung [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]  
 $S_r$ : relative Sonnenscheindauer [%], (Verhältnis von gemessener zu astronomisch möglicher Sonnenscheindauer) für einen Sonnenstand von mindestens  $15^{\circ}$  über dem Horizont

In die Berechnungen der FAO-Grasreferenzverdunstung gehen demzufolge nur meteorologische Größen ein.

Die **Verdunstung nach Haude (1955)** wird nach folgender Formel berechnet:

$$E_{\text{Haude}} = f \cdot (E_{S14} - e_{14}) \text{ [mm/d]}$$

hierbei sind:

$E_{S14}$ : Sättigungsdampfdruck bei der um 14 Uhr MEZ gemessenen Temperatur  
 $e_{14}$ : Dampfdruck um 14 Uhr MEZ  
 $f$ : jahreszeitlich bzw. monatlich variierender Faktor, der den Jahresgang der Tageslänge berücksichtigt

Zur Berechnung der **realen Verdunstung (Ereal)** wird zunächst eine modifizierte RIJTE-MA-Formel benutzt, die von einer nassen Pflanzenoberfläche ausgeht.

$$E_{wet} = \frac{\Delta R_n / L + \gamma f(z_o, d) u^{0.75} (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma}$$

Dabei sind:

- E<sub>wet</sub> : maximale Evapotranspiration von einer nassen Oberfläche unter Berücksichtigung der Pflanzenhöhe [mm]
- Δ : Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [hPa / °C]
- R<sub>n</sub>: Nettostrahlung [J / m<sup>2</sup> d]
- L: Verdampfungswärme [J / m<sup>2</sup> d]
- γ: Psychrometerkonstante [hPa / °C]
- f(z<sub>o</sub>,d): Rauigkeitsparameter [-]
- u: Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe (im Freiland gemessen)
- e<sub>s</sub>: Sättigungsdampfdruck [hPa]
- e<sub>a</sub>: aktueller Dampfdruck [hPa]

Die reale Evapotranspiration (Ereal) kann aus **Ewet** unter Berücksichtigung eines Diffusionswiderstandes (**r**) und der Interzeptionsverdunstung (**Ei**) wie folgt berechnet werden:

$$E_{real} = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma (1 + f(z_o, d) u^{0.75} r)} (E_{wet} - E_i)$$

Der Diffusionswiderstand (**r**) setzt sich aus drei Teilwiderständen zusammen:

$$r = r_1 + r_c + r_\psi$$

Unter **r<sub>1</sub>** ist ein von der Strahlungsintensität abhängiger Diffusionswiderstand zu verstehen; **r<sub>c</sub>** ist vom Bedeckungsgrad des Bodens und der Wasserspannung im Wurzelraum abhängig und **r<sub>ψ</sub>** von der mittleren Wasserspannung im Blatt. Eine ausführliche Beschreibung der Widerstände findet sich bei RIJTEMA (1968) und WESSOLEK (1989). Die Interzeptionsverdunstung **E<sub>i</sub>** wird in Abhängigkeit der Niederschläge, der Bodenbedeckung und der potenziellen Verdunstung **E<sub>pot</sub>** berechnet.

Bei den grundwasserbeeinflussten Böden ist bei der Bestimmung des pflanzenverfügbaren Wassers neben der nutzbaren Feldkapazität auch der **kapillare Aufstieg (V<sub>kap</sub>)** aus dem Grundwasser in den Wurzelraum zu berücksichtigen. Er wird auf täglicher Basis mit Hilfe der DARCY-Gleichung berechnet:

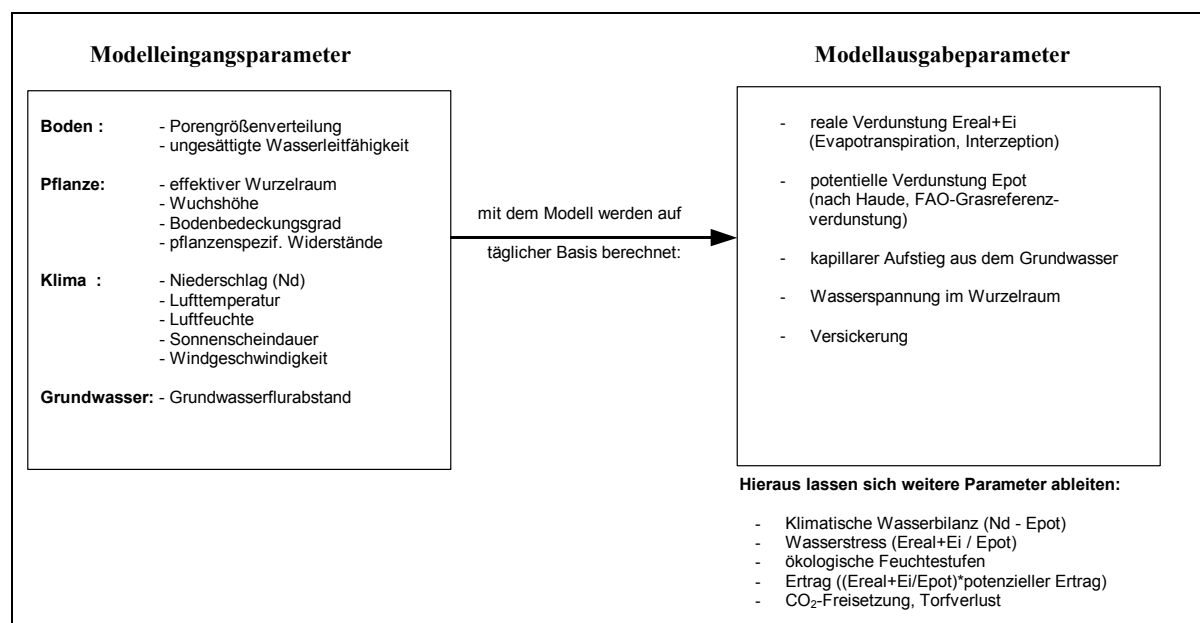
$$V_{kap} = -k \left( \frac{\Delta \psi}{\Delta z} - 1 \right)$$

Dabei sind:

- V<sub>kap</sub>: kapillarer Aufstieg [cm/Tag]
- k: Wasserleitfähigkeit [cm/Tag]
- ψ: Wasserspannung [hPa]
- z: Höhe über dem Grundwasser [cm]

Zur Berechnung der Aufstiegsrate wird die Wasserspannung an der Untergrenze des Wurzelraumes benutzt.

Mit Hilfe des Modells wurden für unterschiedliche Böden, Grundwasserstufen, Nutzungen und Klimabedingungen u.a. potenzielle und reale Verdunstung, Grundwasserneubildung, kapillare Aufstiegsraten und Wasserspannungen im Wurzelraum berechnet. Die Modellein- und -ausgabeparameter sind in Abbildung 2 dargestellt.



**Abb. 2: Modellparameter des Bodenwasserhaushaltsmodells (nach WESSOLEK 1989)**

Aufgrund der vorgegebenen Szenarien (Klima nach AG Gerstengarbe) wurden so für das Spreewaldgebiet die Modellausgabeparameter für unterschiedliche Böden, Grundwasserstufen, Nutzungen für das Referenz- und das B2-Basiszenario berechnet.

Eine genaue Beschreibung der unterschiedlichen Bedingungen in den Szenarien ist im EB des TV 2.3 zu finden und wird aus diesem Grund hier nicht noch einmal näher erleutert.

Zur Anpassung des Modells an die Gegebenheiten des Spreewaldes und die fundierte Erhebung von Eingangsdaten für die Modellberechnungen mussten verschiedene Arbeiten durchgeführt werden:

Für alle in der entwickelten Bodenkarte ausgewiesenen bodenhydrologischen Einheiten wurden folgende Bodenparameter experimentell bestimmt:

- Wasserretentionsfunktionen ( $\Theta$ - $\Psi$ - Beziehung)
- gesättigte und ungesättigte Wasserleitfähigkeit ( $\Psi$ - $K$ -Beziehung)
- Speicherkennlinien (Übergabe an das TV 2.3)

Diese Parameter stellen wichtige Eingangsgrößen für das Wasserverteilungsmodell ArcGRM-Spreewald (TV 2.3) und das Bodenwasserhaushaltsmodell (WESSOLEK 1989) dar. Eine Ableitung der bodenhydraulischen Parameter über Pedotransferfunktionen war aufgrund der Besonderheiten der Spreewaldgenese (Auendynamik, Moorbildung) nur bedingt möglich (SCHWÄRZEL ET AL. 2002, LORENZ 2002).

Im Rahmen von Aufgrabungen und Bohrstockkartierungen wurden effektive Durchwurzelungstiefen von Grünland unterschiedlicher Standorte bestimmt. Diese Größe wird ebenfalls für die Simulation des Bodenwasserhaushaltes benötigt.

Nach Aufbereitung von Klimadaten der DWD-Stationen Cottbus und der Außenstelle Burg wurden erste orientierende Simulationsrechnungen zum Bodenwasserhaushalt für „Grünland“ für die Jahre 1951 bis 98 durchgeführt und die Anwendbarkeit dieses Modell für die Simulation des Bodenwasserhaushaltes im Spreewald überprüft und bestätigt.

Die Simulationsrechnungen zum Bodenwasserhaushalt (inklusive Evapotranspiration) wur-



den für fünf Böden, sechs Grundwasserklassen, sechs Nutzungen und zwei Szenarien durchgeführt (vgl. Tab.2).

**Tab. 2: Klasseneinteilungen innerhalb des Modells**

Böden	GW-Stufen [cm u. GOF]	Nutzungen	Szenarien
Sand	30	Intensiv-Grünland	Referenzszenario
Lehmsand	60	Extensiv-Grünland	B2-Basisszenario
Torf	90	Acker	
Torf über Sand	120	Wald	
Lehm über Sand	150	Offenland	
	200	Siedlung	

An das TV 2.3 wurden mittlere Monatswerte der Verdunstung in Form einer Datenbank in Abhängigkeit von Bodentyp, Landnutzungstyp (TV 2.7 „Vegetation“) und Grundwasserstand übergeben. Über die erstellte Bodenkarte und die vom TV 2.7 ausgewiesene Karte der Landnutzungsklassen wird im ArcGRM (TV 2.3) auf die Datenbank mit den grundwasserstandsabhängigen Verdunstungswerten zugegriffen. Um die Rechenzeit des ArcGRM-Spreewald zu verkürzen, war eine Reduzierung der Varianten Boden/ Landnutzung/ Grundwasserstand nach fachlichen Gründen anzustreben. Es wurden hierzu Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Dabei wurde geprüft, inwieweit zwischen den einzelnen Varianten statistisch zu sichernde Unterschiede hinsichtlich der Verdunstung auftreten. Folgende statistische Methoden wurden angewendet:

- Kolmogoroff-Smirnoff-Test zur Prüfung auf Normalverteilung
- Levene-Statistik zur Prüfung auf Homogenität der Varianzen
- ANOVA zur Prüfung auf Unterschiede zwischen den Mittelwerten

Die Anwendung der statistischen Methoden erfolgte getrennt für jeden Monat und jede Grundwasserklasse.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Kap. 4.3 dargestellt und wurden sowohl bei den Modellberechnungen als auch bei deren Auswertung berücksichtigt.

Vom TV 2.7 wurde aus der Biotoptypenkarte des Pflege- und Entwicklungsplanes Spreewald eine Karte mit sieben Landnutzungsklassen abgeleitet. Für die Berechnung des Bodenwasserhaushaltes sind neben Intensiv- und Extensiv-Grünland die Landnutzungsklassen Acker, Wald und Offenland von Relevanz.

Die Definitionen und Beschreibungen der einzelnen Szenariobedingungen finden sich ausführlich im EB des TV 2.3 und werden daher in dieser Arbeit nicht näher erläutert.

### 6.3 Berechnung des Grünlandertrages

In der Niederung des Spreewalds wird aufgrund zeitweilig sehr hoher GW-Stände und der damit einhergehenden schlechteren Bearbeitbarkeit der Flächen, z.T. auch durch anstehende lehmig-tonige Substrate (regional als „Klock“ bezeichnet) und geringer Ertragslage überwiegend extensive Grünlandwirtschaft betrieben. Es werden derzeit bereits fast 100% der Grünlandflächen extensiv und vornehmlich im inneren Oberspreewald auch bei relativ hohen GW-Ständen bewirtschaftet. Die Grünlandnutzung nimmt ca. 27% der Fläche des Biosphärenreservats ein und ist Grundlage für das parklandschaftsartige Erscheinungsbild des Spreewaldes.

Der Ertrag eines Standortes wird durch verschiedene Einflussgrößen beeinflusst. Zu diesen zählen neben den Klimafaktoren (Niederschlag, Einstrahlung, Wind etc.) auch die Bodenart, die Bodenfeuchte, der GW-Stand, die Nährstoffverfügbarkeit und die Nutzungsart. Da keine flächendeckenden Untersuchungen der Nährstoffgehalte bzw. Nährstoffverfügbarkeit vorlagen oder erhoben werden konnten, ging diese Größe über die Anzahl und Höhe der Dünger-

gaben in die Berechnungen ein. Alle anderen Einflussgrößen lagen vor oder konnten mit Hilfe des Bodenwasserhaushaltsmodells (WESSOLEK 1989) berechnet werden.

Das Verhältnis von realer zu potenzieller Verdunstung ( $E_{\text{real}}/E_{\text{pot}}$ ) stellt ein Maß für die Wasserversorgung der Pflanzen dar. Entspricht die reale der potenziellen Verdunstung, so kann man von einer ausreichenden Wasserversorgung der Pflanze ausgehen, sofern eine ausreichende Durchlüftung des Oberbodens gegeben ist. Mit sinkendem Wert des Quotienten erhöht sich der Wasserstress für den Pflanzenbestand. Das Verhältnis  $E_{\text{real}}/E_{\text{pot}}$  wird daher auch als Trockenstressfaktor bezeichnet.

Auf Grundlage der ermittelten fünf bodenhydrologischen Einheiten (Bodenartenhauptgruppenkarte) wurden aus den Ergebnissen der Wasserhaushaltsberechnung (nach WESSOLEK 1989) ertragswirksame **Trockenstressfaktoren** ( $E_{\text{real}}/E_{\text{pot}}$ ) für unterschiedliche Böden (5), Grundwasseramplituden (6) und Klimabedingungen (Referenz-, B2-Basis-Szenario) berechnet. In Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Käding von der Versuchsstation Paulinenaue (ZALF) wurden für den Spreewald **mittlere Ertragsniveaus** (**Ertrag $\emptyset$** ) für unterschiedliche Grünlandgesellschaften definiert. Sie sind abhängig vom Grundwasserstand, Boden und N-Angebot.

Da sowohl Klimadaten als auch Daten zu Boden und Vegetation in die Berechnung des Wasserhaushaltes eingehen (vgl. Abb. 2), werden diese potenziellen Erträge über die berechneten Wasserstressfaktoren mit den aktuellen bzw. angenommenen Standortverhältnissen und Klimabedingungen verknüpft und somit der real zu erwartende Ertrag ermittelt. Hierzu wurde folgende Gleichung verwendet:

$$\text{Ertrag}_{\text{real}} = E_{\text{real}}/E_{\text{pot}} \cdot M \cdot \text{Ertrag}_{\emptyset}$$

Hierbei sind:

Ertrag <sub>real</sub> :	der unter den getroffenen Voraussetzungen real zu erwartende Ertrag [dt · ha <sup>-1</sup> · a <sup>-1</sup> ]
$E_{\text{real}}/E_{\text{pot}}$ :	Trockenstressfaktor [-], beschreibt die relative Wasserversorgung für das Wachstum und den Ertrag der Vegetation
M:	„Managementfaktor“, berücksichtigt Ertragseinbußen aufgrund hoher GW-Stände [-]
Ertrag <sub><math>\emptyset</math></sub> :	mittleres Ertragsniveau, abhängig von Grünlandgesellschaft, GW-Stand, Boden und Nährstoffangebot, maßgeblich Stickstoff [dt · ha <sup>-1</sup> · a <sup>-1</sup> ]

**M** ist hierbei ein sogenannter „Managementfaktor“, der Ertragseinbußen bei hohen GW-Ständen aufgrund von schlechter Bearbeitbarkeit der Fläche und unzureichender Belüftung des Oberbodens berücksichtigt. Der potenziell auf einer Fläche zu erzielende Ertrag wird nach obiger Gleichung durch den Trockenstressfaktor beeinflusst. Dieser ist nach Böden, GW-Stand und klimatischen Bedingungen differenziert und beinhaltet demzufolge die ertragsbeeinflussenden Randbedingungen für einen Standort. Trockenstressfaktoren wurden auf Monatsbasis für die jeweilige Vegetationsperiode berechnet. Der Einfluss der Düngergaben ging über die Höhe des potenziellen Ertrages in die Berechnungen ein.

Es wurde somit ein Ansatz zur Berechnung der Grünlanderträge entwickelt, der durch die Verknüpfung von potenziellen Erträgen für eine Fläche mit den realen bzw. angenommenen Klimaverhältnissen über ertragsbeeinflussende Trockenstressfaktoren für eine Dynamisierung der Grünlandertragsberechnungen sorgt. können so die zu erwartenden Grünlanderträge flächenhaft für unterschiedliche Boden-, Klima-, Wasserhaushalts- und Bewirtschaftungsbedingungen berechnet werden (vgl. EB TV 2.8).



Die Moorbildung im Spreewald weist aufgrund der Entstehungsgeschichte dieser Niederung im Vergleich zu anderen nordostdeutschen Niedermoorgebieten wie z.B. dem Rhinluch oder der Lewitz pedogenetische Besonderheiten auf. So treten z.B. selten reine Torfkörper auf. Die Niedermoore sind größtenteils aufgrund der Auendynamik mit Spreesedimenten wie Sanden oder ton- und humusreichen Schichten („Klock“) überdeckt. Des Weiteren treten im Spreewald überwiegend flachgründige Niedermoore auf. Lediglich in Rinnen und Senken können kleinflächig auch Moormächtigkeiten über 2 m vorkommen. Der Spreewald hat dadurch auch bodenkundlich einen hohen überregionalen Stellenwert mit einer spezifischen Genese und damit auch spezifischen hydraulischen Eigenschaften.

Hinsichtlich der im Spreewald zu schützenden Böden gibt es bereits durch planerische Vorgaben aus dem Landschaftsrahmenplan klare Zielvorstellungen (MUNR 1998). Dabei steht vor allem der Schutz der Niedermoore im Vordergrund. Insgesamt bilden aber auch die Niedermoorgleye einen erheblichen Anteil des Torfkörpers. Da insbesondere der Torfkörper eine Kohlenstoffsenke in der Landschaft darstellt, wird beiden Bodentypen in Zukunft eine hohe Priorität hinsichtlich ihres Schutzes zu Teil werden. Der Flächenanteil der Niedermoorgleye beträgt etwa 5 %. Niedermoore und Niedermoorgleye sind von der Genese und ihrem grundsätzlichen Profilaufbau gleich. Bei beiden Bodentypen hat sich eine mehr oder weniger mächtige Torfschicht über einem Mineralkörper (meist Auensand) herausgebildet. Bei Niedermooren ist die Torfschicht mächtiger als 3 dm. Niedermoorgleye liegen vor, wenn die Torfschicht geringer als 3 dm ausgebildet ist. Bei beiden ist ein Kohlenstoffgehalt von über 30 % in der organischen Bodensubstanz vorhanden. Sinkt der Kohlenstoffgehalt im Oberboden durch Mineralisierungsprozesse auf 15 - 30 %, so kann aus bodensystematischer Sicht nur noch von einem Anmoorgley gesprochen werden. Rechtliche Grundlagen für den hervorgehobenen Bodenschutz für Niedermoore bieten im BbgNatSchG (1992) die Paragraphen §1 Abs.2 und §10 Abs. 2. Andere Bodentypen sind nur indirekt über die Ausweisung wertvoller Biotope geschützt.

**Torfschwund** oder Torfabbau bezeichnet den Verlust an organischer Substanz durch Mineralisation. Die Mineralisation erfolgt überwiegend mikrobiell, weshalb das aus dem Boden diffundierende CO<sub>2</sub>, als Endprodukt aller mikrobiellen Aktivität, als Maß für den Torfschwund herangezogen werden kann (STEGMANN & ZEITZ IN SUCCOW ET AL. 2001). Diese sogenannte Bodenatmung wurde im Labor bestimmt. Die jährlichen Torfmineralisationsraten sind abhängig von Klima, GW-Stand und Bodenfeuchte, C-Vorrat und Nutzung.

Zur Bestimmung des Torfschwundes nach RENGER ET AL. (2002) ist die Kenntnis der CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten der Torfe für die entsprechenden Klima- und Grundwasserbedingungen notwendig. Aus diesem Grund wurden in Zusammenarbeit mit der FH Eberswalde (AG Prof. Luthardt) und dem Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (LGRB) vier für den Spreewald repräsentative Standorte und ein Transekt ausgewählt und die anstehenden Torfe im Hinblick auf ihre CO<sub>2</sub>-Freisetzung im Labor untersucht (HERLITZ 2002). Abbildung 5 zeigt das prinzipielle Vorgehen bei der Bestimmung der Torfverluste.

Die Inkubationsexperimente wurden mit einer „Respirocond“-Anlage der Firma Nordgreen-Innovations durchgeführt (vgl. Abb. 4). Diese Anlage ermöglicht eine gleichzeitige und quasikontinuierliche Messung der Bodenatmung in 96 Messkanälen über die Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit von Kalilauge (0,6 M) bei Absorption des aus dem Boden freigesetzten CO<sub>2</sub>. Die Messdichte wurde im Laufe des Versuchs konstant gehalten. Während des Versuchs erfolgte eine Aufzeichnung der Freisetzung je Messzelle alle 30 Minuten als Mittelwert aus 10 Einzelmessungen. Die Versuche wurden an ungestörten Stechzylinderproben der vier Standorte und des Transektes durchgeführt. Die CO<sub>2</sub>-Freisetzung wurde an diesen Proben für unterschiedliche Feuchttestufen (pF 1,0 / 1,8 / 2,2 / 3,0) und Temperaturen (5°C / 10°C / 15°C / 20°C) bestimmt.



**Abb. 4: Respirocondanlage der Firma Nordgreen Innovations zur Messung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung**

Aus diesen Untersuchungen (Respirocondmessungen an Spreewaldtorfen) zusammen mit Kartierungen im Gebiet und Ergebnissen von Arbeiten aus dem Rhinluch und Paulinenaue (RENGER ET AL. 2002, WESSOLEK ET AL. 2002, MUNDEL 1976) können mittlere, jährliche Torfmineralisationsraten angegeben werden, aus denen der mittlere Torfschwund pro Jahr als Funktion von Grundwasserstand und Klimaverhältnissen bestimmt wurde.

Bei Kenntnis der aktuellen Moormächtigkeit an einem Standort lässt sich über den mittleren Torfschwund pro Jahr die Lebensdauer dieser Torfe abschätzen. Hieraus sollen Aussagen über die Auswirkungen des globalen Wandels auf die Lebensdauer der Niedermoore getroffen werden.

Der mittlere Torfschwund wurde in Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Freisetzung und des Grundwasserstandes für Referenz- und B2-Basiszenario berechnet. In einem weiteren Schritt wurde auch der Torfschwund für die Moorschutzszenarien ermittelt. Die Lebensdauer der entsprechenden Niedermoore ergibt sich dann aus der jeweiligen Moormächtigkeit.

Die Verbreitung der Torfe konnte der Moorkarte des Landesumweltamtes Brandenburg (LUA) entnommen werden. Aufgrund der unzureichenden Genauigkeit bei der Ausweisung der Torfmächtigkeiten konnte diese jedoch nicht zur Bestimmung der Lebensdauer der Niedermoore herangezogen werden. Aus diesem Grund wurden im Rahmen einer Diplomkartierung zwei Flächen hinsichtlich dieser Problematik untersucht. Beide liegen im Oberspreewald im Bereich des Sommerpolder-Nord. Die erste befindet sich zwischen Kirscht- und Rohrkanal im östlichen Sommerpolder-Nord, die zweite zwischen Großem Fließ und Burg-Lübbener Kanal im westlichen Sommerpolder-Nord. Beide umfassen eine Fläche von je ca. 4 km<sup>2</sup>. Hierbei wurden sowohl die Bodentypen und -arten, als auch die Torf- und Moormächtigkeiten und der GW-Stand aufgenommen (VON BOSTELL & GEB 2003, DITTMER & KOWALSKI 2003). Nach Auswertung der Kartierarbeiten können diese zur Berechnung der Lebensdauer der Niedermoore auf diesen Flächen, beispielhaft für den Spreewald verwendet werden.

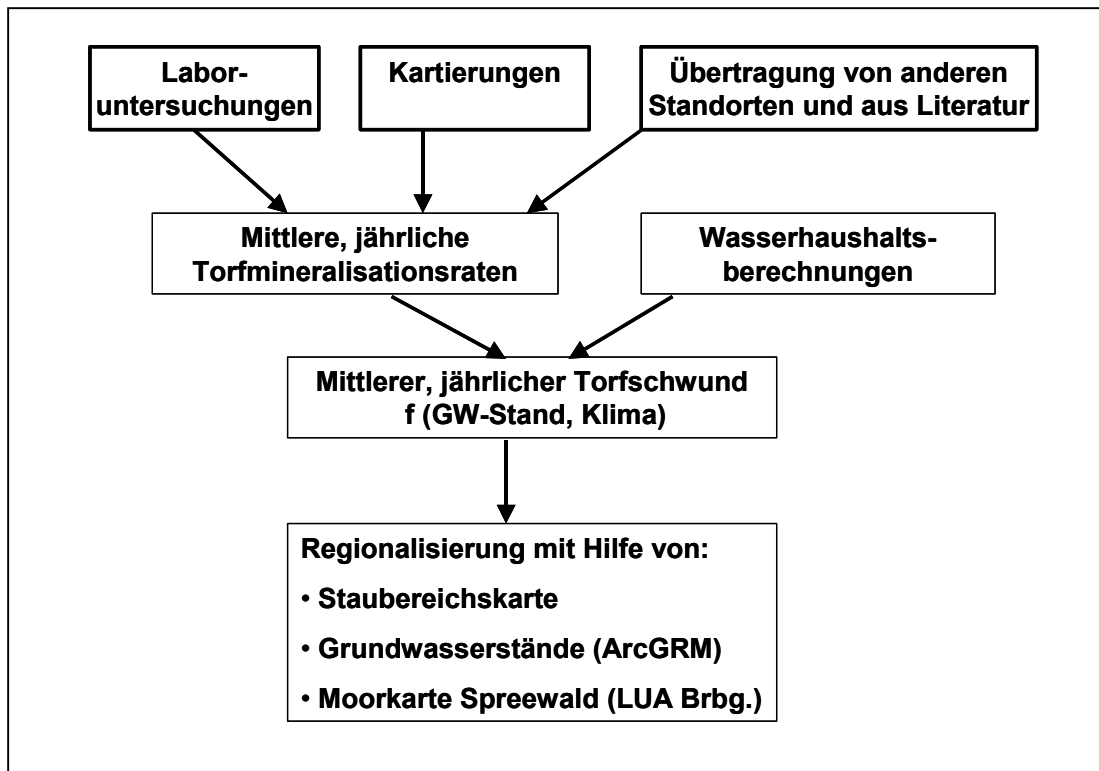


Abb. 5: Vorgehen bei der Berechnung und Regionalisierung des Torfchwundes

Die Berechnungen des Torfchwundes erfolgte auf Grundlage der aus dem ArcGRM-Spreewald resultierenden Pegelstände innerhalb von 5-Jahresscheiben, wobei die folgende 5-Jahresscheibe auf den Ergebnissen der vorigen 5-Jahresscheibe aufbaut. Hieraus konnten mit Hilfe eines digitalen Geländehöhenmodells mittlere jährliche GW-Stände berechnet werden. Mit Hilfe GIS-gestützter Modellberechnungen zur Torfmächtigkeitsabnahme kann diese für das Niederungsgebiet des Spreewaldes flächenhaft dargestellt und ausgewertet werden. Die Berechnungen des Torfchwundes erfolgten auf Rasterebene für alle Staubereiche. Für die Flächen, bei denen der mittlere jährliche Grundwasserstand über Geländeoberkante liegt, wurde ein Torfakkumulationsterm in das Modell integriert. Hierfür wurde ein moderater Torfzuwachs für Niedermoore nach GÖTLICH (1990) mit 0,5 mm/a angenommen.

Zur Berechnung der klimabedingten Veränderungen der CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten und des Torfchwundes wurde somit ein Modul integriert, das auf Grundlage der Torfart, der Moormächtigkeit, der Grundwasserstände, der Nutzung und der Klimabedingungen flächenhafte Aussagen für die Niedermoore des Spreewalds zulässt. Die Ergebnisse hieraus fließen ebenfalls in die Berechnungen der sozio-ökonomischen Auswirkungen im Modell MODAM (TV 2.8) ein.

## 7 Ergebnisse

### 7.1 Bodenartenhauptgruppenkarte

Der Berechnung des Bodenwasserhaushaltes insbesondere der Verdunstung sollte ein möglichst überschaubarer Ansatz zu Grunde liegen. Ziel war es, im Spreewald Gebiete mit Ein- und Zweischicht-Bodenprofilen auszuweisen, die dann mit der Nutzung und den Staubereichen mit Hilfe eines GIS verschritten werden können.

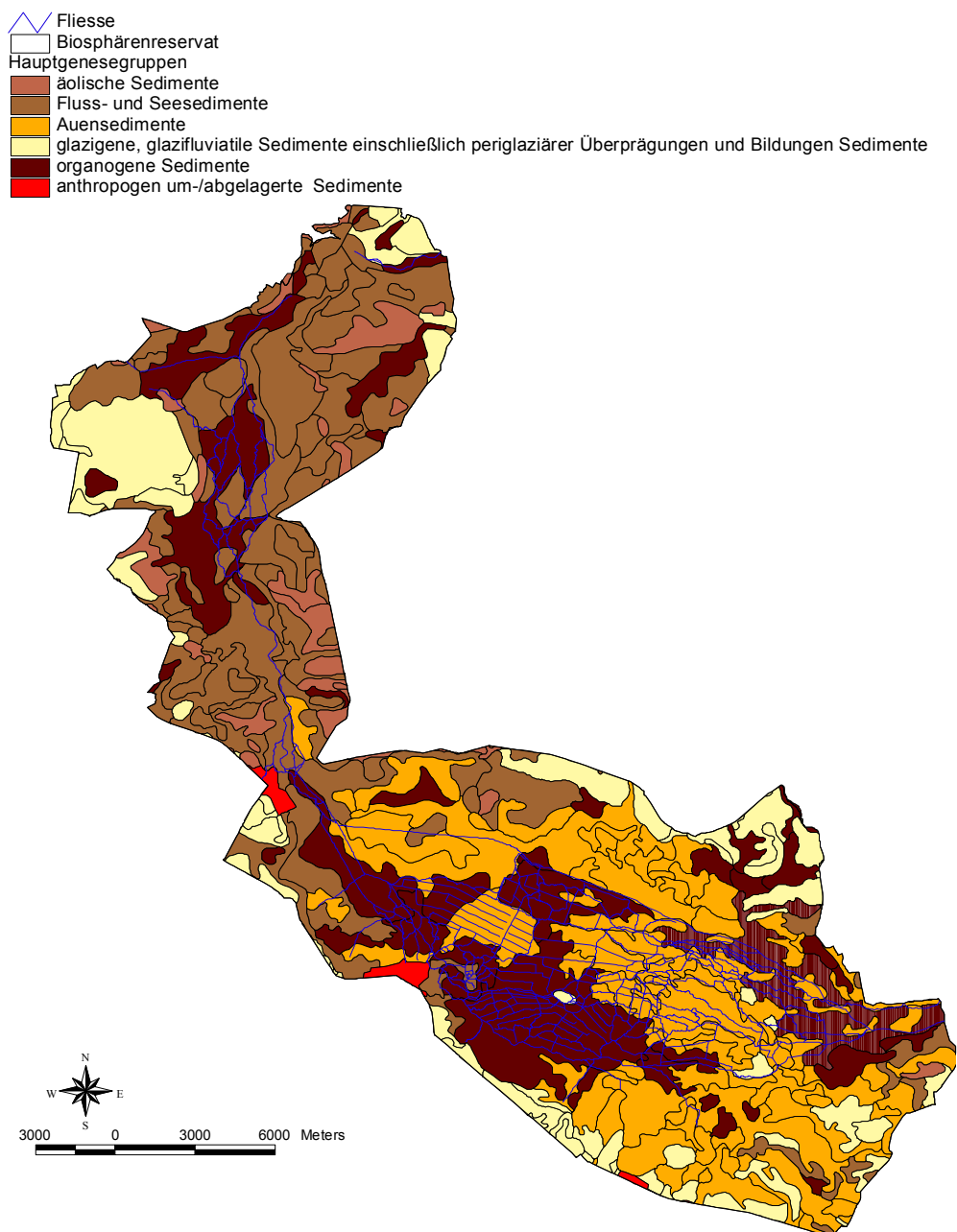


Abb. 6: Hauptgenesegruppen im Spreewald (nach BAURIEGEL ET AL. 2001)



Um die genannten Probleme (vgl. Kap. 6.1) zu überwinden, wurde in enger Kooperation mit dem Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Dez. 2.4 Bodengeologie auf die zeitgleich (unabhängig) mit den Projektarbeiten laufende Bodenkartierung für das Land Brandenburg zurückgegriffen (BAURIEGEL ET AL. 2001). Dadurch konnten zum einen Doppelarbeiten hinsichtlich der Erstellung einer Bodenüberblickskarte für den Spreewald vermieden werden. Zum anderen ist damit der Bezug auf eine einheitliche Datengrundlage für weitere bodenkundliche Arbeiten im Spreewald gegeben. Für die **Bodengeologische Karte des Landes Brandenburg** für den Arbeitsmaßstab 1 : 200.000 bilden die in Kap. 6.1 genannten Karten und die Geologische Karte die Bezugsbasis.

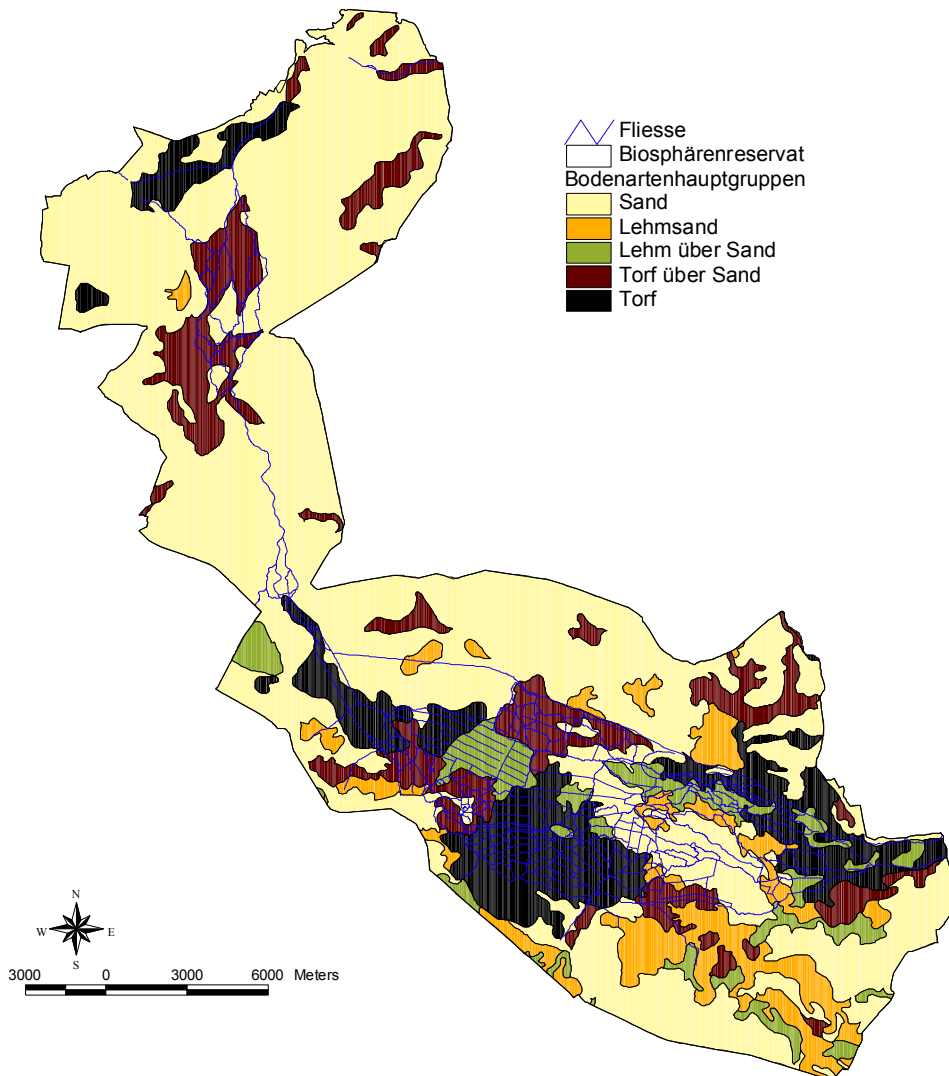
In dieser Karte werden von BAURIEGEL ET AL. (2001) zunächst die bodenbildenden Substrate nach Hauptgenesegruppen unterschieden (vgl. Abb. 6). Den geringsten Flächenanteil dabei haben die antropogen um-/abgelagerten Sedimente mit 0,6 %. Ebenso sind die äolischen Sedimente mit 4,2 % Flächenanteil als gering zu bewerten, zumal sie für die Gebietswasserhaushaltsmodellierung aufgrund der grundwasserfernen Lagen nicht mehr in Betracht kommen. Größere Flächenanteile nehmen die anderen Hauptgenesegruppen zwischen 14 und 28 % ein (vgl. Tab. 3).

Als weiteres Kriterium wurden die den Einzelflächen zugewiesenen Körnungen mit den Hauptgenesegruppen verknüpft. Damit entstand eine Karte, in der in der horizontalen Auflösung nur die Bodenartenhauptgruppen enthalten sind. Der vertikale Profilaufbau für die Körnung wurde von BAURIEGEL ET AL. (2001) als Ein- bzw. Zweischichtprofil dargestellt.

**Tab. 3: Flächenanteil der Hauptgenesegruppen im Biosphärenreservat Spreewald**

Hauptgenesegruppe	Flächenanteil im Biosphärenreservat [%]
äolische Sedimente	4.2
Fluss- und Seesedimente	27.7
Auensedimente	28.5
glazigene, glazifluviatile Sedimente einschließlich periglaziärer Überprägungen und Bildungen Sedimente	13.8
organogene Sedimente	25.2
anthropogen um-/abgelagerte Sedimente	0.6





**Abb. 7: Bodenarten(haupt)gruppen im Spreewald**

Damit lässt sich der Spreewald in folgende Bodenarten(haupt)gruppen-Profile differenzieren: Sand, Lehmsande, Lehm über Sand, Torf über Sand und Torfe. Die nach diesen Kriterien zusammengestellte Bodenarten(haupt)gruppenkarte ist in Abbildung 7 dargestellt.

Abbildung 8 zeigt den Anteil der einzelnen Bodenarten(haupt)gruppen an der Gesamtfläche. Wie zu erwarten, nehmen die sandigen Böden den weitaus größten Anteil im Gebiet des Spreewaldes ein (ca. 49%). Einen sehr hohen Anteil weisen auch die Gruppen Torf und Torf über Sand auf (zusammen ca. 33%). In diese Gruppe und die Gruppen Lehmsand (ca. 7%) und Lehm über Sand (ca. 11%) fallen wahrscheinlich die für den Spreewald beschriebenen „Klockböden“. Nach der aktuellen Datenlage lassen sie sich jedoch räumlich nicht zuweisen, wodurch eine Unschärfe in der Modellierung nicht zu vermeiden ist.

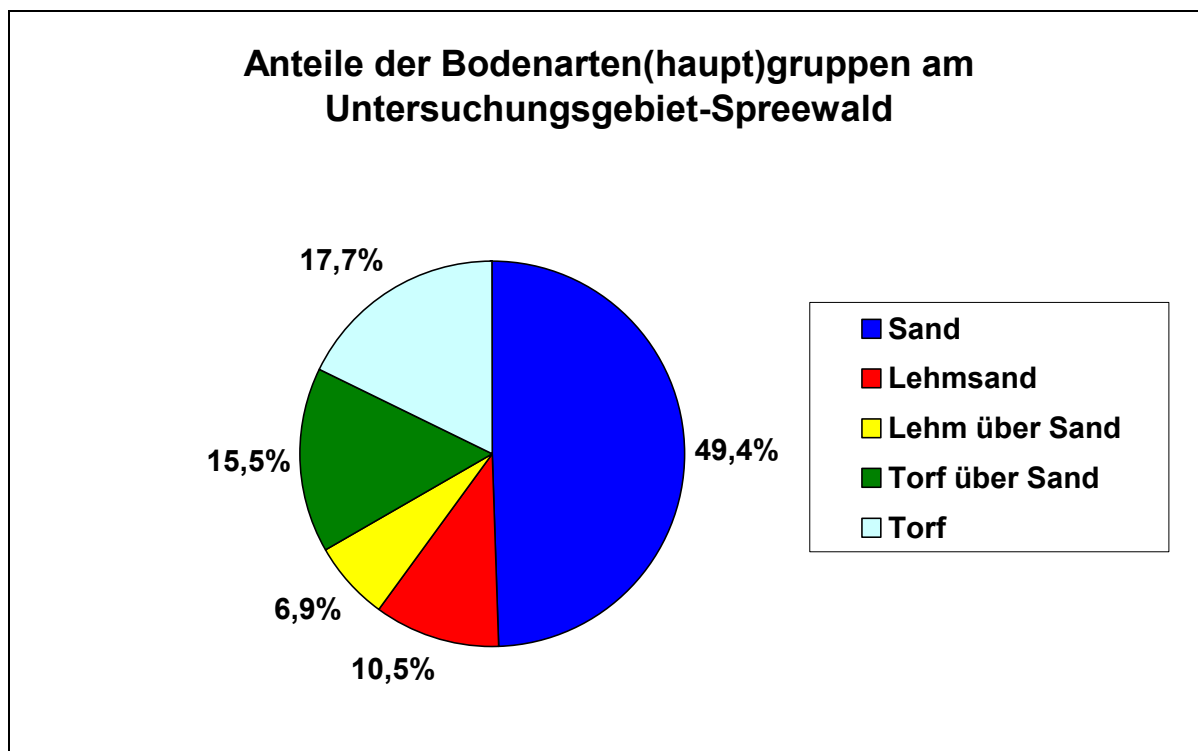


Abb. 8: Flächenanteil der Bodenarten(haupt)gruppen im Untersuchungsgebiet Spreewald

Zusammen mit den Landnutzungsklassen (vgl. Abb. 9) und den Grundwasserstufen (vgl. Tab. 2) ergeben sich hieraus eine Vielzahl von Boden-Grundwasser-Landnutzungsvarianten.

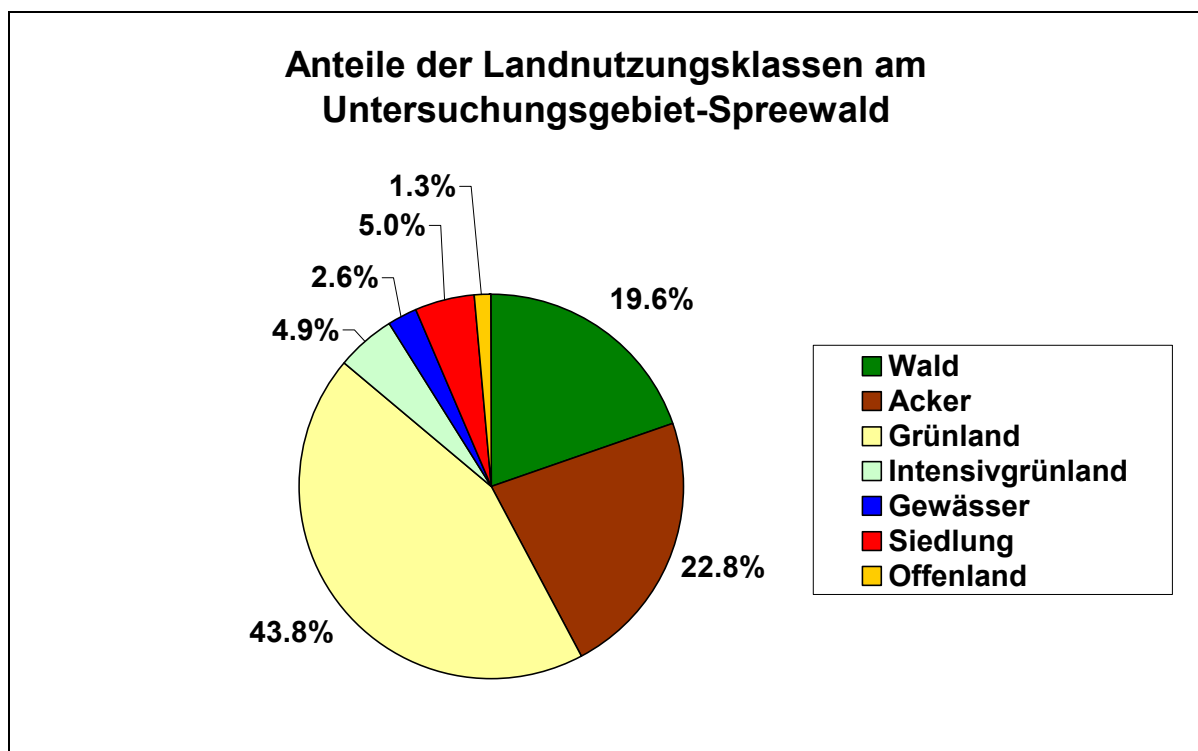


Abb. 9: Flächenanteil der Landnutzungsklassen im Untersuchungsgebiet Spreewald

## 7.2 Bodenhydraulik

Ausgehend von der erstellten Karte wurden Standardprofile beprobt und die bodenhydraulischen Kennwerte (Wasserretention, ungesättigte und gesättigte hydraulische Leitfähigkeit u.a.) ermittelt.

Den fünf Leitprofilen (Bodenarten(haupt)gruppen-Profile) wurden die bodenhydraulischen Kennwerte der eigenen gemessenen Profildaten zugewiesen. Hierbei wurde auf eine möglichst hohe Repräsentativität geachtet. Die Horizontierung der Bodenprofile aus denen die jeweiligen Substrate entnommen wurden finden sich im Anhang, Tabelle 18-22. In Abbildung 10 sind die Wasserretentionsfunktionen der einzelnen Böden der erstellten Bodenkarte des Spreewaldes dargestellt.

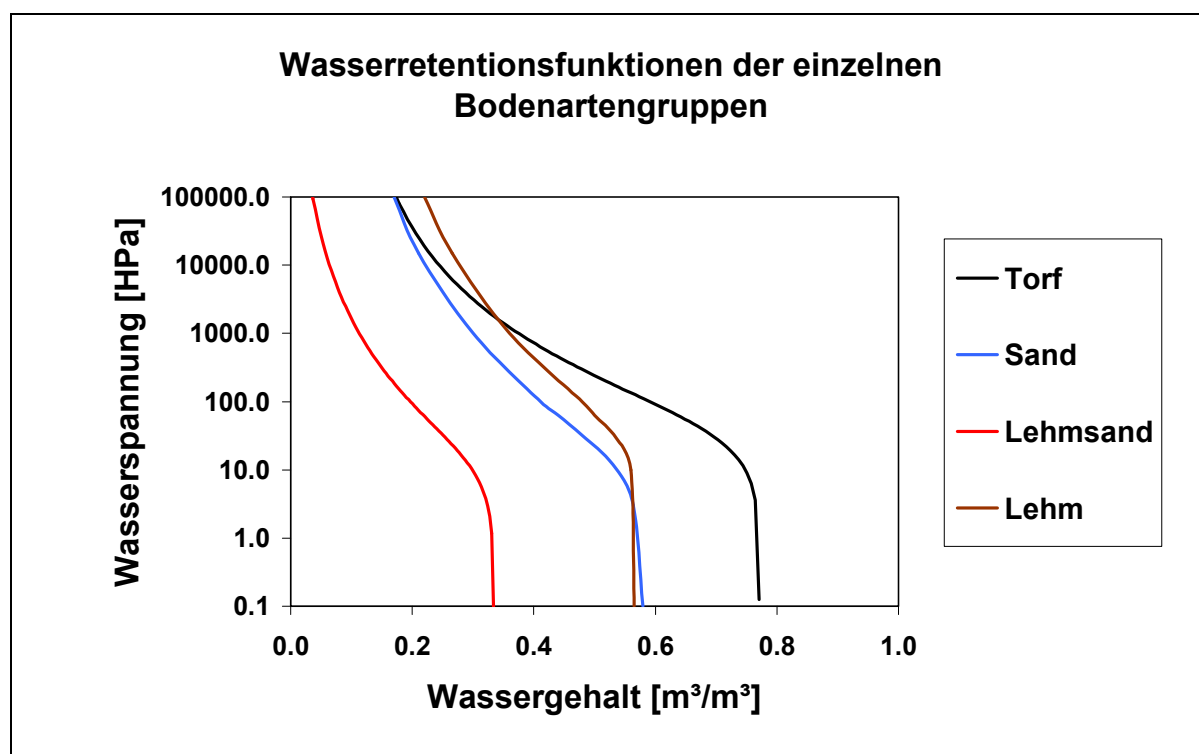


Abb. 10: Wasserretentionsfunktionen der einzelnen Bodenartengruppen im Spreewald

Die zugehörigen Parameter der pF-Anpassung nach VAN GENUCHTEN (1980) mit dem Ansatz von MUALEM (1976) (MvG) finden sich im Anhang Tabelle 23.

Es wird deutlich, dass zwischen den einzelnen Bodenartengruppen erhebliche Unterschiede in der Porengrößenverteilung und damit auch in der Wasserretentionsfunktion bestehen. Die vorkommenden **Lehmsande** weisen über alle Wasserspannungen die niedrigsten Wassergehalte auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sie bei einem sehr hohen Sandanteil (ca. 73%), vornehmlich im Fein- und Mittelsandbereich, einen geringen Humusgehalt besitzen (vgl. Tab. 4). Im Vergleich zu den Sanden zeigen sie jedoch höhere Ton- und Schluffgehalte und sind daher nach AG BODEN (1994) als S13 einzustufen.

Die vorkommenden **Sande** zeigen trotz ungünstigerer Korngrößenverteilung, d.h. höherer Sandanteil, geringere Ton- und Schluffanteile, über alle Wasserspannungen höhere Wassergehalte als die Lehmsande. Dies kann durch einen sehr hohen Humusgehalt erklärt werden, der trotz sehr hoher Sandgehalte (>90%) auch bei höheren Wasserspannungen noch für hohe Wassergehalte sorgt. Die untersuchten Sande sind daher nach AG BODEN (1994) als stark humos (H4) einzustufen.

Bei den Bodenartengruppen **Torf** und **Torf über Sand** zeigen sich vornehmlich bei niedrigen Wasserspannungen bis ca. 100 HPa hohe Wassergehalte, die dann mit steigender Wasserspannung stärker abnehmen als bei den Sanden und Lehmsanden, jedoch auch noch bei

sehr hohen Wasserspannungen hohe Wassergehalte aufweisen. Dies hängt mit dem durch die Struktur der Torfsubstanz entstehenden Porensystem und dem daraus resultierenden hohen Wasserspeichervermögen der Torfe zusammen.

Die Wasserretentionsfunktion der **Lehme** ist ebenso wie bei den Sanden durch einen sehr hohen Humusgehalt beeinflusst. Bei ansteigenden Wasserspannungen werden zunächst kaum Poren entwässert. Erst bei Wasserspannungen über 70 HPa ( $> pF 1,8$ ) fangen die Lehme an zu entwässern. Dieses hohe Wasserhaltevermögen sorgt bei hohen Grundwasserständen für Durchlüftungsprobleme im Oberboden von Lehmstandorten.

**Tab. 4: Eigenschaften der einzelnen Bodenartengruppen im Spreewald**

	<b>Sand</b>	<b>Lehmsand</b>	<b>Torf</b>
<b>Bodenart</b>	Ss (mSfs)	SI3	Hnv
<b>Lagerungsdichte [g/ccm]</b>	0.94	1.75	0.45
<b>Partikeldichte [g/ccm]</b>	2.46	2.65	1.82
<b>Ton [%]</b>	4.2	9	n.b.
<b>Schluff [%]</b>	5	18	n.b.
<b>Sand [%]</b>	90.6	73	n.b.
Feinschluff [%]	0.4	1	n.b.
Mittelschluff [%]	1.2	3	n.b.
Grobschluff [%]	3.4	13	n.b.
Feinsand [%]	42.4	40	n.b.
Mittelsand [%]	46	32	n.b.
Grobsand [%]	2.2	1	n.b.
<b>Glühverlust [%]</b>	5.9%	1.0%	45.4%
C [%]	5.30	0.48	24.60
N [%]	0.26	0	1.73
C/N	20.4	-	14.2
pH (CaCl)	5.2	5.7	5.6

(n.b. = nicht bestimmt)

Als problematisch stellte sich in diesem Zusammenhang die Ableitung der Wasserhaushaltskennwerte (FK, nFK etc.) aus den Tabellenwerken der AG BODEN (1994) heraus. Aufgrund der Auendynamik und der spezifischen Genese der Böden des Spreewaldes weichen die gemessenen Werte z.T. erheblich von den Angaben der AG BODEN (1994) ab (vgl. LORENZ 2002). Eine weitaus bessere Schätzung der Kennwerte des Wasserhaushaltes findet sich im Substrat-Horizontgruppenansatz (SHG) von RIEK ET AL (1995). Da dieser neben den Bodenarten auch die Genese berücksichtigt, liegen hier die Werte der eigenen Messungen in den selben Bereichen wie die Angaben nach RIEK ET AL. (1995). Dies zeigt deutlich, dass bei Betrachtung dieser besonderen Standorte die Herangehensweise nur über das Substrat (nach AG BODEN 1994) nicht ausreicht und in jedem Fall die Genese Berücksichtigung finden muss. In Tabelle 5 sind die Unterschiede zwischen Mess- und Schätzwerten der unterschiedlichen Tabellenwerke für die Bodeneinheit Sand dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Ansatz nach RIEK ET AL. (1995) über alle Kennwerte eine weitaus bessere Wiedergabe der Messwerte zeigt als die AG BODEN (1994).

**Tab. 5: Vergleich zwischen Mess- und Schätzwerten am Beispiel der Sande**

Bodenart	GPV	LK	nFK	FK	PWP
<b>Messung</b>					
mSfs	62	15	24	47	22
<b>KA4 (AG Boden 1994)</b>					
mSfs	43	26	14,5	16,5	2
<b>SHG (Riek et al. 1995)</b>					
mSfs	60	20,5	28,5	42	13

Aufgrund der starken Heterogenität der Lehme im Spreewald und der damit einhergehenden Streuung in den erhobenen Daten wurden die Wasserhaushaltskennwerte für die Bodeneinheit Lehm aus den Schätzwerttabellen für Auenlehme nach RIEK ET AL. (1995) entnommen, da diese eine gute mittlere Funktion der vorgefundenen Verhältnisse liefern.

Betrachtet man die Kennwerte des Bodenwasserhaushalts für die verwendeten Bodenartengruppen (vgl. Tab. 6), so werden die Auswirkungen der in Abbildung 10 dargestellten Verläufe sichtbar.

Die **nutzbare Feldkapazität (nFK)** ist für die Wasserversorgung der Pflanzen von besonderer Bedeutung. Unterschiede in der nFK wirken sich direkt auf das Pflanzenwachstum aus, sofern die Vegetation ihren Bedarf nicht aus dem kapillar aufsteigenden Grundwasser decken kann. Ein Vergleich der Bodenartengruppen in Tabelle 6 zeigt, dass hier erhebliche Unterschiede auftreten.

**Tab. 6: Kennwerte des Bodenwasserhaushalts der verwendeten Bodenartengruppen**

BHG	Bodenart	GPV	LK	nFK	FK	PWP	Glühverlust
		[Vol-%]	[Vol-%]	[Vol-%]	[Vol-%]	[Vol-%]	[M-%]
Sand	mSfs	62	15	24	47	22	5.9%
Lehmsand	St2	34	12	17	22	5	1.0%
Torf	Hp	75	12	39	64	25	45.4%
Lehm*	Lt2	56.5	7.5	23	49	26	11.5%

\* die Kennwerte für die Bodeneinheit Lehm wurden aus den Schätzwerttabellen nach RIEK ET AL. (1995) abgeleitet

Beim verwendeten Lehmsand tritt aufgrund der Korngrößenzusammensetzung und des niedrigen Anteils an organischer Substanz die geringste nFK auf (17 Vol%). Die Sande weisen nur aufgrund des hohen Anteils an organischer Substanz eine hohe nFK auf (24%), da dieser positiv auf die Wassergehalte in diesem Wasserspannungsbereich wirkt. Die höchsten Wassergehalte in diesem Bereich (39 Vol%) zeigen, aufgrund ihres hohen Wasserspeichervermögens, die Torfe. Die Lehme nehmen, aufgrund ihrer Korngrößenverteilung und der hohen Gehalte an organischer Substanz mit einer nFK von 27 Vol% eine Mittelstellung zwischen Lehmsanden und Torfen ein.

Die Unterschiede werden noch deutlicher, wenn man die **nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum (nFK<sub>we</sub>)** betrachtet, die für die Wasserversorgung der Pflanzen ausschlaggebend ist. Geht man von einem Wurzelraum von 3 dm aus, der in der Realität aufgrund der Durchwurzelbarkeit der unterschiedlichen Substrate jedoch unterschiedlich hoch ausfallen wird, so treten Wassergehalte:

- beim Sand von ca. 72 mm,
- beim Lehmsand von ca. 51 mm,
- beim Torf von ca. 117 mm und
- beim Lehm von ca. 69 mm auf.

Es wird deutlich, dass den Pflanzen auf einem Torfstandort über die nFK<sub>we</sub> bei gleicher Durchwurzelungstiefe mehr als das doppelte der Wassermenge eines Lehmsandstandortes zur Verfügung steht. Dies wirkt sich v.a. in Trockenzeiten stark auf das Pflanzenwachstum aus. Die Werte der nFK<sub>we</sub> sind nach AG BODEN (1994) als gering einzustufen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass auf grundwassernahen Standorten, wie sie im Spreewald vorherrschen, die pflanzenverfügbare Wassermenge nicht allein durch die nFK<sub>we</sub> bestimmt

wird, sondern auch vom kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser in den Wurzelraum abhängt. Diese Größe soll u.a. in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden.

Ein weiterer, für das Pflanzenwachstum wichtiger Parameter ist die **Luftkapazität (LK)**. Sie ist bei allen Bodenartengruppen nach AG BODEN (1994) als mittel bis hoch einzustufen. Das bedeutet, dass eine ausreichende Durchlüftung des Bodens gegeben ist, sofern kein Zustand der Sättigung, durch Grund- oder Stauwassereinfluss, vorliegt.

Bei Wassergehalten bei **permanentem Welkepunkt (PWP)** beginnt die Vegetation irreversibel zu welken. Die Werte bei permanentem Welkepunkt sind bei Torf und v.a. bei Sand als hoch einzustufen. Bei den Sanden werden diese Werte durch den hohen Anteil an organischer Substanz verursacht, da dadurch ein Feinporensystem entsteht, das bei reinen Sanden nicht anzutreffen ist. Somit sind die Wassergehalte von herkömmlichen Sanden bei PWP mit geringerem organischen Anteil weitaus niedriger als die gezeigten.

Aus den ermittelten pF-Funktionen wurde das **entwässerbare Porenvolumen (PV)** für Verhältnisse im statischen Gleichgewicht berechnet (vgl. Abb. 11). Bei den Zweischichtprofilen wird der Substratwechsel bei einer Tiefe von 50 cm unter GOF angenommen.

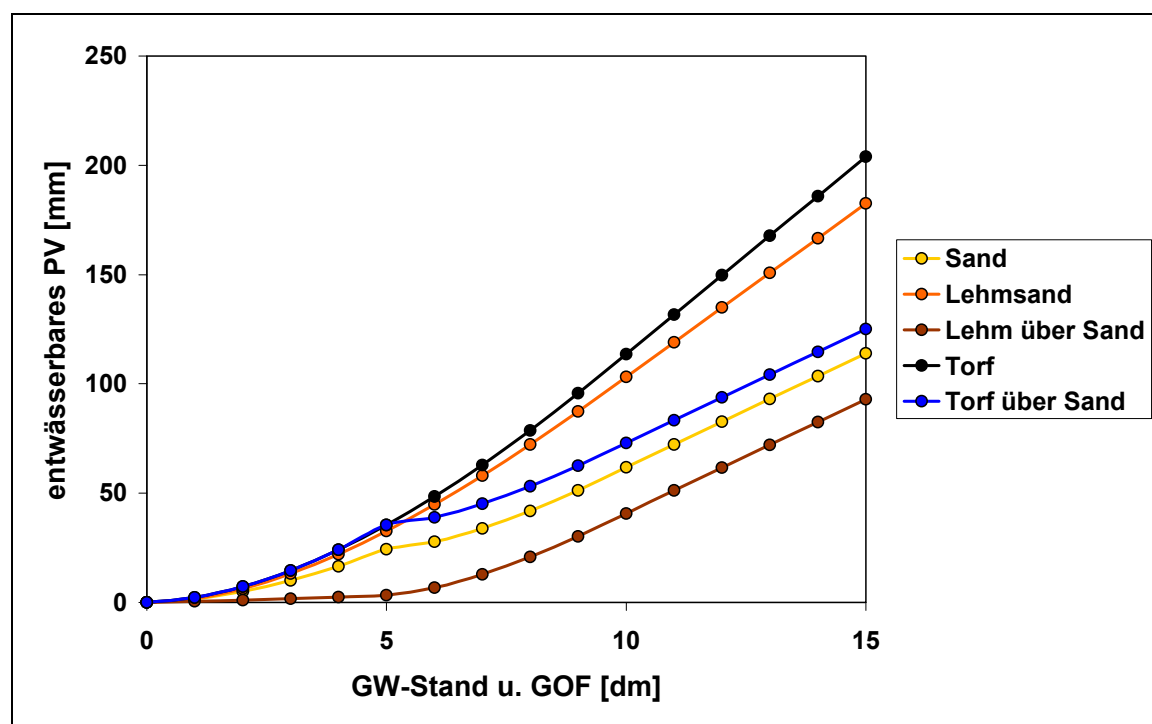


Abb. 11: Entwässerbares Porenvolumen der fünf Bodenartengruppen bei Grundwasserabsenkung

Hierbei wurde davon ausgegangen, dass bei einer Grundwasserabsenkung auf 100 cm unter GOF eine Wasserspannung von pF 2,0 an der Geländeoberkante herrscht. Unterhalb von 100 cm unter GOF wurde Feldkapazität angenommen. Senkt man z.B. bei einem Torf den Grundwasserstand von 30 cm auf 50 cm unter GOF ab, so entspricht das einem PV von ca. 20 l/m<sup>2</sup>. Bei einem Lehm beträgt das PV bei gleicher Grundwasserabsenkung nur ca. 2 l/m<sup>2</sup>.

Bis zu einem GW-Stand von ca. 5 dm bestehen zwischen den Bodenartengruppen Torf, Torf über Sand und Lehmsand kaum Unterschiede hinsichtlich des entwässerbaren Porenvolumens. Sand weist bis zu diesem GW-Stand etwas geringere Werte auf und beim Lehm werden, aufgrund der Korngrößenverteilung und der damit einhergehenden stärkeren Bindung des Wassers in den Porenräumen, kaum Poren entwässert.

Die reinen Torfe weisen bei weiter sinkenden GW-Ständen das höchste entwässerbare Porenvolumen auf. Dies ist in der Struktur und dem Porensystem der Torfsubstanz begründet, was zu einem hohen Wasserspeichervermögen der Torfe führt. Bei den Bodenartengruppen Sand, Torf über Sand und Lehm über Sand findet ein Substratwechsel zwischen 5-7 dm statt. Aufgrund dessen gewinnen die darunter anstehenden Talsande bei sinkenden GW-Ständen

eine größere Bedeutung für das entwässerbare Porenvolumen. Es ist festzuhalten, dass bei den Bodenartengruppen mit Substratwechsel im Profilaufbau die Werte des entwässerbaren Porenvolumens aufgrund der Eigenschaften des darunter anstehenden Talsandes beim Sand und Torf über Sand niedriger ausfallen als bei einem entsprechenden Einschichtprofil. Eine Ausnahme bildet hier der Lehm über Sand. Aufgrund der Korngrößenverteilung der Lehme werden bei hohen GW-Ständen kaum Poren entwässert, da das Wasser stark in den Porenräumen gebunden ist.

Das entwässerbare Porenvolumen ist u.a. eine wichtige Größe bei der Berechnung des Wasserhaushaltes und der Wasserverteilung für das Spreewaldgebiet. Die ermittelten Werte wurden in Abhängigkeit von Boden und GW-Stand an das TV 2.3 übergeben und gehen in die Berechnungen zur Wasserverteilung im Gebiet mit Hilfe des Wasserverteilungsmodells ArcGRM-Spreewald ein.

Weitere für die Berechnung des Wasserhaushaltes wichtige Parameter sind, neben der Wasserretention, die **gesättigte (kf) und die ungesättigte (ku) Wasserleitfähigkeit**. Die Wasserleitfähigkeit wird im Wesentlichen durch die Anzahl, die Größe und die Form der im Boden vorhandenen Poren bestimmt. Aufgrund der Eigenschaften der verschiedenen Böden und den damit einhergehenden Unterschieden in den Porenräumen bestehen hinsichtlich der kf- und ku-Werte erhebliche Unterschiede. Die kf-Werte der unterschiedlichen Böden sind in Tabelle 7 dargestellt, die ku-Funktionen finden sich in Abbildung 12. Diese Größen sind z.B. für die Berechnung der Versickerung, der Grundwasserneubildung, der kapillaren Aufstiegsraten aus dem Grundwasser oder der Verdunstungswerte von besonderer Bedeutung. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass die k-Werte einer sehr großen Streuung unterliegen. Diese kann z.B. durch Regenwurmgänge oder ehemalige Wurzelbahnen verursacht sein, die das Wasser sehr schnell abführen und so sehr hohe k-Werte erzeugen. Aus diesem Grund sollte auf eine ausreichend hohe Anzahl von Wiederholungen geachtet werden.

Abbildung 12 zeigt die ku-Funktionen für die Bodenartengruppen Sand, Lehmsand und Torf. Die zugehörigen Parameter der Ku-Anpassung nach VAN GENUCHTEN (1980) mit dem Ansatz von MUALEM (1976) sind im Anhang, Tabelle 24 dargestellt.

Die **kf-Werte** entsprechen den Werten bei einer Wasserspannung von null (Sättigung). In Tabelle 7 sind die gemessenen kf-Werte den Werten nach AG BODEN (1994) gegenübergestellt. Bei den Bodenartengruppen Lehmsand und Torf stimmen die Werte gut überein, beim Torf wird die gesättigte Wasserleitfähigkeit durch die Schätzwerte (AG BODEN 1994) nur leicht unterschätzt. Bei der Bodeneinheit Sand treten jedoch erhebliche Unterschiede auf. Dies ist wiederum auf die Genese und die sehr hohen Humusgehalte der verwendeten Sande zurückzuführen, welche zu anderen hydraulischen Eigenschaften der verwendeten Substrate führen, als sie in den Schätzwerttabellen für vergleichbare, herkömmliche Sande zu Grunde gelegt werden. Die Werte der gesättigten Wasserleitfähigkeit sind für die Bodenartengruppen Sand und Torf nach AG BODEN (1994) als mittel einzustufen, für die Lehmsande sind sie als hoch zu bezeichnen. Hierbei ist zu beachten, dass die kf-Werte bei der Anpassung der Funktionen als veränderbare Größen eingehen, so dass die dargestellten Werte auf Grundlage eigener Messungen aus einem Fitting der Funktionen resultieren.

**Tab. 7: Vergleich der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf) in [cm/d] zwischen der eigenen Messung und den Werten nach AG BODEN (1994)**

	Sand	Lehmsand	Torf
<b>Bodenart</b>	mSfs	Sl3	Hnv
<b>kf</b> (Messung)	13	34	14
<b>kf</b> (AG Boden 1994)	311	33	1 - 10



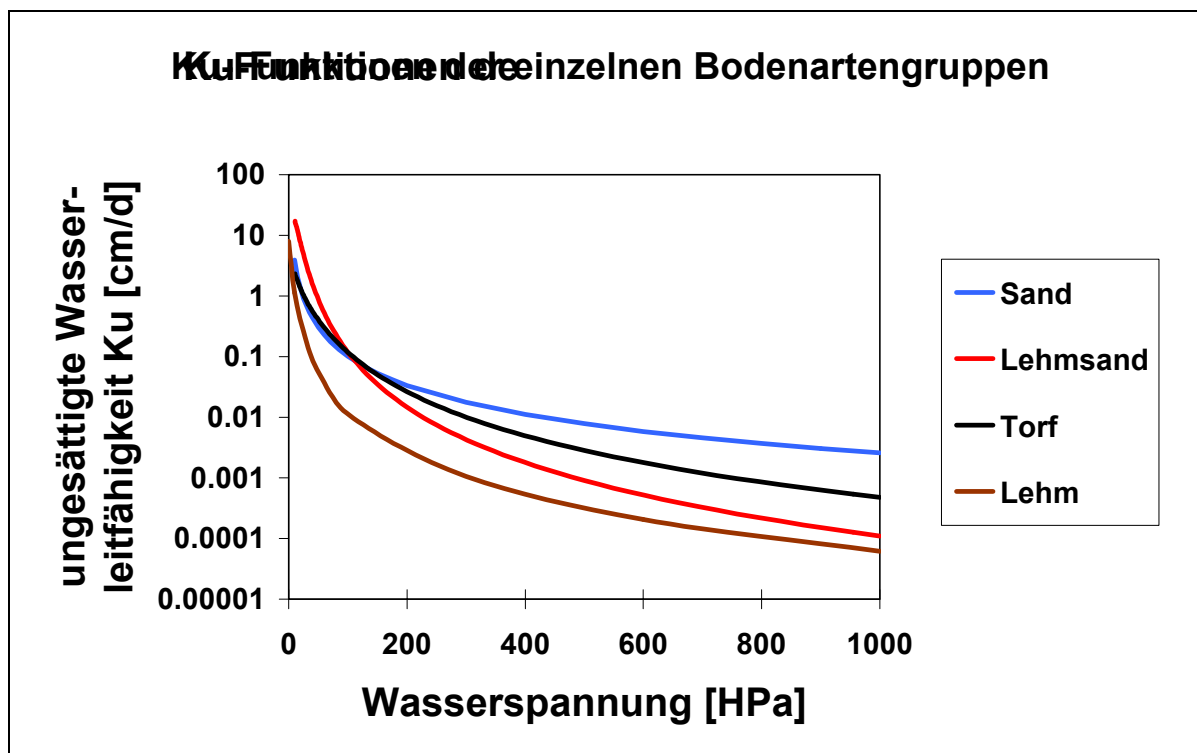


Abb. 12: Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeiten der einzelnen Bodenartengruppen im Spreewald

Der Verlauf der **ku-Werte** zeigt mit steigender Wasserspannung größer werdende Unterschiede zwischen den einzelnen Bodenartengruppen. Bei einer Wasserspannung von ca. 100 HPa (pF 2,0) schneiden sich die Kurven. Die Lehmsande zeigen bei Wasserspannungen < 100 HPa die höchsten hydraulischen Leitfähigkeiten. Sande und Torfe haben in diesem Bereich ähnliche Verläufe, wobei die Sande bei kleinen Wasserspannungsänderungen hohe Leitfähigkeitsabnahmen aufweisen, ebenso wie die Lehme. Bei Wasserspannungen > 100 HPa besitzen die Sande die höchsten hydraulischen Leitfähigkeiten, die Lehme die niedrigsten. Die Torfe und Lehmsande nehmen eine Mittelstellung ein. Die Lehme weisen über alle Wasserspannungen die niedrigsten hydraulischen Leitfähigkeiten auf.

Die Unterschiede zwischen den Bodenartengruppen verstärken sich mit steigender Wasserspannung. Auch hier zeigen die verwendeten Sande einen für Sande untypischen Verlauf. Dies hängt wiederum mit dem sehr hohen Humusgehalt dieser Sande zusammen, der dafür sorgt, dass sich die hydraulischen Parameter verschieben. Herkömmliche Sande sollten einen höheren kf-Wert haben als Lehmsande oder Torfe (vgl. Tabelle 7, Angaben AG BODEN 1994).

Ein in diesem Zusammenhang wichtiger Parameter für die Wasserversorgung der Vegetation ist der kapillare Aufstieg aus dem Grundwasser in den Wurzelraum. Er wird über die Beziehung zwischen Wasserleitfähigkeit und Saugspannung ermittelt und als **kapillare Aufstiegsrate  $V_{kap}$**  in [mm/d] angegeben. Bei grundwassernahen Standorten kann die Vegetation ihren Wasserbedarf sowohl aus der nFK des effektiven Wurzelraums als auch aus dem kapillar aufsteigenden Grundwasser decken. Daher ist vor allem in Trockenzeiten die kapillare Nachlieferung aus dem Grundwasser wichtig für die Wasserversorgung der Pflanzen. Im Anhang Tabelle 25 und 26 finden sich die kapillaren Aufstiegsraten der unterschiedlichen Bodenartengruppen für das Referenz- und das B2-Basiszenario. In Abbildung 11 und Tabelle 8 ist der berechnete kapillare Aufstieg [mm] aus dem Grundwasser in den effektiven Wurzelraum unter Grünland für die verschiedenen Bodenartengruppen in der Vegetationsperiode (01.04 - 30.09) im Referenz- und B2-Basiszenario bei Durchwurzelungstiefen nach Tabelle 9 dargestellt. Mit der Berücksichtigung unterschiedlicher Durchwurzelungstiefen in Abhängigkeit des Grundwasserstandes soll eine gewisse Dynamik des Pflanzenwachstums mit in die Berechnungen einbezogen werden.



Abbildung 13 zeigt deutlich den Einfluss der Bodenart und des Grundwasserstands auf den kapillaren Aufstieg in den unterschiedlichen Szenarien. Bei hohen Grundwasserständen zeigen die **Sande** den höchsten kapillaren Aufstieg. Aufgrund der Korngrößenverteilung und der damit einhergehenden Eigenschaften des Porensystems treten beim Sand zunächst hohe Aufstiegsraten auf, die Aufstieghöhen sind jedoch gering. Bei sinkenden GW-Ständen und damit größerem Abstand zum Wurzelraum sinken die Werte beim Sand stark ab, so dass sie ab GW-Ständen tiefer als 70-80 cm unter GOF niedriger sind als die der anderen Bodenarten. Grundwasserabsenkungen haben daher bei den Sanden starke Auswirkungen auf die kapillare Nachlieferung. Eine Grundwasserabsenkung von 30 cm auf 60 cm unter GOF hätte demnach mehr als eine Halbierung des kapillaren Aufstiegs zur Folge. Dieses Wasser steht der Vegetation nicht mehr zur Verfügung. Hierbei ist zu beachten, dass der kapillare Aufstieg bei hohen GW-Ständen modellbedingt etwas zu hoch ist, da von einem gleichbleibendem Grundwasserstand ausgegangen wurde. Unter natürlichen Bedingungen kommt es aber zu einem Absinken der Grundwasserstände im Verlauf der Vegetationsperiode und damit zu einer Minderung des kapillaren Aufstiegs.

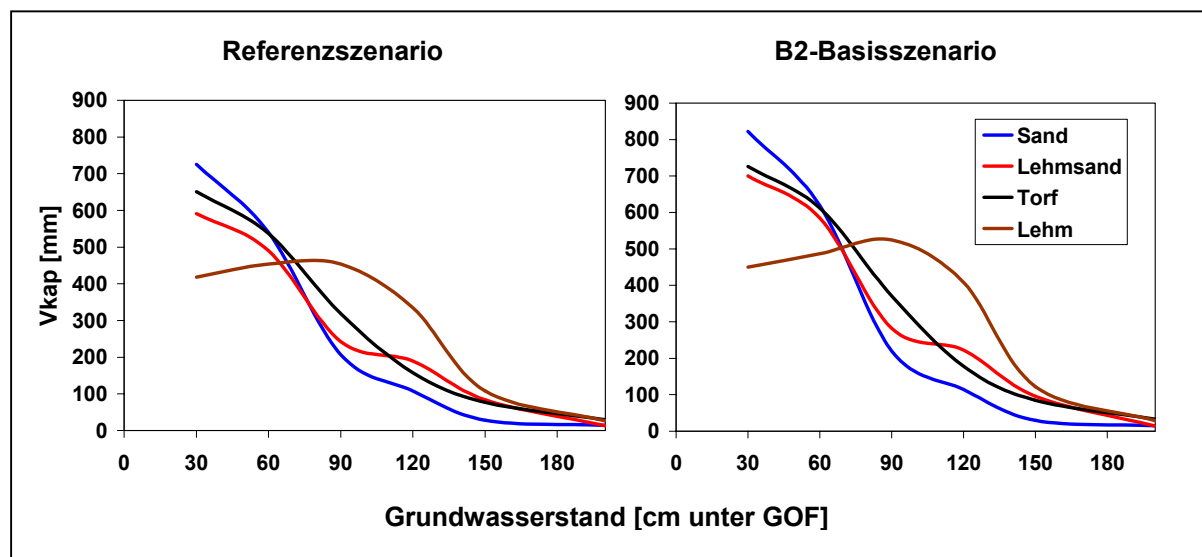


Abb. 13: Mittlerer kapillarer Aufstieg [mm] für die verschiedenen Bodenartengruppen in der Vegetationsperiode (01.04 - 30.09.) unter Grünland im Referenz- und B2-Basisszenario bei Durchwurzelungstiefen nach Tab. 9

Der kapillare Aufstieg der **Lehmsande** ist bei hohen GW-Ständen niedriger als bei den Sanden. Aufgrund der Korngrößenverteilung (höhere Ton- und Schluffgehalte als die Sande) ist die Geschwindigkeit der Wassernachlieferung geringer, die Aufstiegshöhen jedoch größer. So zeigen die Lehmsande ebenfalls stark absinkende Werte bei mittleren GW-Ständen, haben bei tieferen GW-Ständen jedoch, im Vergleich zu den Sanden, die etwas höheren kapillaren Aufstiegsraten.

Die **Torfe** zeigen einen etwas ausgeglicheneren Verlauf. Bei hohen GW-Ständen weisen auch sie recht hohe Werte auf (600-650 mm im Referenzszenario). Diese fallen bei mittleren GW-Ständen nicht so stark ab wie die der Sande oder Lehmsande, sind aber bei tiefen GW-Ständen mit denen der Lehmsande vergleichbar.

Die **Lehme** zeigen einen völlig anderen Verlauf als die anderen Bodenartengruppen. Bei hohen GW-Ständen weisen sie die geringsten Werte aller Bodenartengruppen auf. Bis zu einem GW-Stand von ca. 90 cm unter GOF steigen die Werte an und fallen für weiter sinkende GW-Stände stark ab. Ab einem GW-Stand von ca. 150 cm unter GOF ist der kapillare Aufstieg bei Lehmen mit denen der Lehmsande und Torfe vergleichbar. Bei GW-Ständen zwischen ca. 70 bis 150 cm unter GOF weisen die Lehme im Vergleich zu den anderen Bodenartengruppen den höchsten kapillaren Aufstieg auf.

Ein Vergleich zwischen den Szenarien zeigt, dass sich die Kurvenverläufe kaum ändern, die absolute Höhe des kapillaren Aufstiegs jedoch natürlich klimaabhängig ist. Aufgrund des ansteigenden Wasseranspruchs der Atmosphäre bei veränderten Klimabedingungen kommt es bei gleichen GW-Ständen, v.a. bei hohen und z.T. auch bei mittleren GW-Ständen zu einem Anstieg des kapillaren Aufstiegs. Ab einem GW-Stand von ca. 150 cm unter GOF ist der Einfluss der klimatischen Gegebenheiten auf die kapillaren Aufstiegsraten vernachlässigbar. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass ein verändertes Klima ebenfalls die vorherrschenden GW-Stände beeinflusst. So führt z.B. die angenommene Klimaänderung bei gleichzeitigem Absinken des GW-Standes von 30 auf 60 cm unter GOF für Grünland auf Torf zu einer Reduzierung des kapillaren Aufstiegs von ca. 650 cm auf ca. 610 mm in der Vegetationsperiode (vgl. Tab. 8).

**Tab. 8: Mittlerer kapillarer Aufstieg [mm] für die verschiedenen Bodenartengruppen innerhalb der Vegetationsperiode (01.04 - 30.09) im Referenz- und B2-Basisszenario bei Durchwurzelungstiefen nach Tab. 9**

GW-Stand	Sand		Lehmsand		Torf		Lehm	
	Ref.-S.	B2-S.	Ref.-S.	B2-S.	Ref.-S.	B2-S.	Ref.-S.	B2-S.
30 cm	730	820	590	700	650	730	420	450
60 cm	540	620	490	590	540	610	450	490
90 cm	210	220	240	280	320	370	450	530
120 cm	110	115	190	220	160	180	340	410
150 cm	28	29	85	95	75	85	110	120
200 cm	14	15	13	14	30	32	26	29

**Tab. 9: Durchwurzelungstiefen [dm] unter Grünland für die verschiedenen Bodenartengruppen bei unterschiedlichen Grundwasserständen**

Boden	Sand	Lehmsand	Torf	Lehm
GW-Stand	Tiefe des effektiven Wurzelraumes in dm			
30 cm	2	2	2	2
60 cm	2	2	2	2
90 cm	3	3	3	3
120 cm	4	4	3	4
150 cm	4	4	3	4
200 cm	4	4	3	4

Hierbei werden die Auswirkungen von sinkenden GW-Ständen auf die Wasserversorgung der Vegetation besonders deutlich. Geht man im B2-Basisszenario von einer erhöhten Einstrahlung und abnehmenden Niederschlägen im Sommerhalbjahr und einer damit einhergehenden Absenkung der GW-Stände aus, wird deutlich, dass den Pflanzen dadurch erheblich weniger Wasser zur Verfügung stehen wird. Es kommt u.U. zu einer verstärkten Austrocknung des Oberbodens, so dass die Pflanzen zeitweise ihren Bedarf weder aus dem im Wurzelraum enthaltenen Wasser noch aus dem kapillar aufsteigenden Grundwasser decken können. Das bedeutet die pflanzenverfügbare Wassermenge nimmt ab. Die Folge wäre eine Zunahme der Trockenstressereignisse pro Jahr. Dies hätte erheblichen Einfluss auf die vorherrschenden Vegetationstypen, die Biodiversität und die Ertragslage im Spreewaldgebiet (vgl. Kap. 7.4 und EB TV 2.7).

Aus der nutzbaren Feldkapazität im Wurzelraum und dem kapillar aufsteigenden Grundwasser lässt sich die pflanzenverfügbare Wassermenge berechnen. Sie beinhaltet die für die Wasserversorgung der Pflanzen wichtigen Größen und lässt so einen Vergleich der unterschiedlichen Varianten (Boden, GW-Stand) zu.

Die nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum wurde für die unterschiedlichen Böden am Anfang dieses Kapitels dargestellt. Tabelle 10 zeigt die Werte der  $nFK_{we}$  für die unterschiedli-

chen Böden und drei unterschiedliche Durchwurzelungstiefen.

**Tab. 10: Nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum ( $nFK_{we}$ ) für unterschiedliche Durchwurzelungstiefen**

effektiver Wurzelraum	$nFK_{we}$ [mm]		
	2 dm	3 dm	4 dm
<b>Sand</b>	48	72	96
<b>Lehmsand</b>	34	51	68
<b>Torf</b>	78	117	156
<b>Lehm</b>	46	69	92

Ebenso wurden die kapillaren Aufstiegsraten aus dem Grundwasser in den effektiven Wurzelraum für Grünland dargestellt (vgl. Tab. 8 und 11). Der Wurzelraum wurde für einen GW-Stand von 60 cm unter GOF mit 2 dm, für einen GW-Stand von 90 cm unter GOF mit 3 dm und für eine GW-Stand von 150 cm unter GOF mit 4 dm angenommen.

**Tab. 11: Mittlerer kapillarer Aufstieg ( $V_{kap}$ ) während der Vegetationsperiode im Referenz- und B2-Basiszenario für unterschiedliche GW-Stände und Wurzelräume**

	$V_{kap}$ [mm]			$V_{kap}$ [mm]		
	Referenzzenario			B2-Basiszenario		
	45 cm	90 cm	150 cm	45 cm	90 cm	150 cm
Grundwasserstand	45 cm	90 cm	150 cm	45 cm	90 cm	150 cm
effektiver Wurzelraum	2 dm	3 dm	4 dm	2 dm	3 dm	4 dm
<b>Sand</b>	630	210	30	720	220	30
<b>Lehmsand</b>	540	240	85	640	280	95
<b>Torf</b>	590	320	80	670	370	85
<b>Lehm</b>	440	460	110	470	530	120

Daraus ergeben sich die in Tabelle 12 dargestellten Werte der pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge.

**Tab. 12: Pflanzenverfügbare Wassermenge für die Vegetationsperiode von Grünland im Referenz- und B2-Basiszenario**

	$W_{pfl}$ [mm]			$W_{pfl}$ [mm]		
	Referenzzenario			B2-Basiszenario		
	45 cm	90 cm	150 cm	45 cm	90 cm	150 cm
Grundwasserstand	45 cm	90 cm	150 cm	45 cm	90 cm	150 cm
effektiver Wurzelraum	2 dm	3 dm	4 dm	2 dm	3 dm	4 dm
<b>Sand</b>	680	280	120	770	290	125
<b>Lehmsand</b>	580	290	150	680	330	160
<b>Torf</b>	670	440	190	750	490	200
<b>Lehm</b>	480	520	200	510	590	210

Die ausgewählten Varianten sollen das Spektrum der vorkommenden Varianten abdecken. So kann man bei GW-Ständen von 45 cm unter GOF von einer extensiven Grünlandnutzung und bei 90 cm unter GOF von einer intensiveren Grünlandnutzung ausgehen. GW-Stände von 150 cm unter GOF sind an den Randbereichen der Niederung anzutreffen. Die Ergebnisse zeigen, dass bei hohen GW-Ständen v.a. das kapillar nachgelieferte Grund-

wasser zum pflanzenverfügbaren Bodenwasser beiträgt. Bei sinkenden GW-Ständen wird hingegen der Beitrag der nFK relevanter. Die Sande zeigen in beiden Szenarien die stärkste Abnahme des pflanzenverfügbaren Wassers mit sinkenden GW-Ständen. So weisen sie bei hohen GW-Ständen die höchsten Werte aller bodenhydrologischen Einheiten auf, bei niedrigen GW-Ständen jedoch die niedrigsten. Bei Sand, Lehmsand und Torf sinkt die Menge des pflanzenverfügbaren Bodenwassers mit sinkenden GW-Ständen. Die Lehme bilden auch hier aufgrund ihrer Eigenschaften eine Ausnahme. Hier treten die höchsten pflanzenverfügbaren Wassermengen bei GW-Ständen von 60 – 90 cm unter GOF auf. Die Klimaveränderung mit erhöhten Verdunstungswerten führt bei hohen GW-Ständen aufgrund der höheren kapillaren Nachlieferung zu mehr pflanzenverfügbarem Bodenwasser. Bei sinkenden GW-Ständen nimmt der Einfluss des Klimas ab und ist bei 150 cm unter GOF nicht mehr zu verzeichnen. Abbildung 14 zeigt den Einfluss der unterschiedlichen Böden und der Nutzung auf die Höhe des pflanzenverfügbaren Bodenwassers.

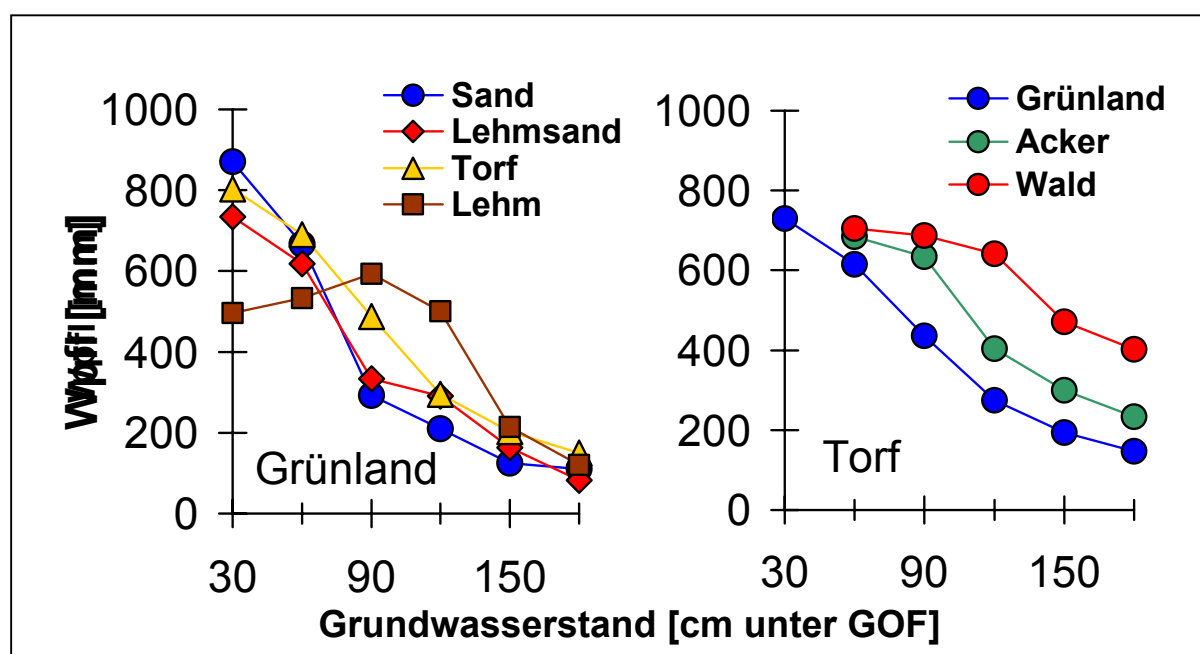


Abb. 14: Einfluss unterschiedlicher Böden und Nutzungen auf das pflanzenverfügbare Bodenwasser im Referenzszenario

Es wird deutlich, dass die bodenhydrologischen Einheiten Sand, Lehmsand und Torf bezüglich des pflanzenverfügbaren Bodenwassers ähnliche Verläufe zeigen. Ausnahme bilden die Lehme (vgl. Abb. 13 links). Der Vergleich der unterschiedlichen Nutzungen zeigt, dass die Unterschiede bei sinkenden GW-Ständen zunehmen. Dies ist auf die unterschiedlichen Durchwurzelungstiefen und –intensitäten und damit auf unterschiedliche Wassermengen im Wurzelraum zurückzuführen. Bei hohen GW-Ständen treten zwischen den Nutzungen kaum Unterschiede auf.

#### Fazit:

In diesem Kapitel konnte gezeigt werden, dass sowohl die unterschiedlichen bodenhydrologischen Einheiten als auch der GW-Stand erheblichen Einfluss auf die bodenhydraulischen Werte haben und somit als Eingangsgrößen in die Wasserhaushaltsberechnungen eingehen. Des Weiteren wurde deutlich, dass der Einfluss der klimatischen Verhältnisse bei hohen GW-Ständen am größten ist, und mit sinkendem GW-Stand abnimmt. Im Gegensatz dazu tritt bei mittleren und tiefen GW-Ständen der Einfluss der Bodeneigenschaften stärker in den Vordergrund.

Die dargestellten Ergebnisse zur Bodenhydraulik sind in die Berechnungen des Wasserhaushaltes für das Spreewaldgebiet eingeflossen. Die Ergebnisse hierzu werden im folgenden Kapitel dargestellt, wobei die Auswirkungen der Ergebnisse zur Bodenhydraulik in den einzelnen Szenarien deutlich werden.

### 7.3 Bodenwasserhaushalt

Die Modellberechnungen zum Wasserhaushalt des Spreewaldes erfolgten auf Grundlage der erstellten Bodenkarte und der Landnutzungsklassen (TV 2.7) für die vorgegebenen Szenarien.

Mit Hilfe der Klimadaten der DWD-Station Cottbus und den nach dem Ansatz von RICHTER (1996) korrigierten Niederschlagswerten der DWD-Außenstation Burg (reale Klimareihe 1952 – 1998) wurde repräsentativ für den Spreewald die **Klimatische Wasserbilanz (KWB)** berechnet. Sie ist die Differenz zwischen mittlerem Niederschlag und mittlerer potenzieller Verdunstung, wobei die Berechnung der Verdunstung einerseits nach dem Ansatz von HAUDE (1955) und andererseits nach der von der FAO empfohlenen Grasreferenzverdunstung erfolgte (vgl. Kap. 6.2). Die KWB wurde sowohl für die reale Klimareihe (1952-98) als auch für die B2-Klimareihe (2001-55, Realisation 32) berechnet. Bei den Berechnungen zur B2-Klimareihe wurden die Klimaszenarien der AG Gerstengarbe (PIK) zugrundegelegt.

Die **Niederschläge** (vgl. Abb. 15) gehen im Jahresmittel innerhalb des betrachteten Zeitraums zurück, wobei im B2-Basisszenario von einem Rückgang von ca. 10 % zwischen den Jahren 2001 und 2055 ausgegangen wird. Der Großteil dieser Abnahmen ist auf einen Rückgang der Sommerniederschläge zurückzuführen, wohingegen die winterlichen Rückgänge eher als gering zu bezeichnen sind.

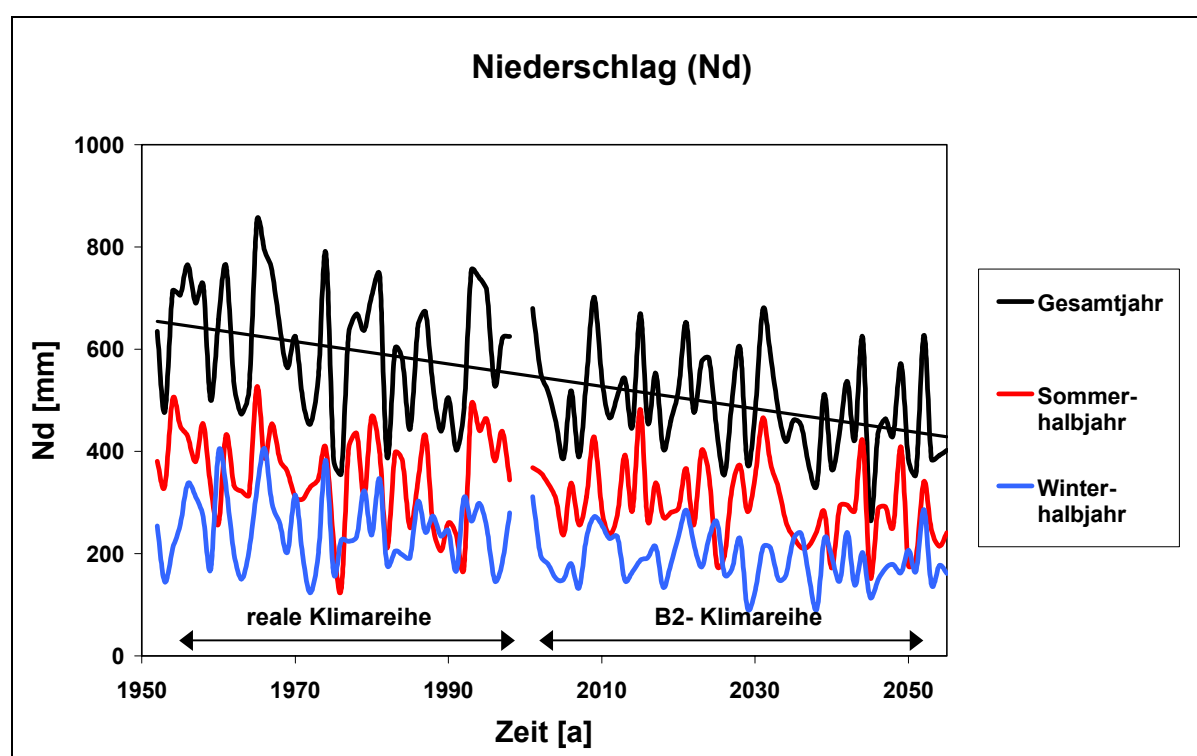


Abb. 15: Niederschlag (Nd)

In die Berechnungen der FAO-Grasreferenzverdunstung gehen nur meteorologische Größen ein (vgl. Kap. 6.2). Im betrachteten Zeitraum zeigt sie im Jahresmittel ansteigende Werte (vgl. Abb. 16). Zwischen den Jahren 2001 und 2055 erhöht sich die Grasreferenzverdunstung

um ca. 15%. Dies ist auf den angenommenen Temperaturanstieg von  $1,4^{\circ}\text{K}$  bis 2055 und eine erhöhte Einstrahlung im Sommerhalbjahr zurückzuführen. Im Gegensatz zum Winterhalbjahr ist im Sommerhalbjahr mit einer ansteigenden Verdunstung zu rechnen.

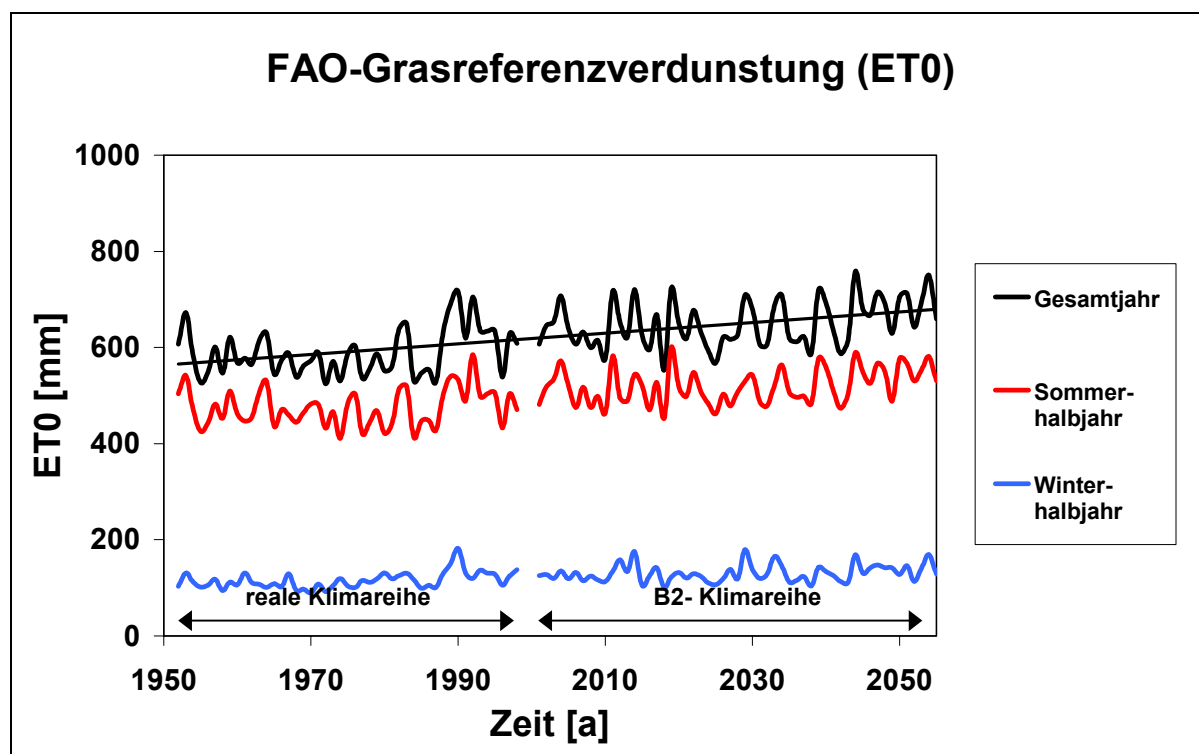


Abb. 16: FAO-Grasreferenzverdunstung (ET<sub>0</sub>)

Auch bei der potenziellen Verdunstung nach HAUDE (1955) sind im Jahresmittel innerhalb des betrachteten Zeitraums ansteigende Werte zu beobachten. Aufgrund der angenommenen Klimaänderung ist zwischen den Jahren 2001 und 2055 ein Anstieg der potenziellen Verdunstung nach HAUDE (1955) von ca. 13 % zu verzeichnen (vgl. Abb. 17).

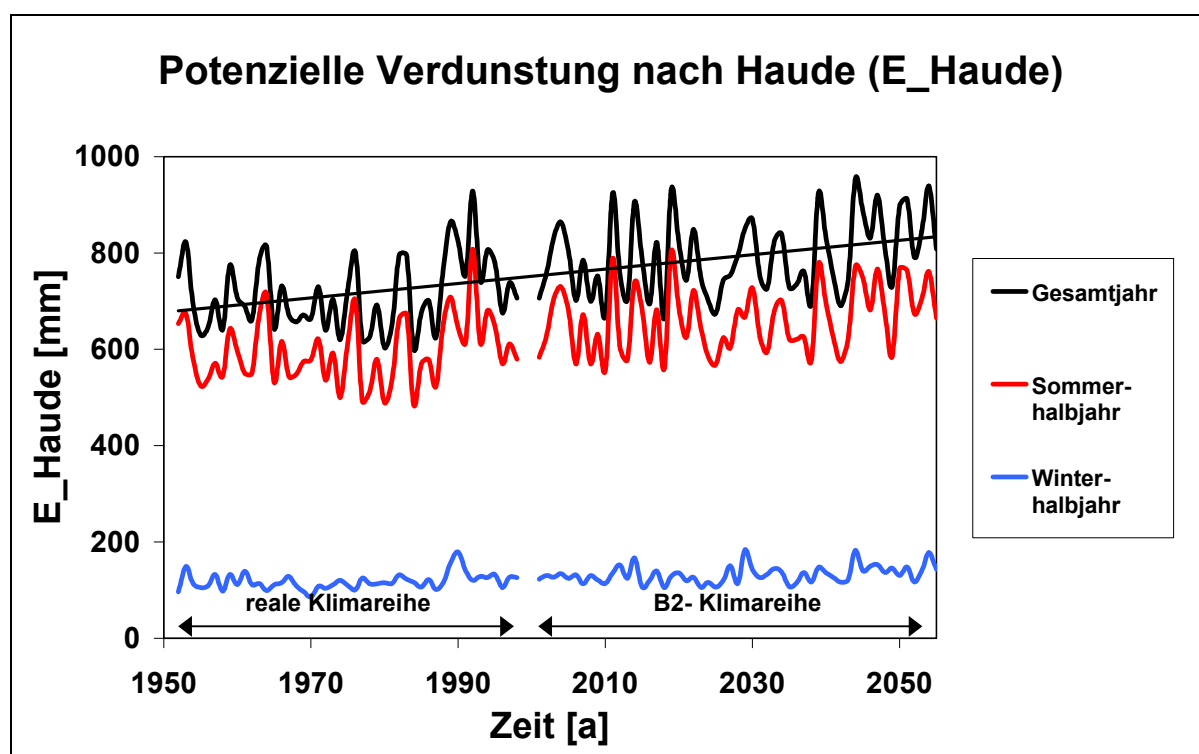


Abb. 17: Potenzielle Verdunstung nach Haude (E<sub>Haude</sub>)

In Tabelle 13 sind die mittleren Werte der potenziellen Verdunstung nach den betrachteten Verfahren für die reale und die B2-Klimareihe noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Tab. 13: Mittlere Werte der Verdunstung der realen Klimareihe und der B2-Klimareihe

	Verdunstung nach Haude [mm]			FAO_Grasreferenzverdunstung [mm]		
	Sommerhalbjahr	Winterhalbjahr	Gesamtjahr	Sommerhalbjahr	Winterhalbjahr	Gesamtjahr
MW <sub>1952-98 (real)</sub>	600	120	720	470	120	590
MW <sub>2001-55 (B2)</sub>	660	130	790	520	130	650
MW <sub>gesamt</sub>	630	125	755	495	125	620

Da die Klimatische Wasserbilanz als Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung definiert ist, führt ein Rückgang der Niederschläge und ein Anstieg der potenziellen Verdunstung zu einer Abnahme der Klimatischen Wasserbilanz. In Abbildung 18 ist die berechnete KWB für die Station Burg aufgetragen. Berechnungsgrundlage war zum einen die Grasreferenzverdunstung (ETO, rot) und zum anderen die Verdunstung nach Haude (E\_Haude, blau). Es wird deutlich, dass die berechnete KWB stark von den verwendeten Verfahren zur Berechnung der potenziellen Verdunstung abhängt. Die Werte unterscheiden sich um bis zu 200 mm. Da in der einschlägigen internationalen Literatur überwiegend die FAO-Grasreferenzverdunstung Verwendung findet, wird im weiteren nur auf diese Werte eingegangen.

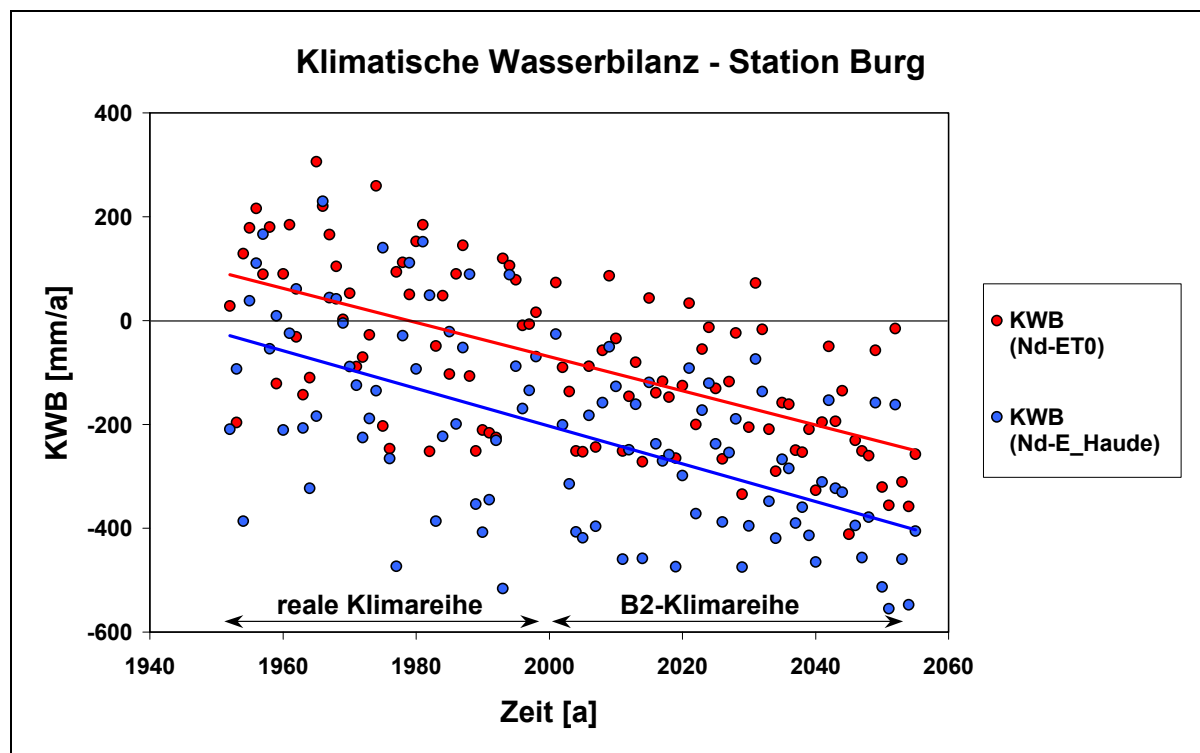


Abb. 18: Klimatische Wasserbilanz der DWD-Station Burg (Spreewald) für das jeweilige Gesamtjahr

Betrachtet man die Klimatische Wasserbilanz der Station Burg (Spreewald) für die reale Klimareihe (1952-1998) und die B2-Klimareihe (2001-2055) so ist zu sehen, dass sich das Wasserbilanzdefizit zwischen 2000 und 2055 im Mittel ungefähr verdoppelt (vgl. Abb. 18). Das bedeutet, dass die Differenz zwischen dem Wasserverbrauch und der Bereitstellung aus dem Niederschlag größer wird. Dies hat zur Folge, dass dem Spreewald in Zukunft erheblich weniger Wasser zur Verfügung stehen wird und somit die Grundwasserzehrung zunimmt. Kann diese Differenz nicht durch Maßnahmen im Einzugsgebiet des Spreewaldes oder im



Spreewald selbst gedeckt werden, kommt es zu einem Absinken der Grundwasserstände. Dies wirkt sich u.a. auf die vorherrschenden Vegetationstypen (Stichwort Biodiversität), die Ertragsentwicklung und -sicherheit, die Lebensdauer der Feuchtgebiete und auf das vorkommende Bodeninventar im allgemeinen aus und somit auch auf das Erscheinungsbild des Spreewaldes, dessen Attraktivität für den Tourismus und die dort lebende Bevölkerung, die vorwiegend vom Tourismus und der Landwirtschaft lebt.

In Abbildung 19 ist noch einmal die Klimatische Wasserbilanz (KWB), die mit Hilfe der FAO-Grasreferenzverdunstung berechnet wurde, nach Halbjahren aufgeteilt, dargestellt.

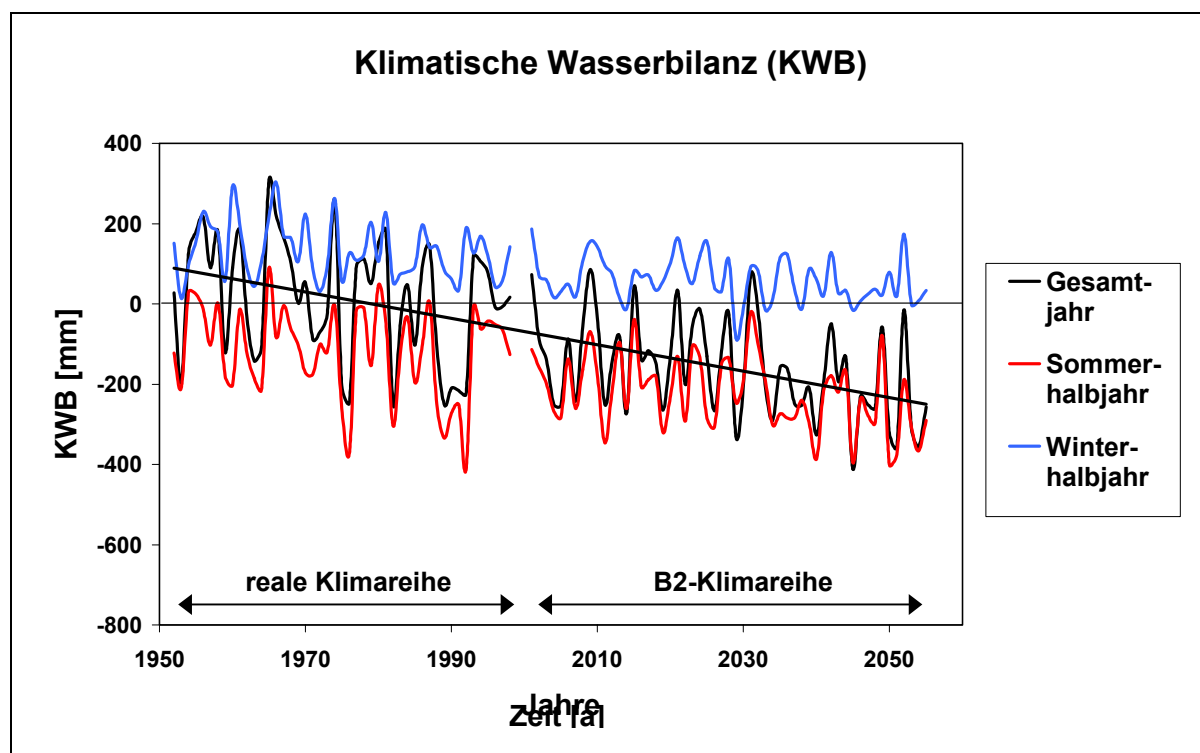


Abb. 19: Klimatische Wasserbilanz (Niederschlag – FAO-Grasreferenzverdunstung)

Es wird deutlich, dass die Abnahme der KWB im Gesamtjahr auf die Abnahme der Werte im Sommerhalbjahr zurückzuführen ist. Hier führen sinkende Niederschläge und ein Anstieg der Verdunstung, aufgrund der angenommenen Klimaänderungen, zwischen den Jahren 2001 und 2050 zu mehr als einer Verdoppelung des klimatischen Wasserbilanzdefizits. Die Werte des Winterhalbjahres zeigen ein sehr ausgeglichenes Bild der KWB, wobei nur ein leichter Rückgang der Werte zu verzeichnen ist. Abbildung 20 zeigt ein ähnliches Bild für die mit Hilfe der potenziellen Verdunstung nach HAUDE (1955) berechnete Klimatische Wasserbilanz, wobei diese, aufgrund der im Vergleich zur Grasreferenzverdunstung höheren Werte, negativer ausfällt.



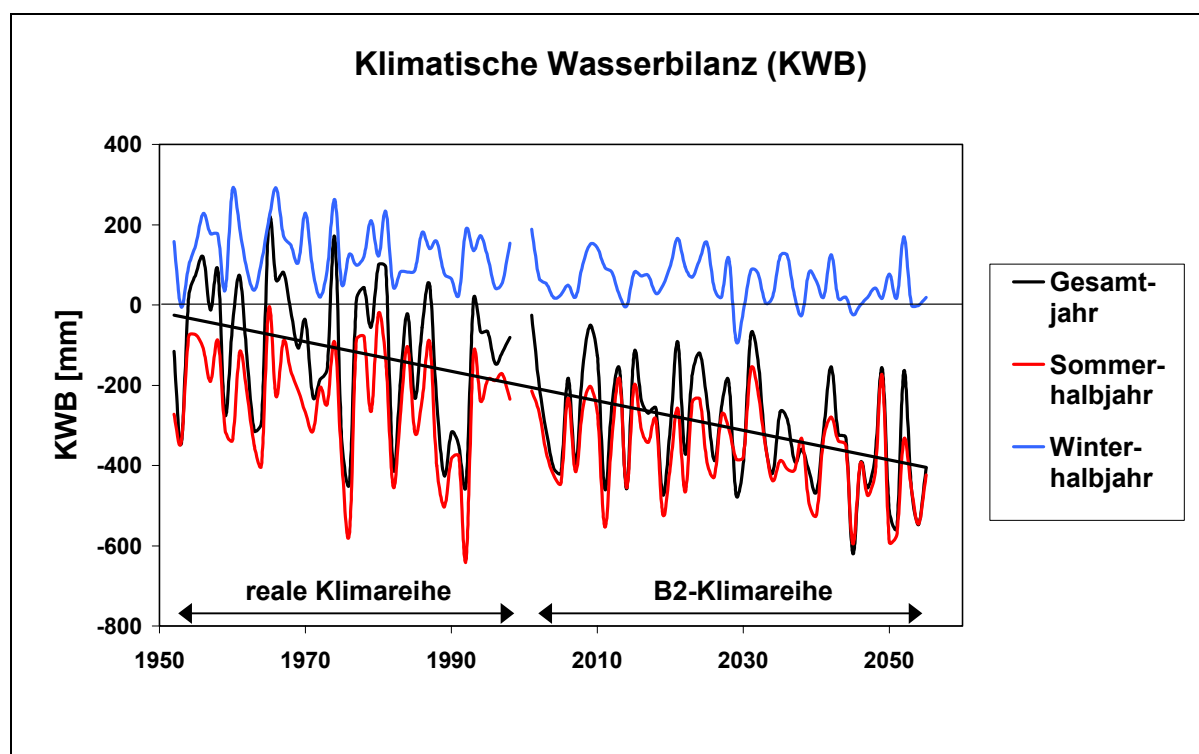


Abb. 20: Klimatische Wasserbilanz (Niederschlag – potenzielle Verdunstung nach HAUDE (1955))

Die angenommenen klimatischen Veränderungen haben zur Folge, dass die Niederschläge im Sommer geringer werden, wohingegen die Einstrahlung und damit die Verdunstungswerte ansteigen. Die Vegetation kann ihren Wasserbedarf aus dem kapillar aufsteigenden Grundwasser oder der nFK des effektiven Wurzelraumes decken. Da dies bei sinkenden GW-Ständen und verstärkter Austrocknung des Oberbodens nicht in jedem Fall möglich ist, kann es zu häufigeren Trockenstressereignissen kommen. Nach Untersuchungen von KAYSER (2001) dürfte die Anzahl der Trockenstresstage pro Jahr unter den beschriebenen klimatischen Bedingungen in 50 Jahren um das 2-3fache des heutigen Wertes angestiegen sein.

Die gezeigten Ergebnisse, bei denen im B2-Basisszenario von einem verminderten Wasserdargebot und einer gesteigerten Beanspruchung durch die Atmosphäre und damit von sinkenden GW-Ständen ausgegangen werden muss, haben Einfluss auf die **reale Verdunstung (ETI)** und damit u.a. auf die Lebensbedingungen und die mögliche Ertragslage der vorkommenden Vegetation. Können im B2-Szenario trotz vermindertem Wasserdargebot hohe GW-Stände gehalten werden, kann es aufgrund erhöhter Einstrahlung und ungehinderter Produktion der Vegetation zu einer Erhöhung der Verdunstung kommen. Sinken die GW-Stände jedoch ab, kann dies zu einer Reduzierung der realen Verdunstung bis hin zu zeitweiligen Trockenstresssituationen für die Vegetation führen.

Abbildung 21 zeigt dies am Beispiel der Variante Grünland auf Sand.

Es wird deutlich, dass bei hohen GW-Ständen (hier: 30 cm unter GOF) die reale Verdunstung unter Grünland im B2-Basisszenario stark ansteigt, je nach Variante um bis zu 70 mm/a. Bei tieferen GW-Ständen (hier: 90 cm unter GOF) kommt es durch verstärkte Austrocknung des Oberbodens und geringe kapillare Nachlieferung aus dem Grundwasser zu einer Reduzierung der realen Verdunstung. Dies kann sich bei tieferen GW-Ständen noch verstärken.

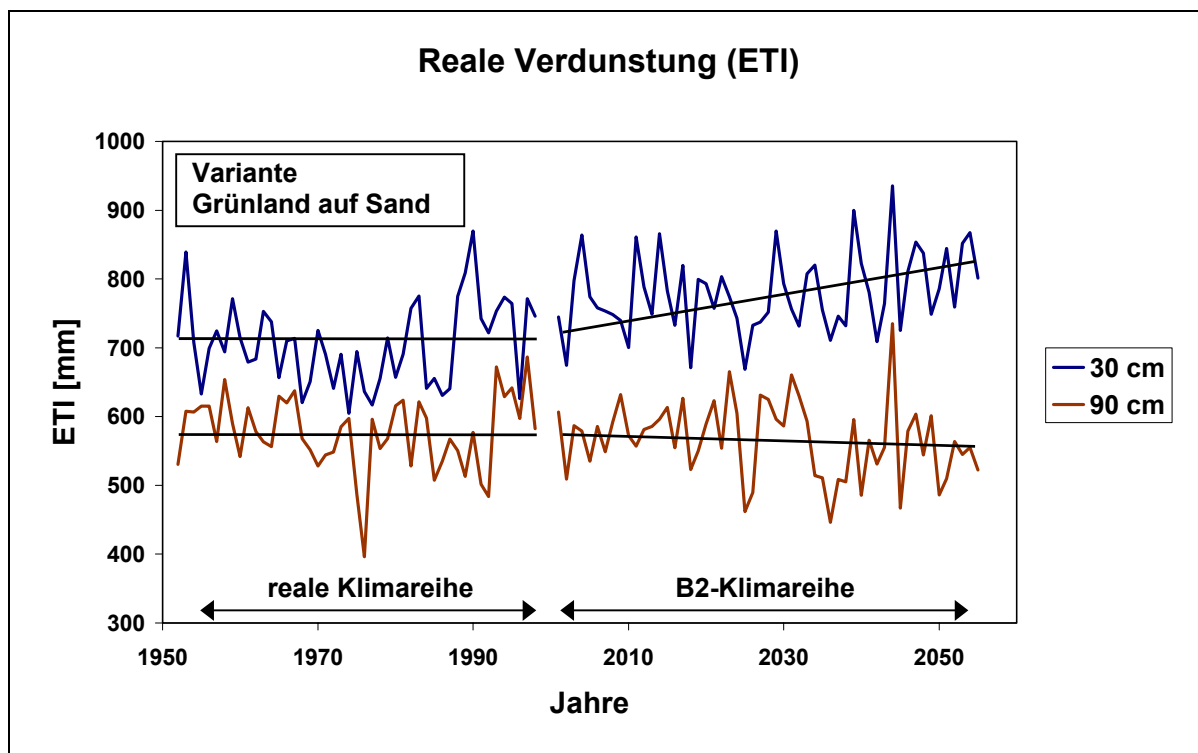


Abb. 21: Reale Verdunstung (ETI) für die Variante Grünland auf Sand bei mittleren jährlichen Grundwasserständen von 30 cm und 90 cm unter GOF für die reale und die B2-Klimareihe

Ein Vergleich der realen Verdunstung bei verschiedenen Grundwasserständen bei gleicher Bodenart und Nutzung zeigt, dass hier Unterschiede von bis zu 200 mm/a auftreten können. In Abbildung 22 und 23 ist dies sowohl für das Referenz- als auch das B2-Basisszenario dargestellt.

### Referenzszenario

Abbildung 22 (links) zeigt die mittlere reale Verdunstung unter Grünland für das Referenzszenario bei unterschiedlichen Grundwasserständen und Böden. Es ist zu erkennen, dass die Verdunstung mit sinkendem Grundwasserstand abnimmt. Für Torf und Lehmsand zeigen die Kurven ähnliche Verläufe, wobei der Torf über alle GW-Stände eine etwas höhere Verdunstung aufweist. Lehm nimmt, aufgrund seiner Eigenschaften und der Korngrößenzusammensetzung eine Sonderstellung ein. Bei hohen GW-Ständen zeigt der Lehm im Vergleich zu den anderen Böden eine geringere Verdunstung. Ursache ist hierfür der das Pflanzenwachstum begrenzende Luftmangel. Zur ausreichenden Belüftung des Oberbodens muss der GW-Stand bis auf 60-90 cm abgesenkt werden. Ab diesem GW-Stand nimmt die Verdunstung auf Lehmen stark zu und übersteigt zwischen 90-120 cm GW-Stand infolge besserer kapillarer Nachlieferung die der anderen Böden. Bei GW-Ständen tiefer als 150 cm unter GOF finden sich zwischen den einzelnen Böden bei gleicher Nutzung keine Unterschiede mehr bezüglich des Wasserverbrauchs.

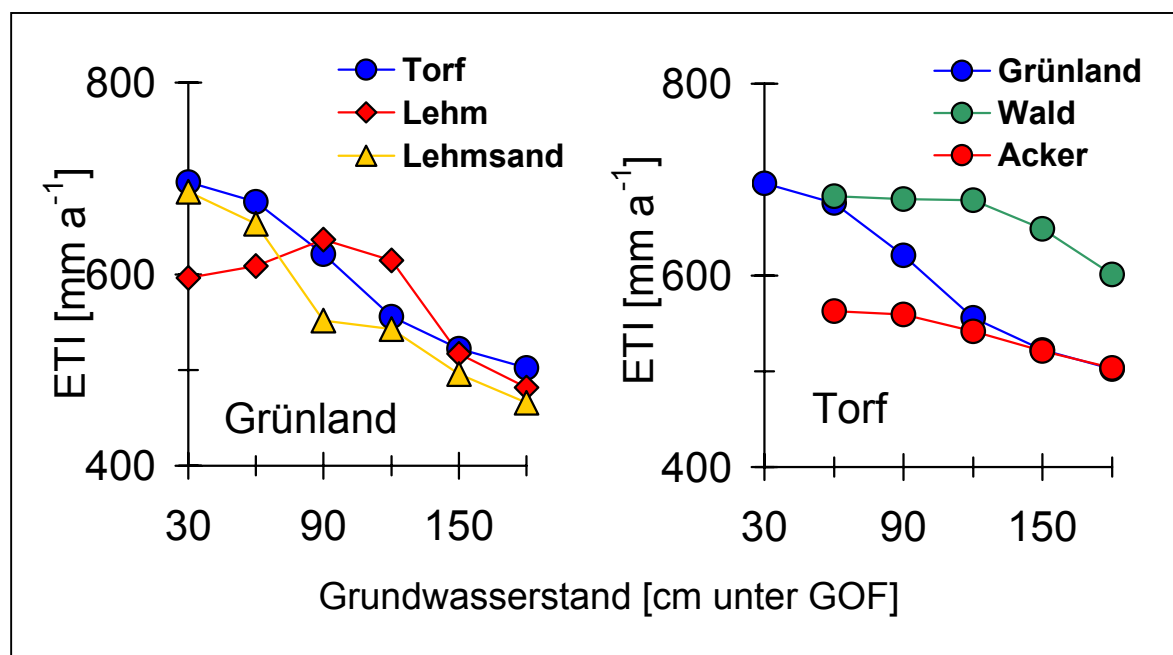


Abb. 22: Mittlere, langjährige reale Verdunstung [ $\text{mm a}^{-1}$ ] für unterschiedliche Böden und Nutzungen (Referenzszenario)

Abbildung 22 (rechts) zeigt am Beispiel der bodenhydrologischen Einheit Torf den Einfluss der Nutzung auf die mittlere reale Verdunstung bei unterschiedlichen GW-Ständen. Bei hohen GW-Ständen tritt sowohl unter Wald als auch unter Grünland eine weit höhere Verdunstung auf als unter Ackernutzung (bis zu 150 mm). Bei der Variante Torf unter Wald bleibt die Verdunstung bis zu einem GW-Stand von ca. 120 cm u. GOK nahezu konstant und fällt bei weiter sinkenden GW-Ständen ab. Unter Grünland ist eine stetige Abnahme der Verdunstung mit sinkenden GW-Ständen zu beobachten. Sie nähert sich für tiefe GW-Stände den Verdunstungswerten unter Ackernutzung an. Die Verdunstung unter Acker ist über alle betrachteten GW-Stände geringer als die unter Grünland oder Wald. Bis zu einem GW-Stand von ca. 90 cm unter GOF sind die Werte nahezu konstant und fallen dann mit sinkendem GW-Stand leicht ab.

### B2-Basisszenario

Im B2-Basisszenario zeigen die Verdunstungskurven der einzelnen Böden einen ähnlichen Verlauf wie im Referenzszenario (vgl. Abb. 23, links), jedoch auf einem höheren Niveau. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Unterschiede zwischen hohen und niedrigen GW-Ständen bei Klimaänderung bezüglich der Verdunstung größer werden. Dies ist wie folgt zu erklären: Aufgrund der höheren Einstrahlung ist bei hohen GW-Ständen auch die Verdunstung höher, da kein Wassermangel auftritt und der Pflanzenbestand demzufolge ungehindert Biomasse produzieren kann, sofern keine anderen Mängel auftreten. Sinken die GW-Stände auf unter 120 cm unter GOF, kommt es aufgrund der höheren Einstrahlung zu einer schnelleren Austrocknung der oberen Bodenschichten und damit zu einem schnelleren Abreißen der kapillaren Nachlieferung aus dem Grundwasser, was sich in einer Einschränkung der Verdunstung bemerkbar macht.

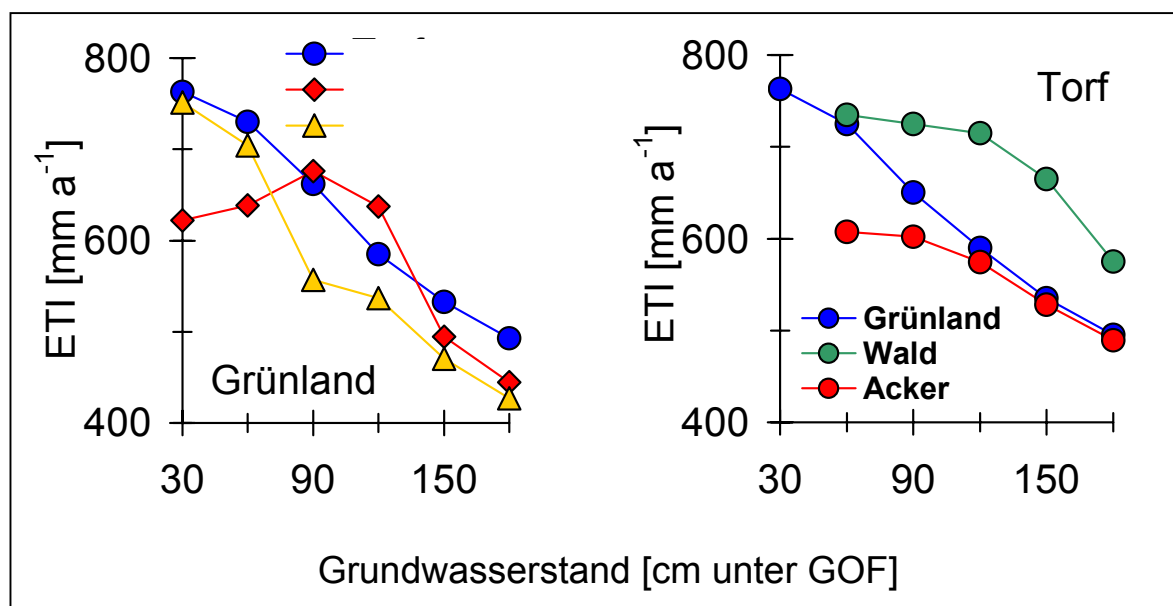


Abb. 23: Mittlere, langjährige reale Verdunstung [ $\text{mm a}^{-1}$ ] für unterschiedliche Böden und Nutzungen (B2-Basisszenario)

In Abbildung 23 (rechts) ist der Einfluss der Nutzung auf die Verdunstung im B2-Basis-szenario dargestellt. Auch hier liegen die Verdunstungswerte der einzelnen Varianten bei hohen GW-Ständen über den Werten des Referenzszenarios. Die Verdunstung unter Wald bleibt bis ca. 120 cm GW-Stand unter GOF nahezu unverändert, fällt dann jedoch steiler ab und erreicht bei GW-Ständen von ca. 200 cm ähnliche Werte wie im Referenzszenario. Auch die Verdunstung unter Grünland und Acker zeigt ähnliche Verläufe wie im Referenzszenario. Auch hier sind verstärkte Abnahmen mit sinkenden GW-Ständen zu verzeichnen.

Im B2-Basisszenario, wie auch im Referenzszenario, verhält sich die Verdunstung unter Grünland bei hohen GW-Ständen wie die von Wald und nähert sich für sinkende GW-Stände der Verdunstung unter Ackernutzung an. Demnach kann man annehmen, dass der nutzungs-abhängige Verlauf der Verdunstung klimaunabhängig ist, die absolute Höhe der Verdunstung jedoch natürlich sehr stark von den Klimaverhältnissen abhängt.

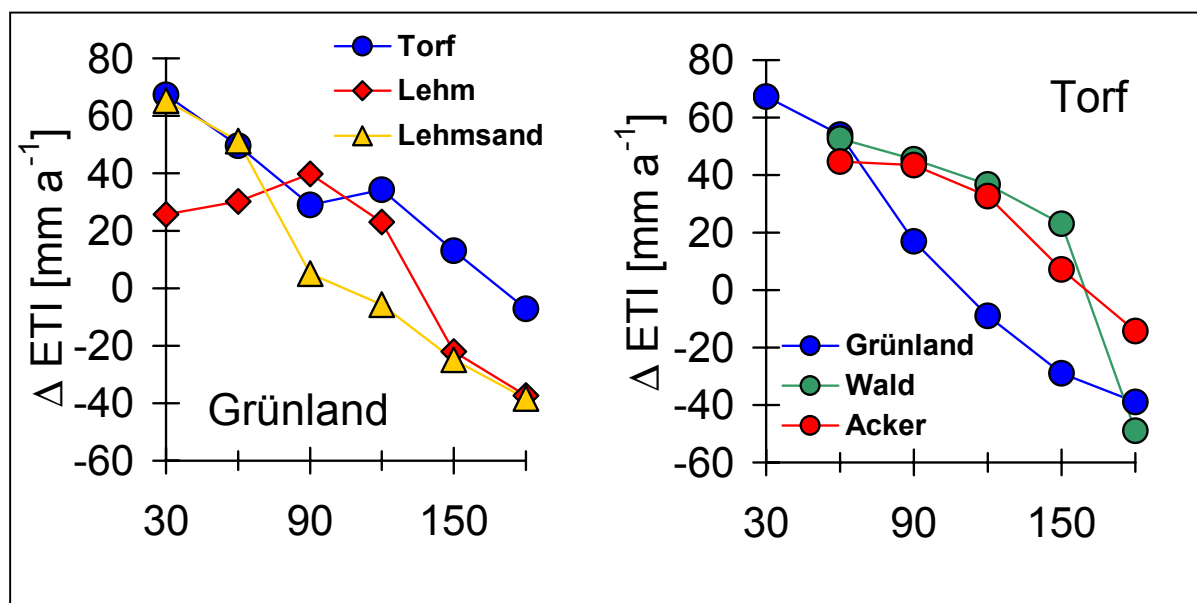


Abb. 24: Differenz der mittleren realen Verdunstungen zwischen Referenz- und B2-Basisszenario für unterschiedliche Böden und Nutzungen

In Abbildung 24 sind die Differenzen der realen Verdunstung zwischen Referenz- und B2-Basisszenario für unterschiedliche Böden und Nutzungen dargestellt. Im linken Teil der Abbildung ist zu erkennen, dass der Klimaeinfluss für hohe Grundwasserstände am größten ist, hier treten Unterschiede bis zu 70 mm/a auf, und mit sinkenden Grundwasserständen abnimmt. Ausnahme bilden die Lehme, bei denen die größten Unterschiede zwischen den Szenarien bei einem Grundwasserstand von 90 cm unter GOF auftreten. Gleiches gilt für die unterschiedlichen Nutzungen (vgl. Abb. 24 rechts). Bei der Variante Wald auf Torf bleiben die Unterschiede bis zu einem Grundwasserstand von 150 cm unter GOF relativ konstant und fallen dann stark ab. Die Variante Grünland auf Torf zeigt bei hohen Grundwasserständen den größten Unterschied zwischen den Szenarien.

Abbildung 25 zeigt für die Variante Torf unter Grünland die Unterschiede der mittleren realen Verdunstung und der mittleren Grundwasserneubildung ( $GW_{neu}$ ) zwischen Referenz- und B2-Basisszenario. Im linken Teil der Abbildung wird deutlich, dass bei hohen GW-Ständen der Einfluss des Klimas auf die Verdunstung am größten ist. Die Unterschiede zwischen den Szenarien können hier bis zu 70 mm betragen. Mit sinkenden GW-Ständen verringert sich zunächst der Einfluss des Klimas, so dass bei einem GW-Stand von ca. 100 cm u. GOK keine Unterschied mehr auftritt. Bei GW-Ständen  $>100$  cm u. GOK sorgt eine stärkere Austrocknung des Oberbodens im B2-Basisszenario dafür, dass die Verdunstung in diesem Bereich stärker eingeschränkt wird als im Referenzszenario. Im rechten Teil der Abbildung ist zu erkennen, dass unter den Bedingungen eines Klimawandels die Grundwasserneubildung drastisch abnimmt. Im Referenzszenario ist ab einem GW-Stand von ca. 100 cm und tiefer mit einer positiven  $GW_{neu}$  zu rechnen. Im B2-Basisszenario sinkt dieser GW-Stand auf unter 160 cm.

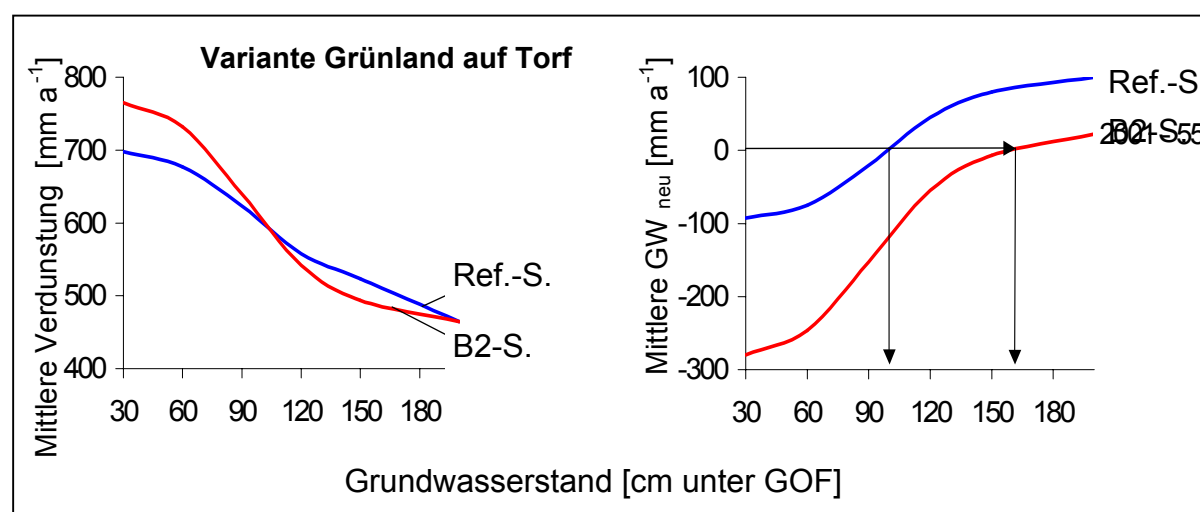


Abb. 25: Verdunstung und Grundwasserneubildung ( $GW_{neu}$ ) für die Variante Grünland auf Torf

Die Unterschiede zwischen Referenz- und B2-Basisszenario können bezüglich der  $GW_{neu}$  bis zu 200 mm betragen. Dies hat zur Folge, dass die Grundwasserzehrung stark zunimmt. Der Spreewald ist unter diesen Bedingungen aufgrund der erhöhten Verdunstung und der rückläufigen bzw. fehlenden  $GW_{neu}$  als ein Grundwasserzehrgebiet einzustufen.

Der **Zusatzwasserbedarf**, der notwendig ist, um die GW-Stände des Referenzszenarios auch im B2-Basisszenario zu halten kann aus Abbildung 26 abgelesen werden. Die Werte beziehen sich auf einen Basisgrundwasserstand von 100 cm unter GOF. Will man z.B. den GW-Stand von 100 cm unter GOF aus dem Referenzszenario auch im B2-Basisszenario halten, so ist ein zusätzlicher Wasserbedarf von ca. 200 mm notwendig. Möchte man innerhalb des B2-Basisszenarios den GW-Stand von 75 cm auf 30 cm unter GOF anheben, muss mit einem Zusatzwasserbedarf von ca. 100 mm gerechnet werden. Der Anstieg des Zusatzwasserbedarfs

im B2-Basisszenario resultiert aus dem Anstieg der Verdunstungswerte und einem Rückgang der Sommerniederschläge (vgl. Abb. 15, 18 und 21). Die Unterschiede im Zusatzwasserbedarf im Vergleich zum TV 2.3 resultieren zum einen aus der Annahme konstanter Grundwasserstände und zum anderen aus dem unterschiedlichen Verständnis des Zusatzwasserbedarfs. In TV 2.3 „besteht ein Zusatzwasserbedarf für einen Staubeereich wenn der Niederschlag eines Monats nicht ausreicht, um die Summe aus realer Verdunstung und möglichem Defizit im Flächenwasserspeicher infolge Stauzielunterschreitung aus dem Vormonat bzw. Stauzielanhebung im aktuellen Monat auszugleichen“ (vgl. EB TV 2.3 Kap. 5.2). Des weiteren werden in TV 2.3 Amplituden der Wasserstände innerhalb von Fünfjahresscheiben auf der Ebene von Staubeichen verwendet.

Aus Abbildung 26 wird deutlich, dass die angenommene Klimaveränderung in Kombination mit einem Rückgang des Wasserdargebotes erhebliche Auswirkungen auf die GW-Stände und damit auch auf den Spreewald als Feuchtgebiet haben.

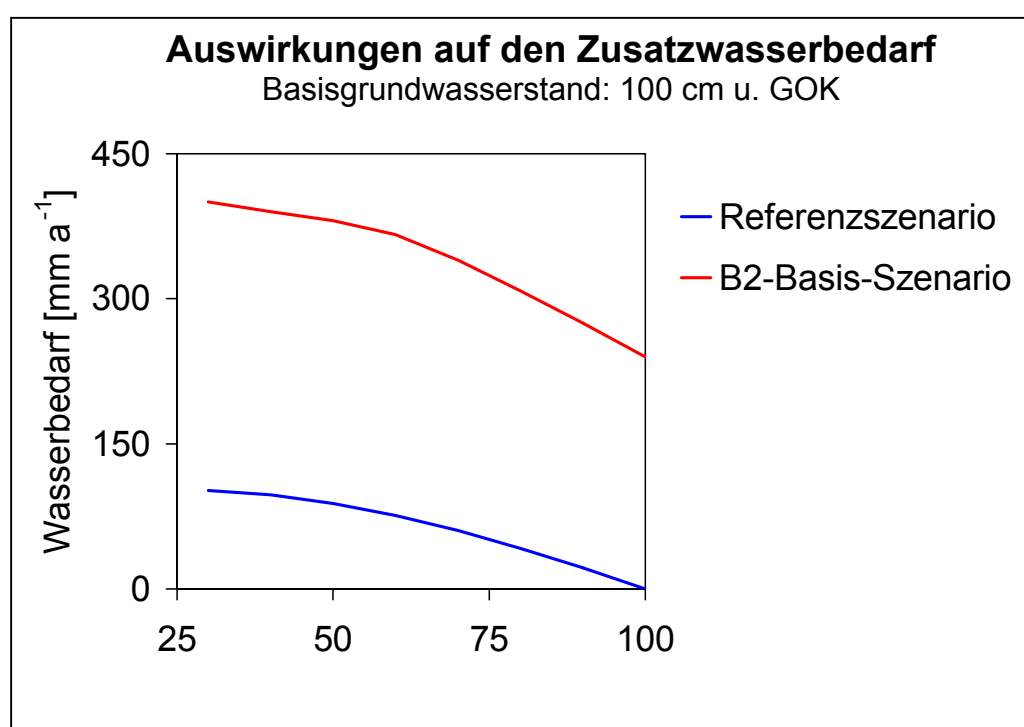


Abb. 26: Zusatzwasserbedarf im Referenz- und B2-Basisszenario

#### Fazit:

Der Wasserverbrauch erhöht sich bei höheren GW-Ständen aufgrund der angenommenen Klimaänderungen beträchtlich (je nach Nutzung und Boden von 30 bis 70 mm). Zu einer nennenswerten Grundwasserneubildung kommt es nur noch bei sehr tiefen GW-Ständen (> 160 cm), d.h. die Grundwasserzehrung nimmt deutlich zu (um bis zu 200 mm/a). Um aus naturschutzfachlichen Gründen (z.B. Moorschutz) den Wasserstand insbesondere in den organischen Böden hochhalten zu können, ist beträchtlich mehr Wasser nötig als bisher. Abhängig vom Zielgrundwasserstand steigt somit der Zusatzwasserbedarf zwischen dem Referenz- und dem B2-Basisszenario um bis zu 200 mm/a an

, d.h. es wird eine 2fach höhere Zuschusswassermenge erforderlich sein als bisher. Kann dieser zusätzliche Wasserbedarf nicht durch Maßnahmen im Einzugsgebiet des Spreewaldes oder im Spreewald selbst gedeckt werden, hat dies erhebliche Auswirkungen u.a. auf die vorherrschenden Vegetationstypen (Biodiversität), die Lebensdauer der Niedermoore und auf das vorkommende Bodeninventar und die Ertragsentwicklung und -sicherheit und somit auch auf das Erscheinungsbild des Spreewaldes und dessen Attraktivität für den Tourismus. So ist z.B. durch eine stärkere Austrocknung des Bodenprofils und dem zu erwartende Anstieg der

Bodentemperaturen mit verbesserten Bedingungen für die Mineralisierung der organischen Bodensubstanz zu rechnen, welche zu einer verstärkten Torfmineralisierung führt (vgl. Kap.7.5).

Aufgrund der Berechnungen zum Wasserhaushalt der Böden für das Spreewaldgebiet lassen sich abhängig von der Nutzung folgende Aussagen treffen:

### **Grünland**

Die Berechnungen zum Wasserhaushalt unter Grünlandnutzung erfolgten für die fünf Böden und sechs Grundwasserklassen:

- Im Winterhalbjahr finden sich hinsichtlich der Verdunstung keine Unterschiede zwischen den Böden.
- Unterschiede in der Verdunstung zeigen sich zwischen den einzelnen Böden in den Monaten Mai bis August, vor allem bei mittleren GW-Ständen.
- Eine Ausnahme bildet die Variante Lehm. Im Vergleich zu den anderen Böden zeigt sie auch bei sehr geringen GW-Ständen eine deutlich geringere Verdunstung. Dies begründet sich mit dem geringen Anteil an Grobporen und den damit einhergehenden Durchlüftungsproblemen. Die höchsten Verdunstungswerte treten bei dieser Variante bei GW-Ständen von ca. 90 cm auf.
- Zwischen den Varianten Sand und Lehmsand zeigen sich bei fallenden GW-Ständen immer größere Differenzen in der Verdunstung. Ursache hierfür sind die großen Unterschiede in der nutzbaren Feldkapazität.
- Die Varianten Torf und Torf über Sand zeigen hinsichtlich der Verdunstung bei allen GW-Ständen ein ähnliches Verhalten.
- Nach Durchführung der Sensitivitätsanalysen lassen sich die Böden zusammenfassend hinsichtlich ihres Wasserverbrauchs bei Grünland statistisch absicherbar in vier Gruppen aufteilen:
  - Sand
  - Lehmsand
  - Lehm über Sand
  - Torf, Torf über Sand

### **Ackerland**

Die Berechnungen zum Wasserhaushalt unter Ackernutzung erfolgten am Beispiel der Fruchtart Roggen unter der Voraussetzung der guten fachlichen Praxis analog zu Grünland für die fünf Bodenartenhauptgruppen. Im Gegensatz zu Grünland wurden die Berechnungen nicht für die GW-Klasse 30 cm durchgeführt, da eine Ackernutzung tiefere GW-Stände verlangt. Die Berechnungen zum Wasserhaushalt der Böden unter Ackernutzung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bei allen Böden finden sich bei GW-Ständen von 60 und 90 cm u. GOK ähnlich hohe Verdunstungswerte.
- Unterschiede in der Verdunstung zeigen sich erst bei GW-Ständen >120 cm u. GOK
- Hinsichtlich des Wasserverbrauchs lassen sich die Böden statistisch absicherbar in vier Gruppen einteilen:
  - Sand
  - Lehmsand
  - Lehm über Sand
  - Torf, Torf über Sand

### **Wald**

Die Berechnungen zur Verdunstung von Wald erfolgten analog für alle fünf Böden. Dabei begannen die Berechnungen erst bei einer GW-Tiefe von 60 cm u. GOK.

Es ist festzuhalten, dass bei hohen und mittleren GW-Ständen der Boden und auch der GW-



Stand keinen Einfluss auf die Höhe der Verdunstung haben. Bei diesen Bedingungen hängt die Höhe des Wasserverbrauchs allein von den meteorologischen Bedingungen ab. Erst bei tieferen GW-Ständen hat die Höhe des GW-Standes und die Art des Bodens einen Einfluss auf die Verdunstung.

Hinsichtlich des Wasserverbrauchs lassen sich die Böden statistisch absicherbar in zwei Gruppen einteilen:

- o Lehmsand
- o Torf, Torf über Sand, Lehm über Sand, Sand

### Häufigkeiten von Extremjahren

Zur Betrachtung der Veränderungen in der Häufigkeit des Auftretens von Extremjahren wurden die 10- und 90-Perzentile bezogen auf die Werte des Referenzszenarios der in Tab. 14 dargestellten Größen als Maßstab für trockene bzw. feuchte Jahre herangezogen.

Betrachtet man die Werte der KWB zwischen Referenz- und B2-Basiszenario, so ist zu erkennen, dass die sehr trockenen Jahre zunehmen und die sehr feuchten Jahre abnehmen. Tritt im Referenzszenario noch eine KWB von kleiner – 200 mm alle 10 Jahre auf, so findet sich dieser Wert im B2-Basiszenario schon ca. alle 3 Jahre. Feuchte Jahre die im Referenzszenario noch alle 10 Jahre auftreten sind im B2-Basiszenario nur noch in einem von 25 Jahren zu finden.

Die Werte der realen Verdunstung (ETI) wurden für zwei unterschiedliche Grundwasserstände (30 cm und 90 cm unter GOF) angegeben ( $ETI_{30}$ ,  $ETI_{90}$ ) um eine gewisse Dynamik in den Wasserverhältnissen darzustellen. Ebenso wurde bei den Trockenstressfaktoren ( $E_{real30}/E_{pot}$ ,  $E_{real90}/E_{pot}$ ) verfahren.

Allgemein bleibt festzuhalten, dass die sehr trockenen Jahre in ihrer Häufigkeit zunehmen und die sehr nassen Jahre kaum mehr vorkommen. Dies wirkt sich sowohl auf die Werte der realen Verdunstung, als auch auf die Werte der Trockenstressfaktoren aus. Die Folgen hieraus auf die Veränderung des Grünlandertrags und der Degradierung der Niedermoore werden in folgenden Kapiteln näher betrachtet (vgl. Kap. 7.4 und 7.5).

**Tab. 14: Unterschiede der Eintrittshäufigkeiten verschiedener Indikatoren zwischen Referenz- und B2-Basiszenario für trockene, mittlere und feuchte Jahre (Bezugsgröße war das Referenzszenario)**

		trocken	mittel	feucht
		tritt auf in ... Jahren	tritt auf in ... Jahren	tritt auf in ... Jahren
<b>Referenz- szenario</b>	KWB	1 : 10 (-200 mm)*	1 : 2 (45 mm)*	1 : 10 (180 mm)*
	$ETI_{30}$	1 : 10 (775 mm)*	1 : 2 (700 mm)*	1 : 10 (600 mm)*
	$ETI_{90}$	1 : 10 (640 mm)*	1 : 2 (580 mm)*	1 : 10 (500 mm)*
	$E_{real30}/E_{pot}$	1 : 10 (0,95)*	1 : 2 (1,04)*	1 : 10 (1,12)*
	$E_{real90}/E_{pot}$	1 : 10 (0,67)*	1 : 2 (0,83)*	1 : 10 (1,02)*
<b>B2-Basis- szenario</b>	KWB	1 : 2,8	1 : 1	1 : 25
	$ETI_{30}$	1 : 2,2	1 : 1,1	1 : 25
	$ETI_{90}$	1 : 7	1 : 1,9	1 : 12
	$E_{real30}/E_{pot}$	1 : 2,8	1 : 1,3	1 : 25
	$E_{real90}/E_{pot}$	1 : 8	1 : 1,7	1 : 13



\*Werte in Klammern geben die zugehörigen absoluten Werte an

An das TV 2.3 wurden die mittleren Verdunstungswerte in Abhängigkeit von Boden, GW-Stand, Nutzung und Szenario in Form einer Datenbank übergeben. Auf diese wird im ArcGRM bei der Modellierung zugegriffen.

Des weiteren wurden an das TV 2.7 kapillare Aufstiegsraten aus dem Grundwasser in den Wurzelraum in Abhängigkeit von Boden und GW-Stand übergeben.

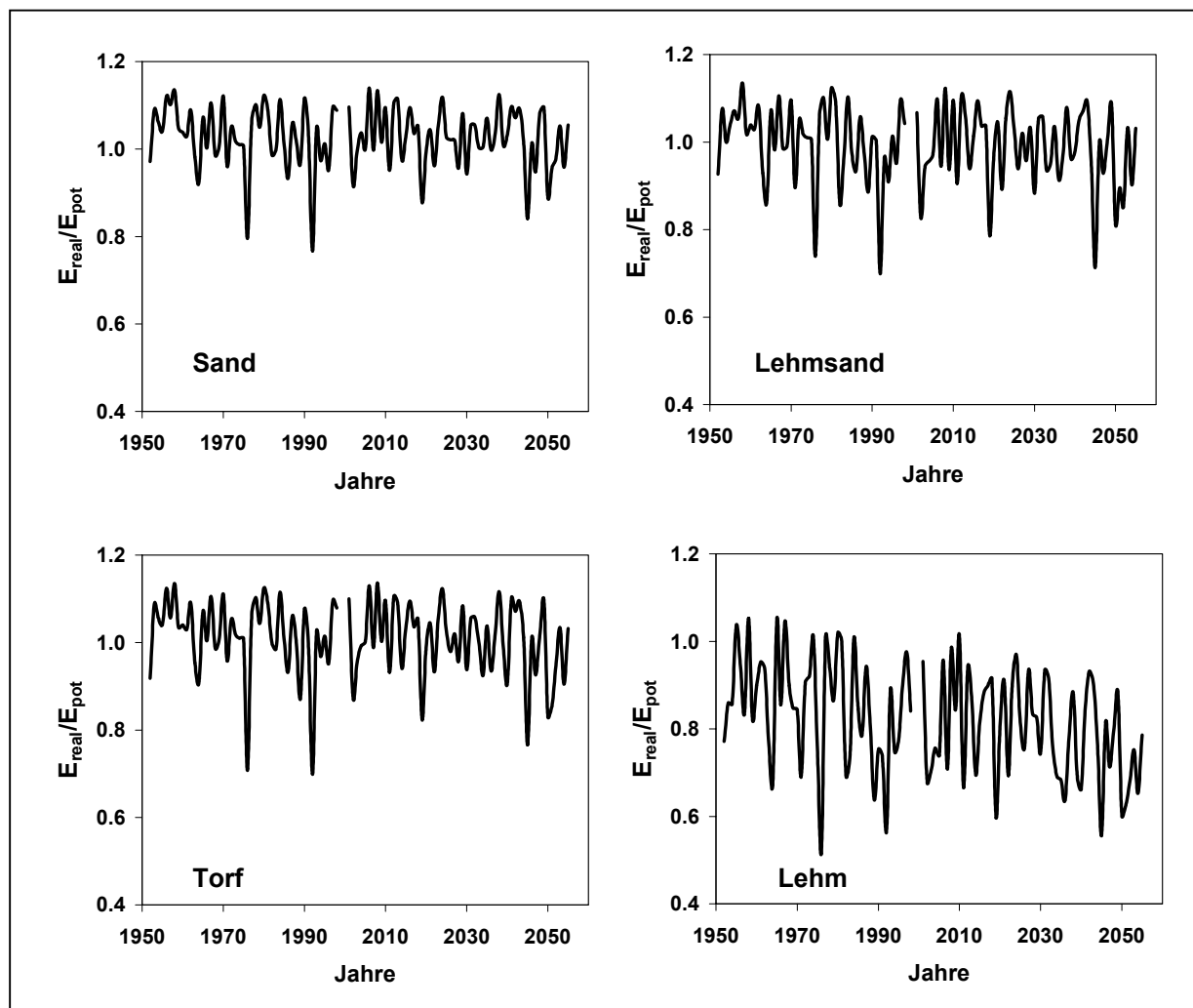
## 7.4 Grünlandertrag

Wie in Kapitel 3.3 dargestellt wurden die Grünlanderträge für unterschiedliche Böden, Grünlandgesellschaften, Grundwasserstände und Klimabedingungen (Referenz- und B2-Basis-szenario) abgeschätzt.

Das Verhältnis von realer zu potenzieller Verdunstung (Trockenstressfaktor) wird hier als Maß für die Wasserversorgung der Vegetation herangezogen.

Für die weiteren Betrachtungen und zur Berechnung der Grünlanderträge wurde die potenzielle Verdunstung nach Haude verwendet, da hierbei die Auswirkungen der klimatischen Veränderungen in den einzelnen Szenarien deutlicher werden.

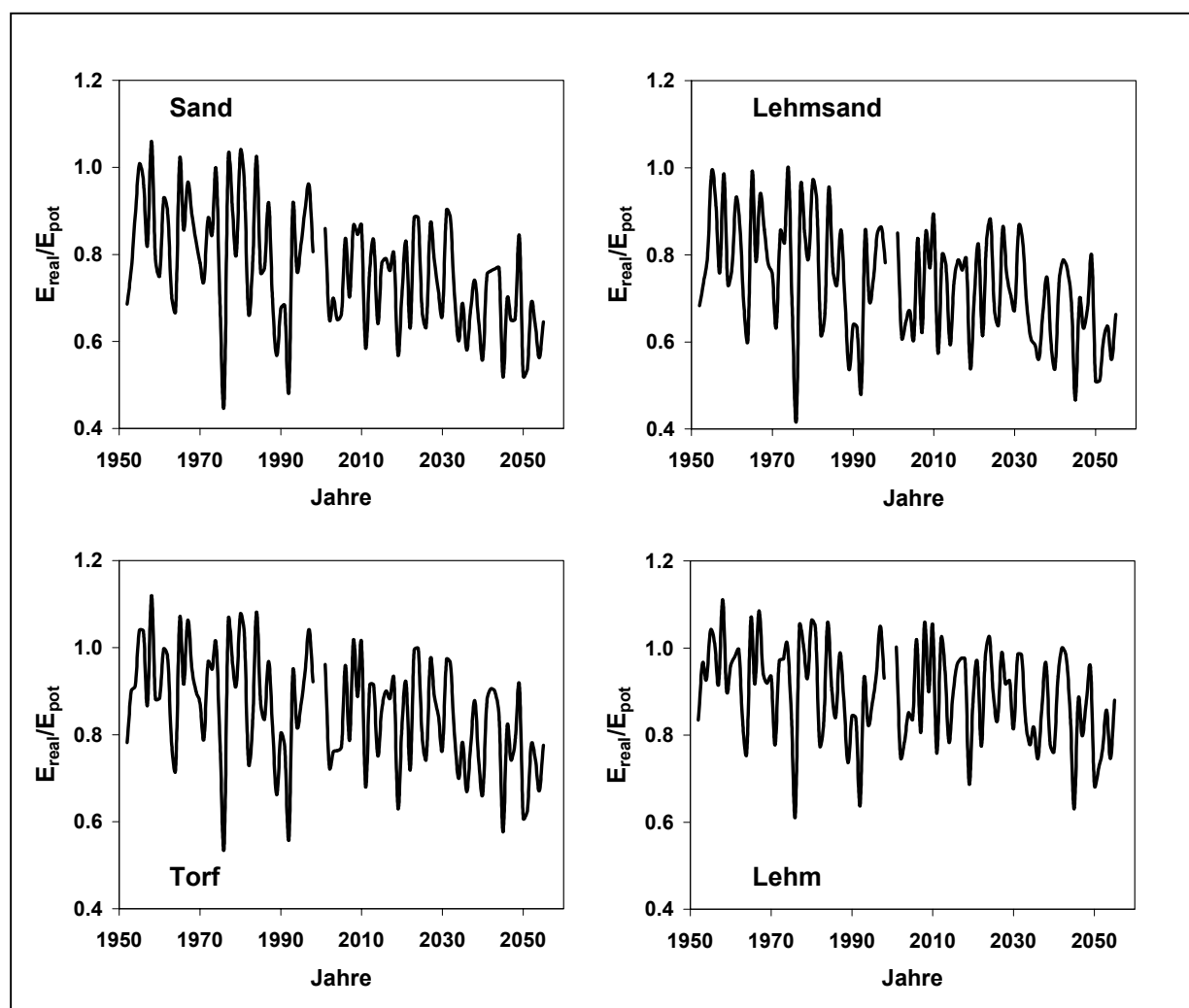
Abbildung 27 und 28 zeigen die Zeitreihen der Trockenstressfaktoren für Grünland für die unterschiedlichen Bodenartengruppen und GW-Stände von 30 und 90 cm unter GOF in der jeweiligen Vegetationsperiode (01.04. –30.09.).



**Abb. 27: Trockenstressfaktoren für Grünland bei einem Grundwasserstand von 30 cm unter GOF für die jeweilige Vegetationsperiode und die unterschiedlichen Bodenartengruppen**

Es wird deutlich, dass sowohl Sande als auch Torfe bei einem GW-Stand von 30 cm unter GOF aufgrund der hohen realen Verdunstung die höchsten Werte aufweisen. Die Lehmsande weisen geringere Faktoren auf, das bedeutet, dass die Wasserversorgung der Vegetation etwas schlechter ist als z.B. bei den Torfen. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass die Faktoren um den Wert 1 schwanken, d.h. es ist von einer guten Wasserversorgung der Vegetation auszugehen. Im Vergleich dazu wäre die Situation bei den Torfen als Luxusversorgung zu bezeichnen.

Diese Einstufungen gelten für Grünland i.A. und sind bei Betrachtung der einzelnen Grünlandgesellschaften den jeweiligen Schwankungsbreiten der Lebensbedingungen der jeweiligen Grünlandgesellschaft anzupassen. Die Lehme zeigen bei diesem GW-Stand die niedrigsten Werte, da hier die reale Verdunstung aufgrund der Poreneigenschaften und den Belüftungsproblemen im Oberboden eingeschränkt ist.



**Abb. 28: Trockenstressfaktoren für Grünland bei einem Grundwasserstand von 90 cm unter GOF für die jeweilige Vegetationsperiode und die unterschiedlichen Bodenartengruppen**

Betrachtet man dagegen die Trockenstressfaktoren der einzelnen Bodenartengruppen bei einem GW-Stand von 90 cm, so kehren sich die Verhältnisse zum Teil um (vgl. Abb. 28). Bei diesem GW-Stand sind die Trockenstressfaktoren geringer als z.B. bei 30 cm unter GOF, d.h. die Wasserversorgung der Vegetation verschlechtert sich mit sinkendem GW-Stand. Eine Ausnahme bilden die Lehme. Sie weisen bei diesem GW-Stand die höchsten Werte auf. Der niedrigere GW-Stand sorgt für eine ausreichende Durchlüftung des Oberbodens und

aufgrund des Porenraumsystems der Lehme steht den Pflanzen mehr Wasser zur Verfügung als bei den anderen Bodenartengruppen. Bei den Torfen bewirkt diese GW-Absenkung eine Erhöhung des Trockenstresses für die Pflanzen. Die Wasserversorgung ist dennoch etwas besser als auf Sand- oder Lehmsandstandorten, auf denen die geringsten Werte der Trockenstressfaktoren bei diesem GW-Stand anzutreffen sind.

Des Weiteren ist festzuhalten, dass bei einem GW-Stand von 90 cm der Trockenstress bei allen Bodenartengruppen im Verlauf des betrachteten Zeitraumes ansteigt, d.h. die Faktoren werden kleiner. Dies ist auf das schnellere Austrocknen des Oberbodens bei Klimaveränderung (B2) und damit eine Verschlechterung der Lebensbedingungen der Vegetation zurückzuführen. Bei einem GW-Stand von 30 cm ist dieser Rückgang der Faktoren nicht zu beobachten, da hier eine ausreichende Durchfeuchtung des Oberbodens gegeben ist und es so zu keiner Einschränkung der Verdunstung kommt.

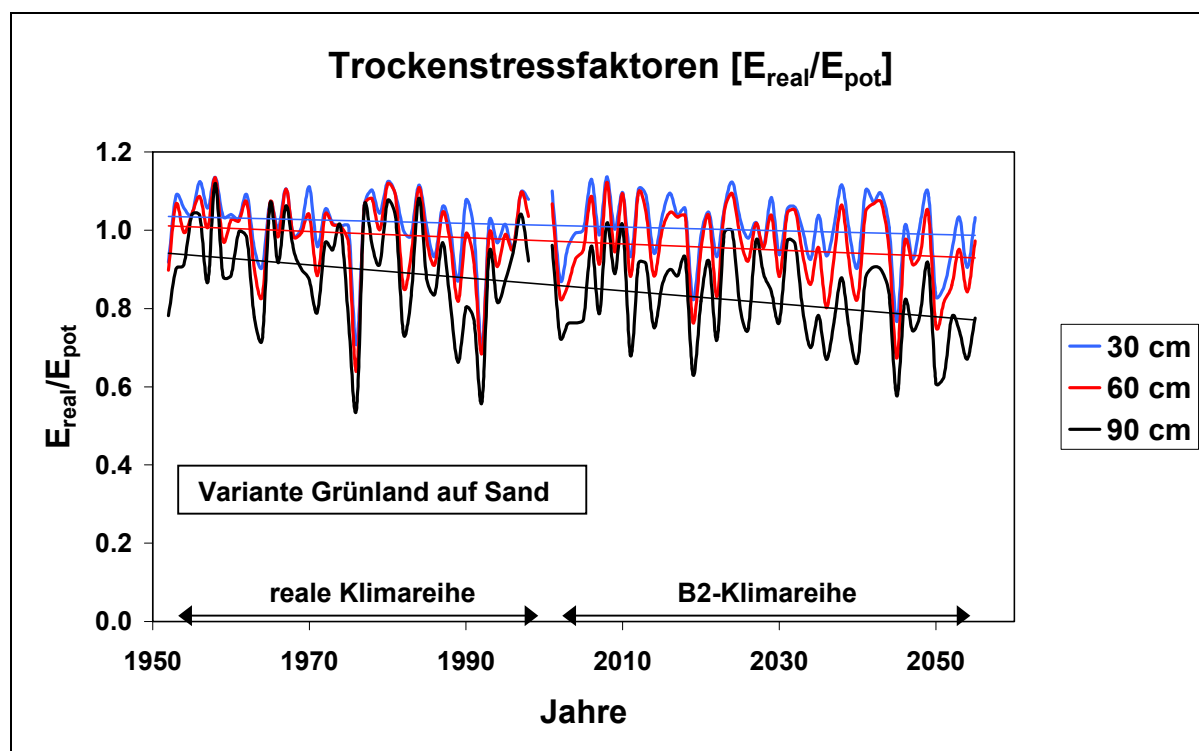


Abb. 29: Trockenstressfaktoren für die Variante Grünland auf Sand für drei unterschiedliche GW-Stände in der jeweiligen Vegetationsperiode

Abbildung 29 zeigt die Trockenstressfaktoren der jeweiligen Vegetationsperiode für die Variante Grünland auf Sand bei unterschiedlichen GW-Ständen. Es wird deutlich, dass mit sinkendem GW-Stand und unter den Bedingungen der angenommenen Klimaveränderungen die Trockenstressfaktoren kleiner werden, d.h. der Trockenstress für die Vegetation ansteigt. Unter den angenommenen Klimaänderungen kommt es zu einem Anstieg des Wasserverbrauchs im Spreewaldgebiet (vgl. Kap. 7.3). Kann dieser nicht aus dem Einzugsgebiet gedeckt werden, kommt es zu einem Absinken der GW-Stände. Dies führt zum einen zu einem erhöhten Trockenstress, zum anderen aber auch zu häufigeren Trockenstressereignissen. Diese haben sowohl Auswirkungen auf die vorkommenden Vegetationsgesellschaften, als auch auf die Ertragslage und Qualität des erzeugten Futters.

Der zweite Faktor, der neben den Trockenstressfaktoren in die Gleichung zur Berechnung des Ertrages eingeht, sind die mittleren Erträge, die bei unterschiedlichen Pflanzengesellschaften unter den vorherrschenden Boden- und Wasserverhältnissen erzielt werden können. Tabelle 15 zeigt einen Auszug aus den von Herrn Dr. Käding von der Versuchstation Paulinenaue (ZALF) zur Verfügung gestellten Daten.

**Tab. 15: Trockenmasseerträge für unterschiedliche Grünlandgesellschaften im Spreewald (nach Käding)**

Nr.	Pflanzen- gesellschaft	Boden/ Wasser	Nutzung	Bruttoertrag [dt TM/ha]
1	Rohrglanzgras/ röhricht	Moor/Überflutungs-standort vererdete Moore, nass	1 x	47
2	Rohrglanzgras/ Quecke	Moore, Anmoorgley, Auen/ nährstoffreich, vererdet/vermulmt/ Winter hoch, So. 50-80 cm u.GOF.	2 x	58
3	Rispe / Quecke	Moor, melioriert, z.T. vermulmt/ Wi. nicht überflutet, So. 60-80 cm u. GOF	3 x	50
4	Wiesen Fuchs- schwanz/ Rasenschmiele	Auenlehm/ Wi. nicht bzw. nur schwach überflutet, So. stärkere Austrocknung	3 x	45
5	Saatgrasland	melioriert/ Wi. keine Überschwemmung, So. ab 50-70 cm u. GOF	3 x	66
6	Schafschwingel	Sand/Trockenrasen, grundwasserfern	2 x	23

Auf dieser Datengrundlage wurde in Zusammenarbeit aller Teilvorhaben im TGP Spreewald (TV 2.3, TV 2.6, TV 2.7 und TV 2.8) eine Regionalisierung der Ertragsprognosen vorgenommen. Das ArcGRM Spreewald (TV 2.3) lieferte die Pegelstände der einzelnen Staubeiche für Referenz- und B2-Basisszenario mit und ohne Moorschutz. Das TV 2.7 nahm eine Einordnung der von Herrn Dr. Käding zur Verfügung gestellten Daten bezüglich der Grünlandgesellschaften vor, um sie für die Verwendung der Biotoptypenkarte aufzubereiten. Das hier vorgestellte TV 2.6 lieferte zum einen den dynamischen Ansatz zur Berechnung der Erträge und vollzog zum anderen die Ankopplung der Ertragsberechnungen an die im jeweiligen Szenario angenommenen Klimaverhältnisse mit Hilfe der Trockenstressfaktoren. Im TV 2.8 wurden auf diesen Grundlagen mit Hilfe von Befragungen von landwirtschaftlichen Betrieben im Spreewald, um die aktuelle Nutzung zu berücksichtigen, die in den jeweiligen Szenarien real zu erwartenden Erträge ermittelt und bewertet.

Abbildung 30 zeigt eine Karte der potenziellen Ertragsänderungen zwischen den Perioden 2003/07 und 2048/52 im B2-Basisszenario.

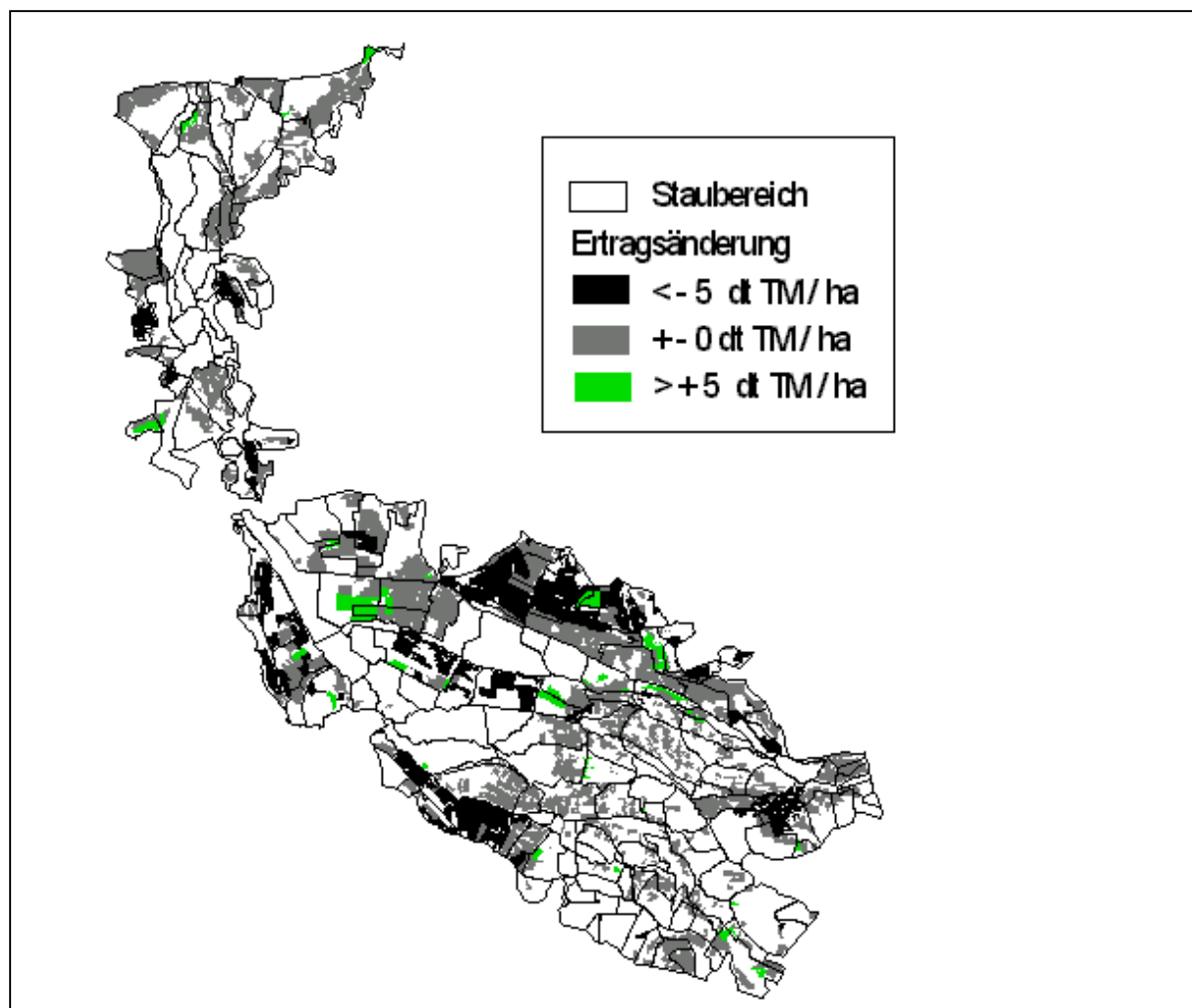


Abb. 30: Karte der potenziellen Grünlandertragsänderungen zwischen den Perioden 2003/07 und 2048/52 des B2-Basiszenarios

Auch die Grünlanderträge lassen, ebenso wie der GW-Stand (vgl. EB TV 2.3), die Vegetationsentwicklung (vgl. EB TV 2.7) oder der Torfschwund (vgl. Kap. 4.5), räumliche Muster erkennen (vgl. Abb.26).

Die Ertragsänderungen wurden in drei Klassen eingeteilt:

**Flächen mit Ertragseinbußen von mehr als 5 dt TM/ha a** (schwarz) nehmen ca. 30 % der Grünlandfläche ein und treten vor allem an den nördlichen und südlichen Randbereichen der Niederung auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Staubereiche von relativ kleinen Einzugsgebieten gespeist werden. Ein Rückgang der Sommerniederschläge führt hier zu einem verminderten Abfluss und zu stärkeren GW-Absenkungen. In der zentralen Niederung fallen ebenfalls Bereiche mit höheren Ertrageinbußen auf. Sie sind jedoch weniger auf die Klimaänderungen als auf Wasserverteilungsprobleme zurückzuführen. Diese Flächen werden durch das Einzugsgebiet der Malxe versorgt. Mit dem Auslaufen der Tagebaue in diesem Bereich und der einsetzenden Flutung der Tagebaurestlöcher, werden die Wassermengen der Malxe stark reduziert. Dies führt auf den betroffenen Flächen zu einem Absinken der Grundwasserstände und zu höheren Ertragseinbußen (vgl. EB TV 2.3).

Auf ca. 5 % der **Grünlandflächen sind Ertragssteigerung von mehr als 5 dt TM/ha a** zu erwarten (grün). Diese treten v.a. auf Flächen auf, die derzeit bei hohen GW-Ständen bewirtschaftet werden. Ein Absinken der GW-Stände führt zu einer Durchlüftung des Oberbodens und zu einer besseren Bearbeitbarkeit (Befahrbarkeit) der Fläche und somit zu besseren Bedingungen für die Vegetation und für den Landwirt.

Auf einem Großteil der Grünlandflächen (ca. 65 %) bewegen sich die Änderungen jedoch im Bereich von +/- 5 dt TM/ha a.

Dies führt bei der Betrachtung der gesamten Grünlandfläche zu einem Ertragsrückgang von ca. 5 %. Hierbei bliebe zu überprüfen in welchem Ausmaß die einzelnen Betriebe von Ertragseinbußen betroffen wären und ob dies weitere Maßnahmen rechtfertigt. Unter Umständen könnten einzelne Betriebe auch gezwungen sein, über Alternativen nachzudenken.

Für weitere Betrachtungen zur Entwicklung der Grünlanderträge in den Szenarien, deren Kopplung an die aktuelle Bewirtschaftung und die ökonomische Bewertung sei hier auf den Bericht des TV 2.8 verwiesen.

## 7.5 Torfschwund und Lebensdauer der Niedermoore im Spreewald

In Abbildung 31 sind die CO<sub>2</sub>-C-Freisetzungen für unterschiedliche Temperatur- und Feuchtestufen dargestellt.

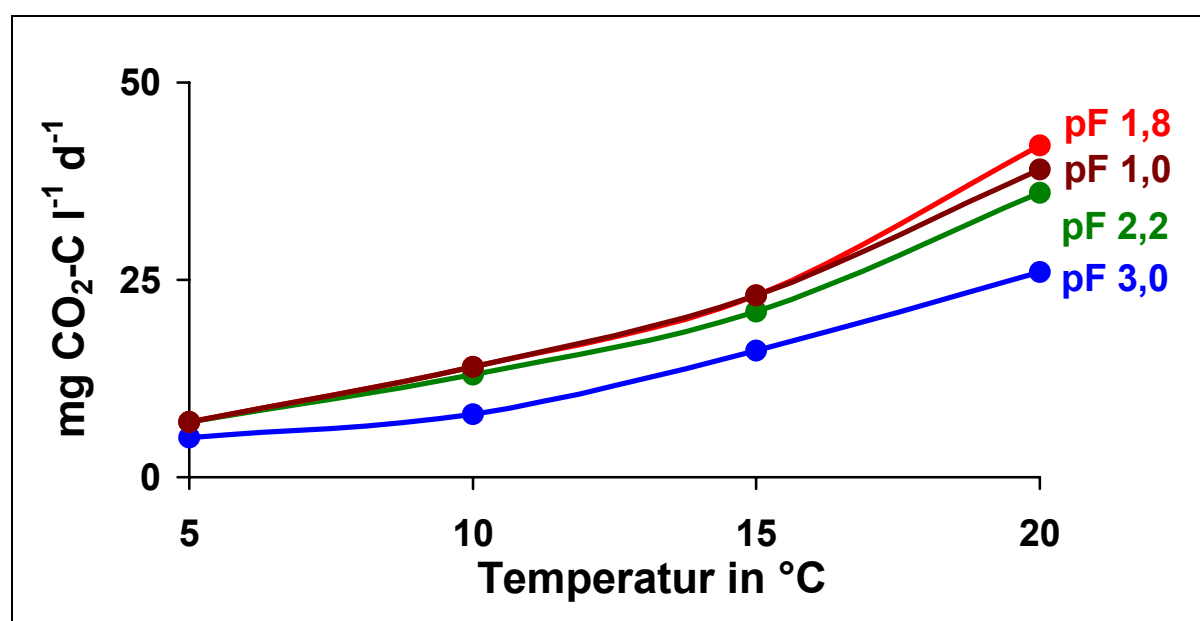


Abb. 31: CO<sub>2</sub>-C-Freisetzung [mg·l<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>] bei unterschiedlichen Temperatur- und Feuchtestufen

In Tabelle 16 sind die zugehörigen CO<sub>2</sub>-C-Freisetzungsfunktionen für unterschiedliche Wasserspannungen in Abhängigkeit von der Temperatur (x) dargestellt.

Tab. 16: CO<sub>2</sub>-C-Freisetzungsfunktionen bei unterschiedlichen Wasserspannungen

Wasserspannung	CO <sub>2</sub> -C-Freisetzungsfunktion	Bestimmtheitsmaß
pF 1,0	$y = 4,2065 \cdot e^{0,1078 x}$	$R^2 = 0,98$
pF 1,8	$y = 2,7735 \cdot e^{0,1128 x}$	$R^2 = 0,94$
pF 2,2	$y = 4,0415 \cdot e^{0,1174 x}$	$R^2 = 0,96$
pF 3,0	$y = 4,1940 \cdot e^{0,1130 x}$	$R^2 = 0,94$

Die höchsten Freisetzungsraten treten bei einem Wassergehalt von pF 1,8 (Feldkapazität) auf. Sowohl bei trockeneren als auch bei feuchteren Bedingungen gehen die Werte der Freisetzung zurück. Ein Maximum der CO<sub>2</sub>-C-Freisetzung tritt bei einer Temperatur von 20 °C auf. Unter diesen Bedingungen scheint die Aktivität der Mikroorganismen am höchsten zu sein.

Aus diesen gemessenen Werten wurden mittlere CO<sub>2</sub>-C-Freisetzungsfunktionen für die beiden Szenarien erstellt (vgl. Kap. 6.4). In Abbildung 32 sind die mittleren CO<sub>2</sub>-C-Freisetzungsraten in Abhängigkeit vom Grundwasserstand für Referenz- und B2-Basiszenario dargestellt. Zum Vergleich sind die Freisetzungsraten von flachgründigem Erdfen und Fennulm aus dem Rhinluch gegenübergestellt (vgl. WESSOLEK ET AL. 1999). Es zeigt sich, dass die Torfe des Spreewaldes über alle Grundwasserstände geringere Freisetzungsraten als die Rhinluchtorfe aufweisen. Dies ist zum einen auf die Flachgründigkeit der Spreewaldtorfe und zum anderen auf die teilweise recht ausgeprägten Vererdungsprozesse zurückzuführen, da sich die CO<sub>2</sub>-C-Freisetzungsraten mit abnehmender Torfmächtigkeit und zunehmenden Vererdungsprozessen verändert. Des Weiteren spielen die unterschiedliche Genese und Auendynamik eine Rolle. Der Verlauf der CO<sub>2</sub>-C-Freisetzungsraten der Spreewaldtorfe ist mit dem des Fennulms aus dem Rhinluch vergleichbar.

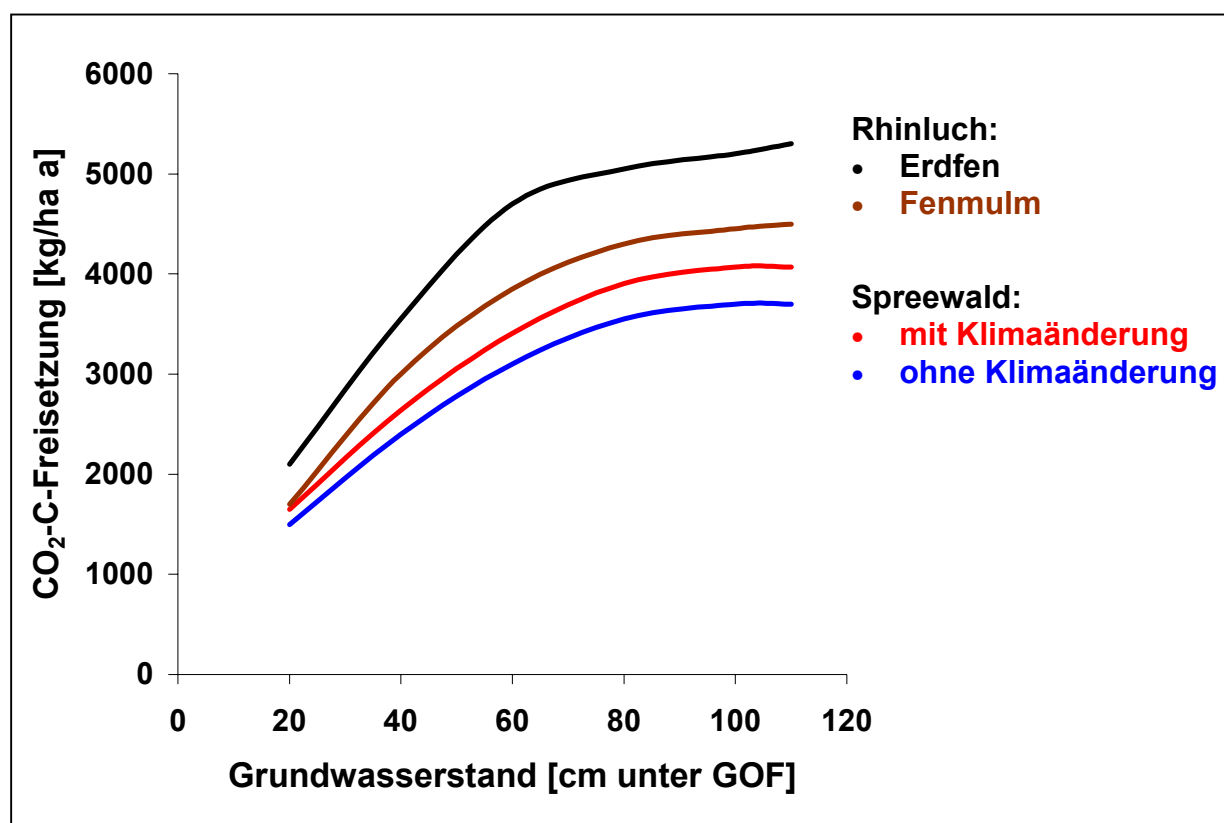


Abb. 32: CO<sub>2</sub>-C-Freisetzung in Abhängigkeit von GW-Stand und Klimaverhältnissen im Vergleich unterschiedlicher Standorte

Bezogen auf die Spreewaldtorfe wird deutlich, dass der Klimaeinfluss mit sinkendem GW-Stand steigt. Hierbei kommt es zu einer Durchlüftung des Oberbodens und aufgrund der abnehmenden Bodenfeuchte und der erhöhten Einstrahlung zu einer Erwärmung der oberen Bodenschichten. Dies verbessert die Bedingungen für die Bodenorganismen.

Auf dieser Grundlage wurde der Torfschwund auf Rasterebene in Abhängigkeit vom GW-Stand für die vorgegebenen Szenarien berechnet.

Der über die gesamte Moorfläche gemittelte **Torfschwund** ist in Abbildung 33 über dem betrachteten Zeitraum dargestellt. Es wird deutlich, dass der mittlere Torfschwund, bei der angenommenen Klimaänderung im B2-Basiszenario, generell auf einem deutlich höheren Niveau verläuft als im Referenzszenario. Dies hängt zum einen mit der angenommenen mittleren Temperaturerhöhung von 1,4 ° K bis 2055 zusammen, die zu einer Erhöhung der Bodentemperaturen und damit zu verbesserten Bedingungen für den mikrobiellen Abbau

führt. Zum anderen sorgt der höhere Wasserbedarf in der Niederung, der nur zum Teil aus dem Einzugsgebiet gedeckt werden kann, für ein Absinken der Grundwasserstände. Durch die damit einhergehende Durchlüftung des Oberbodens verbessern sich ebenfalls die Bedingungen für den mikrobiellen Abbau der Torfe.

Dies führt im B2-Basiszenario zu einem Anstieg des mittleren Torfschwundes innerhalb des betrachteten Zeitraumes (von ca. 3,6 auf 3,8 mm/a), der im Referenzszenario nicht zu verzeichnen ist (ca. 3,2 mm/a). Der Verlauf der Kurven hängt neben dem Klimaeinfluss auch von dem Einsetzen und Auslaufen verschiedener Tagebauflutungen ab, welche die Wasser- verfügbarkeit im Gebiet beeinflussen und so zu zeitweiligen leichten Zu- bzw. Abnahmen der Werte führen (vgl. EB TV 2.3).

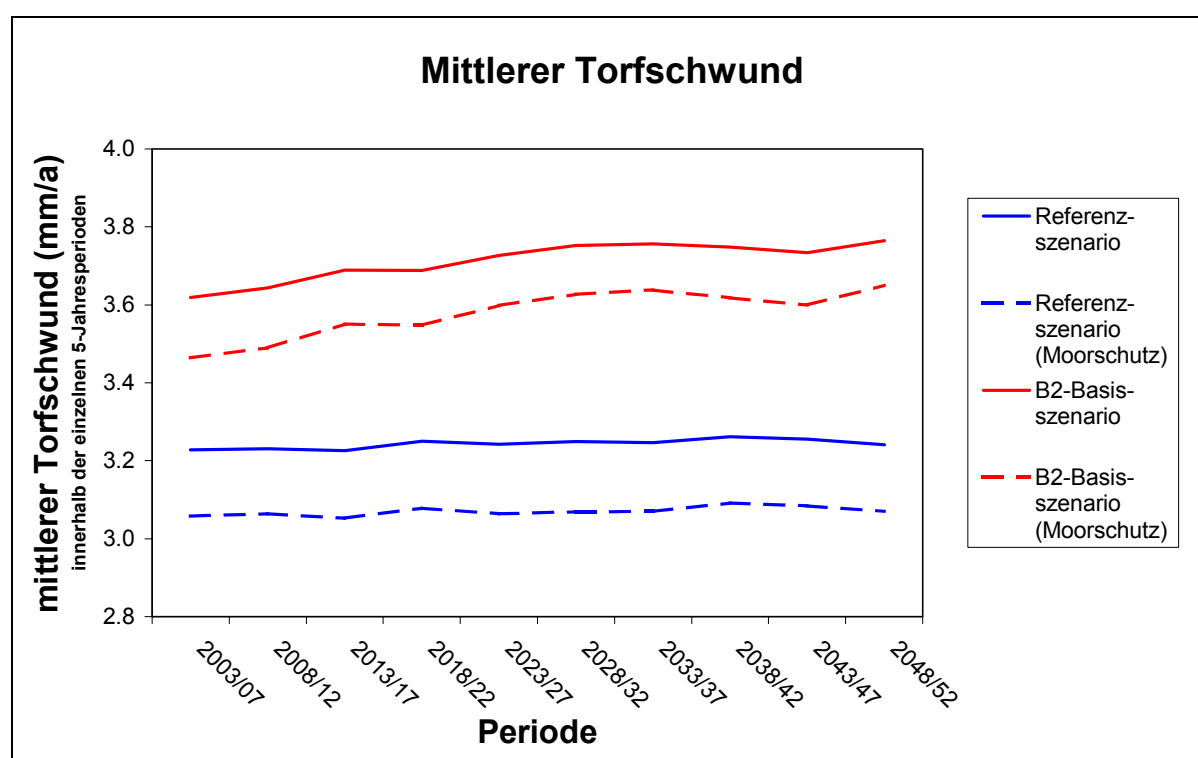


Abb. 33: Mittlerer Torfschwund [mm/a] im zeitlichen Verlauf für die unterschiedlichen Szenarien

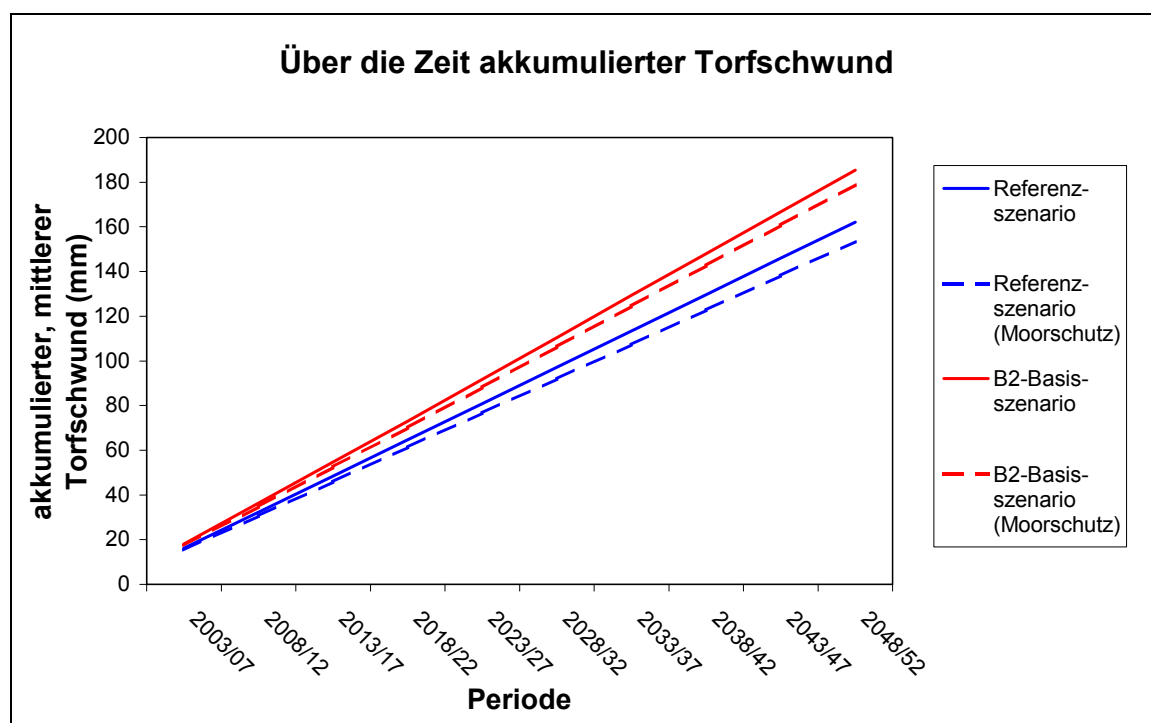
Durch Maßnahmen des Wassermanagements kann der Torfschwund reduziert werden. Dies wird durch die Auswirkungen des Moorschutzszenarios deutlich (vgl. Abb. 33). In diesem Szenario werden die Staubereiche unterteilt in:

- Staubereiche mit hohem Niedermooranteil und mächtigeren Torfen, in denen die Reaktivierung der Moore im Vordergrund steht,
- Staubereiche mit Torfen von geringerer Mächtigkeit, hier steht der Erhalt der Moore im Vordergrund und
- Staubereiche ohne nennenswerten Mooranteil.

Die ersten beiden Kategorien werden im Moorschutzszenario primär mit Wasser versorgt, so dass die GW-Stände nicht so stark abfallen und somit der Torfschwund geringer ausfällt.

In Abbildung 33 sind die Unterschiede zwischen den Szenarien mit und ohne Moorschutz dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Torfschwund in den Moorschutzszenarien nicht so hoch ist wie ohne Moorschutz. Betrachtet man jedoch die absoluten Zahlen, so bewegt sich die Abnahme des Torfschwundes im Bereich von 0,2 mm/a. Hierbei ist mit den anderen Teilvorhaben zu klären, ob solch eine geringe Auswirkung den Aufwand im Wassermanagement lohnt und ob an anderen Stellen wie z.B. Vegetationsgesellschaften, Ertragsänderungen etc. negative Auswirkungen auftreten, die gravierender sind als die Verringerung der Torfverluste.





**Abb. 34: Akkumulierter mittlerer Torfschwund [mm] über den betrachteten Zeitraum**

Der über die Zeit akkumulierte, mittlere Torfschwund (ab 2003) gibt an, wie groß der gesamte, mittlere Torfschwund im Spreewaldgebiet im betrachteten Zeitraum (2003-52), unter den angenommenen Bedingungen ist (vgl. Abb. 34).

Der höhere und im Zeitverlauf ansteigende mittlere Torfschwund im B2-Basiszenario führt zu einem höheren Gesamttorfverlust im Gebiet. Dieser ist nach Ablauf des betrachteten Zeitraums im B2-Basiszenario im Mittel um über 3 cm höher als im Referenzszenario. Dies entspricht einer Steigerung von fast 20 %. Hierbei zeigt sich wiederum die recht geringen Auswirkungen des Moorschutzszenarios, da der Rückgang des mittleren Torfschwundes nach Ablauf der 50 Jahre nur ca. 5 % beträgt.

Korrespondierend damit ist in Abbildung 35 die über die Zeit akkumulierte, mittlere CO<sub>2</sub>-C-Freisetzung.

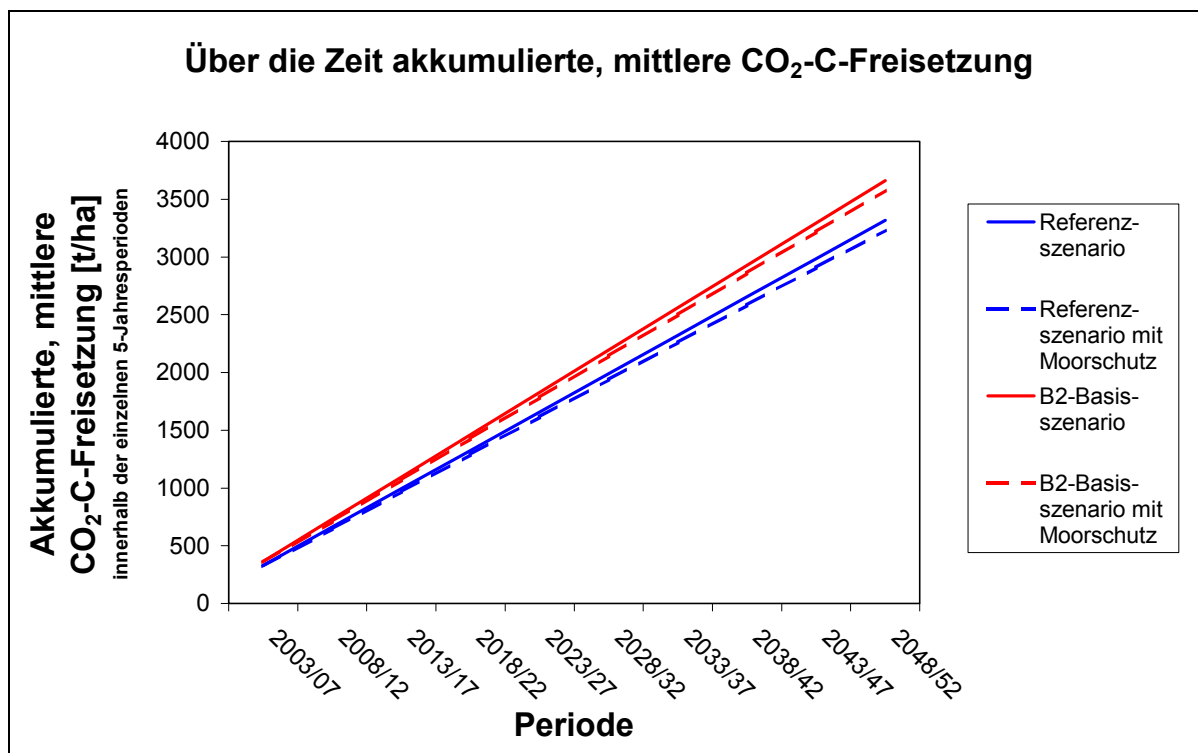


Abb. 35: Akkumulierte, mittlere CO<sub>2</sub>-C-Freisetzung [t/ha] über den betrachteten Zeitraum

Die Gesamt-CO<sub>2</sub>-C-Freisetzung ist am Ende des betrachteten Zeitraums im B2-Basis-szenario um ca. 350 t höher als im Referenz-szenario, dies entspricht einer Steigerung von ca. 10 %. Der verstärkte Moorschutz führt zu einem Rückgang der CO<sub>2</sub>-C-Freisetzung von ca. 80 t, was einer Reduzierung um ca. 2,5 % entspricht.

Der Torfschwund unterscheidet sich je nach Staubereich erheblich. Dies hängt zum einen mit der Wasserverteilung im Gebiet zusammen und zum anderen mit der Wassermenge aus dem Einzugsgebiet des jeweiligen Staubereiches. Je nachdem wie sich diese Größen zwischen den Szenarien unterscheiden, wirken sich die angenommenen Klimaänderungen unterschiedlich auf den Torfschwund aus. Abbildung 36 zeigt die Unterschiede des mittleren Torfschwundes zwischen Referenz- und B2-Basis-szenario für den jeweiligen Staubereich.

Es wird deutlich, dass sich der Einfluss eines sich ändernden Klimas nicht im gesamten Niederungsgebiet gleichmäßig auswirkt, sondern in einigen Staubereichen erheblich höher ist, als in anderen. So treten z.B. in den Staubereichen 1701-1803 (Randbereiche nördlich des Nordumfluters) die höchsten Änderungen im Torfschwund auf, wohingegen z.B. bei den Staubereichen 501-507 (zentrale Niederung) kaum eine Änderung zu verzeichnen ist.

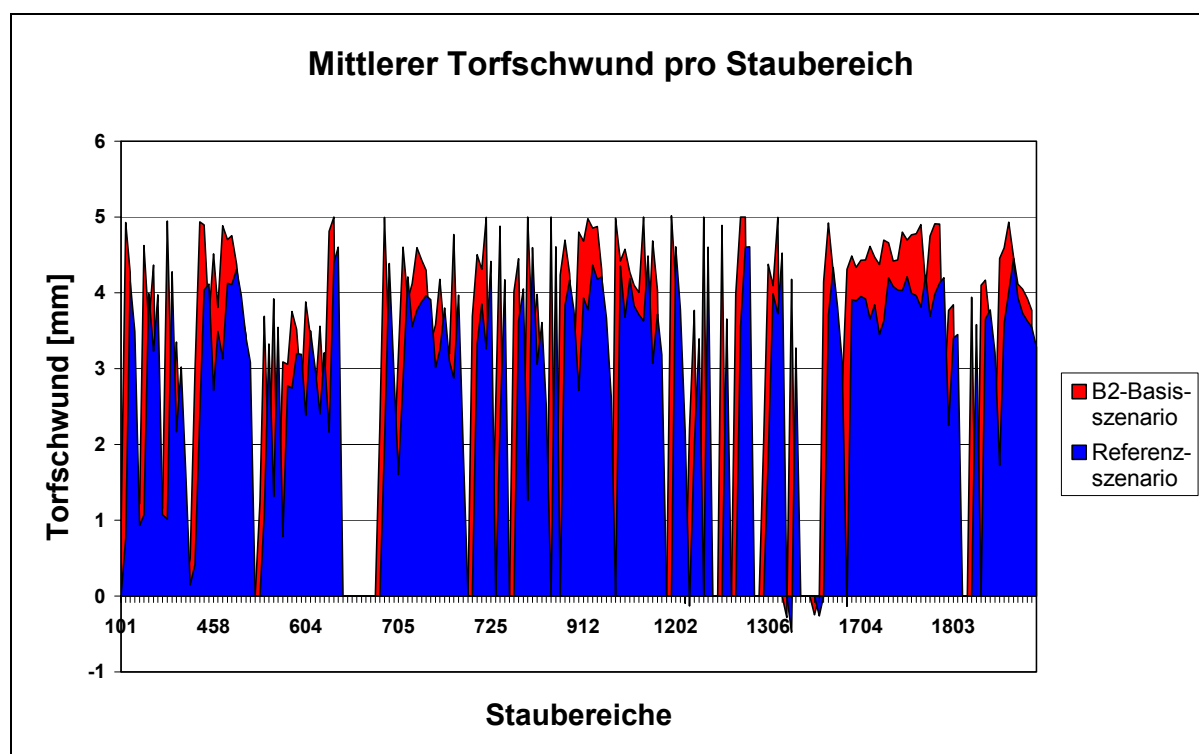


Abb. 36: Unterschiede des Torfschwundes zwischen Referenz- und B2-Basiszenario in den einzelnen Staubereichen

Die Unterschiede in den einzelnen Staubereichen sind in Abbildungen 37 räumlich aufgelöst für das B2-Basiszenario dargestellt und zeigen, dass die Lage des jeweiligen Staubereiches und die Wasserverteilung im Gebiet einen großen Einfluss auf den Torfschwund haben.

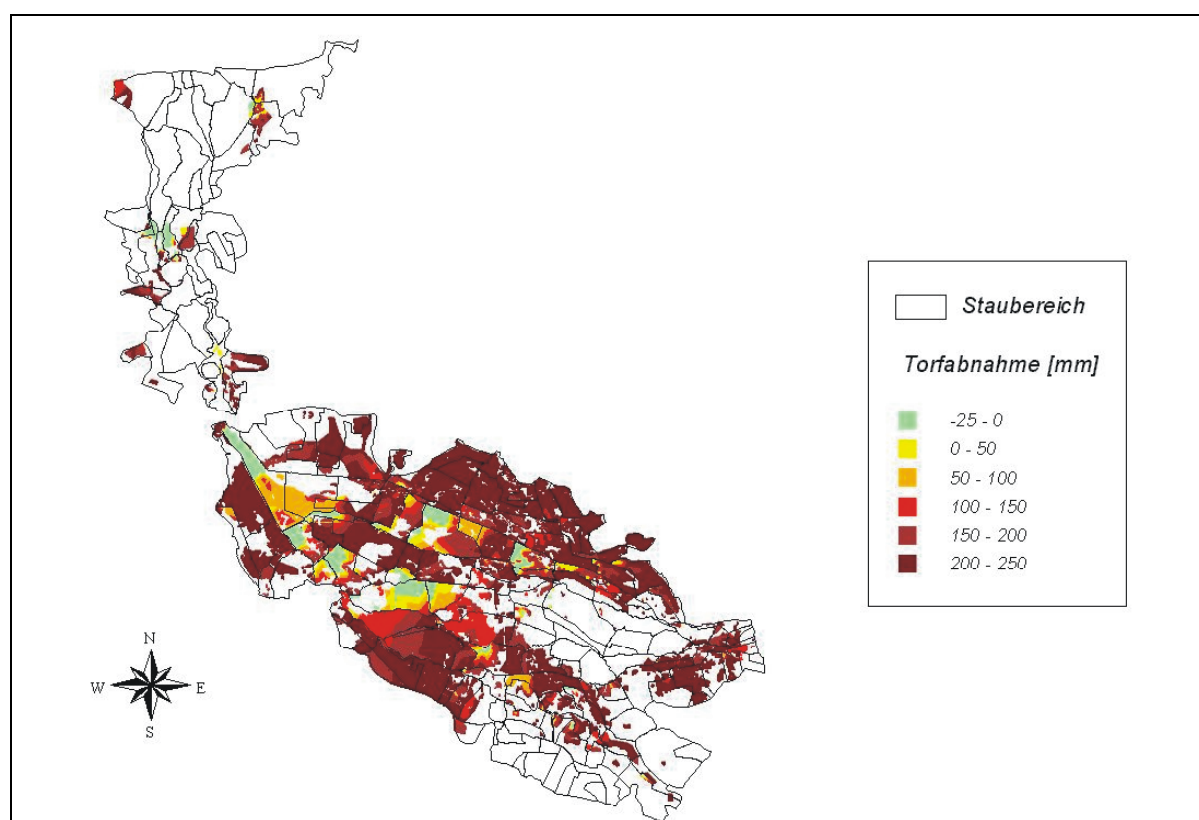


Abb. 37: Torfschwund [mm] zwischen 2003 und 2052 des B2-Basiszenarios

Der größte Torfschwund im B2-Basisszenario tritt an den **Randbereichen der Niederung** auf. Er kann hier zwischen den Jahren 2003 und 2052 bis zu 25 cm betragen. Da die Torfmächtigkeit auf einem Großteil dieser Flächen heute schon als sehr gering einzustufen ist, werden diese Bereiche, v.a. nördlich des Nordumfluters in 50 Jahren nicht mehr als Niedermoorstandorte zu bezeichnen sein. Die hohen Torfverluste an den Randbereichen haben ihren Grund in dem ungünstigen Verhältnis von zu versorgender Niederungsfläche zu dargebotsbildender Einzugsgebietsfläche (vgl. EB TV 2.3). Dadurch führt die Verringerung des Sommerabflusses zu einem verstärkten Absinken der Grundwasserstände und damit zu einer höheren Torfmineralisation.

In der **zentralen Niederung** liegt der Torfschwund im betrachteten Zeitraum zwischen 0-15 cm. Da hier jedoch auch vorwiegend die Flächen mit höheren Torfmächtigkeiten vorkommen, ist innerhalb des betrachteten Zeitraumes nicht mit einer Gefährdung dieser Bereiche zu rechnen. Jedoch ist zu beachten, dass die angenommenen Klimaänderungen und die damit einhergehende erhöhte Torfmineralisation auf lange Sicht zu einer Verringerung der Lebensdauer dieser Niedermoorstandorte führen können.

Innerhalb der zentralen Niederung treten jedoch auch Staubereiche mit höheren Torfverlusten auf. Diese Flächen traten ebenfalls bei den Ertragsprognosen durch höhere Ertragseinbußen hervor (vgl. Kap. 7.4). Sie werden vom Einzugsgebiet der Malxe versorgt, wobei die Flutung der Tagebaurestlöcher und die damit einhergehende Reduzierung der Wassermengen der Malxe zu einem Absinken der Grundwasserstände und damit zu erhöhtem Torfschwund führt. Die restlichen Teile der zentralen Niederung sind weniger von sinkenden Grundwasserständen betroffen, da sie vorwiegend durch die Spree gespeist werden (vgl. EB TV 2.3).

In den Bereichen, in denen im Jahresmittel von einem Überstau der Fläche auszugehen ist, wurde nach GÖTLICH (1990) eine Torfzunahme von 0,5 mm pro Jahr zugrundegelegt. Der Torfzuwachs auf diesen Flächen beträgt demnach maximal 2,5 cm innerhalb der betrachteten 50 Jahre. In einigen Fällen fällt er jedoch geringer aus, da diese Flächen nicht über den gesamten, betrachteten Zeitraum überstaut sind.

Aus der Torfabnahme und der Mächtigkeit der Torfe lässt sich nach RENGER ET AL. (2002) und WESSOLEK ET AL. (2002) die Lebensdauer dieser Niedermoorstandorte abschätzen (vgl. Abb. 38). Die rechte Seite des dargestellten Nomogramms zeigt die Abnahme der Lebensdauer für die mittleren Torfmächtigkeitsabnahmen der beiden Szenarien in der letzten Zeitscheibe 2048-52 (Referenzszenario: 3,2 mm/a; B2-Basisszenario: 3,8 mm/a).

Es wird deutlich, dass bei geringmächtigen Torfen (hier: 3 dm) der Klimaeinfluss die ohnehin schon geringe Lebensdauer weiter verkürzt, von ca. 35 auf ca. 25 Jahre. Dies entspricht einer Abnahme von fast 30%. Flächen, deren Torfmächtigkeit derzeit unter 40-50 cm liegt, werden demnach, unter den Annahmen des B2-Basisszenarios, innerhalb der betrachteten 50 Jahre stark degradieren und dann nicht mehr als Niedermoorflächen zu bezeichnen sein. Bei etwas mächtigeren Torfen (hier: 8 dm) kann es zu einer Verkürzung der Lebensdauer von ca. 200 auf ca. 160 Jahre kommen. Dies entspricht einer Abnahme von ca. 20%. Bei diesen Torfen wird innerhalb des betrachteten Zeitraumes nicht mit einer Gefährdung der Niedermoorstandorte zu rechnen sein.

Die linke Seite der Abbildung 38 zeigt die ermittelten Torfmineralisationsraten. Es wird deutlich, dass mit sinkendem GW-Stand der Einfluss des Klimas auf die Torfmineralisation zunimmt. Die angenommene Klimaerwärmung (rot) führt zu einer gesteigerten CO<sub>2</sub>-Freisetzung und damit zu einem etwas höheren mittleren Torfschwund (max. 0,5 mm/a höher als derjenige ohne Klimaänderung).

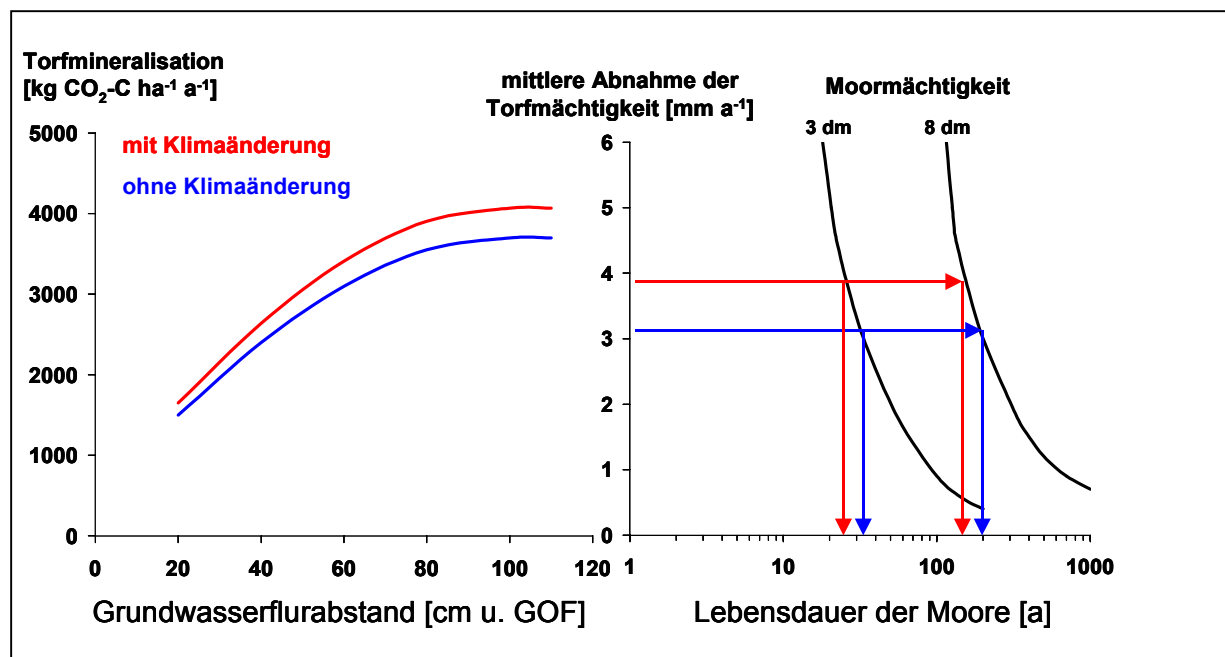


Abb. 38: Abschätzung der Abnahme der Lebensdauer von Niedermooren nach WESSOLEK ET AL. (1999)

Bei bekannter Torfmineralisationsrate und bekanntem GW-Stand lässt sich aus dem Nomogramm sowohl der Torfschwund als auch die Veränderung der Lebensdauer der entsprechenden Moore bei GW-Absenkung ablesen. So führt z.B. eine zu erwartende Grundwasserabsenkung von 30 auf 60 cm unter GOF im Referenzszenario (blau) bei einer Torfmächtigkeit von 8 dm zu einer Halbierung der Lebensdauer.

Zusammenfassend sind die wichtigsten Kennwerte noch einmal in Tabelle 17 dargestellt.

Tab. 17: Indikatoren zur Beschreibung des Torfschwundes und der  $\text{CO}_2$ -Freisetzung

Indikator	Modellgrundlage	Erläuterungen	Referenzszenario			B2-Basissszenario		
			2005	2020	2050	2005	2020	2050
mittlere Torfschwund [ $\text{mm/a}$ ]	Torfdegradierungsmodell + Arc GRM-Spreewald	mittlerer Torfschwund/a bezogen auf die Gesamtmoorfläche des Spreewaldes	3,2	3,2	3,2	3,6	3,7	3,8
mittlerer, akkumulierter Torfschwund [ $\text{mm}$ ]	Torfdegradierungsmodell + Arc GRM-Spreewald	mittlerer, über die Zeit akkumulierter Torfschwund ab 2003 bezogen auf die Gesamtmoorfläche des Spreewaldes	6,5	55	150	7,2	65	180
mittlere $\text{CO}_2\text{-C}$ -Freisetzung [ $\text{kg CO}_2\text{-C/ha a}$ ]	Torfdegradierungsmodell + Arc GRM-Spreewald	mittlere, jährliche $\text{CO}_2\text{-C}$ -Freisetzung bezogen auf die Gesamtmoorfläche des Spreewaldes	ca. 2650	ca. 2650	ca. 2650	ca. 2900	ca. 3000	ca. 3100
$\text{CO}_2\text{-C}$ -Freisetzung <sub>gesamt</sub> [ $\text{t CO}_2\text{/a}$ ]	Torfdegradierungsmodell + Arc GRM-Spreewald	$\text{CO}_2\text{-C}$ -Freisetzung/a die durch die Gesamtmoorfläche (ca. 21750 ha) des Spreewaldes emittiert wird	ca. 57600	ca. 57600	ca. 57600	ca. 63300	ca. 65000	ca. 67000

Auch die Arbeiten von WESSOLEK et al. (1999) zeigen einen Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Freisetzung unter veränderten Klimabedingungen. Dadurch kommt es zu einer Abnahme der Mächtigkeit des Torfkörpers durch Mineralisation. Die durchgeführten Bodenkartierungen zeigen, dass ein Teil der im Spreewald vorhandenen Niedermoore bereits jetzt nur Torfmächtigkeiten von knapp über 3 dm aufweisen. Eine weitere Verringerung des Torfkörpers führt zur Entwicklung von Niedermoorgleyen bzw. Anmoorgleyen. Bereits vorhandene Niedermoorgleyen können sich durch einen weiteren Verlust an Kohlenstoff und Vererdungsprozesse zu Anmoorgleyen entwickeln. Es besteht also die reale Gefahr, dass es im Spreewald aufgrund seiner flachgründigen und bereits stark degradierten Torfkörper zu einem Verlust an Diversität des Bodeninventars durch den Globalen Klimawandel kommt. Eine Abnahme der Torfmächtigkeit kann dazu führen, dass die darunter anstehenden Substrate (Sande, Auenlehme) eine stärkere Bedeutung für die Wasserversorgung der Standorte bekommen und sich so der

Wasserhaushalt nachhaltig ändert. Treten Sande an die Bodenoberfläche, so wird sich das Wasserspeichervermögen und die kapillare Aufstiegshöhe der Standorte verringern. Für eine gleichbleibende Wasserversorgung müssten dann höhere Grundwasserstände eingestellt werden, was bei einem insgesamt geringeren Wasserdargebot problematisch ist. Lehmige Auensedimente (regional als „Klock“ bezeichnet) könnten sich negativ auf die Durchwurzelung der Standorte auswirken und besitzen darüber hinaus völlig andere hydraulische Eigenschaften, wodurch es zur Entwicklung von Böden kommen kann, welche die aktuelle Nutzung nur noch bedingt oder gar nicht mehr gewährleisten. Der Lebensraum sensibler Pflanzen- und Tiergemeinschaften, die an Moor- oder Anmoorstandorte gebunden sind, kann verloren gehen.

## 8 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der Problematik globaler Klimaveränderungen beschäftigte sich das Teilvorhaben 2.6 innerhalb des Teilgebietsprojektes Spreewald mit der Prognose der Auswirkung globaler Veränderungen auf bodenhydrologische Zustandsgrößen, die Degradierung von Niedermooren und die Ertragsentwicklung von Grünland anhand von Szenarienberechnungen. Untersuchungsgebiet war die Auenniederung des Spreewaldes. Da der Spreewald aufgrund seiner Entstehung als pedologisch sehr heterogenes Gebiet einzustufen ist, musste eine Datengrundlage geschaffen werden, welche die Verwendung von Modellen ermöglicht. Für die Berechnung von Stoff- und Wasserflüssen im Boden werden hydraulische Parameter des Bodens benötigt. Diese lagen für das Untersuchungsgebiet nicht flächendeckend vor. Aus diesem Grund wurden in Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (LGRB) Bodenprofile beprobt und Kartierungen durchgeführt. Aus dem vorhandenen Datenmaterial wurde in Zusammenarbeit mit dem LGRB (AG Dr. Kühn) eine Bodenkarte erstellt, die auf den Bodenartenhauptgruppen der bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 1994) beruht. Es wurden hieraus bodenhydrologische Einheiten definiert, denen auf Grundlage von Messwerten aus dem Spreewald, Parameter für die hydrologische Modellierung zugewiesen wurden.

### Bodenhydraulik

Es wurde deutlich, dass zwischen den verschiedenen Bodenartengruppen erhebliche Unterschiede hinsichtlich der hydraulischen Kennwerte (Wasserretention, gesättigte und ungesättigte Wasserleitfähigkeit) bestehen. Diese wirken sich z.B. auf die pflanzenverfügbare Wassermenge aus. Die unterschiedlichen Bodenartengruppen zeigen in Abhängigkeit des GW-Standes unterschiedliche Dynamiken bezüglich des pflanzenverfügbaren Wassers ( $W_{pfl}$ ). Der Einfluss des Klimas drückt sich bei hohen GW-Ständen in erhöhten Werten des  $W_{pfl}$  aus. Dieser Einfluss nimmt jedoch mit sinkenden GW-Ständen ab und ist ab 150 cm unter GOF nicht mehr zu erkennen.

### Bodenwasserhaushalt

Mit Hilfe des Bodenwasserhaushaltsmodells von WESSOLEK (1989) wurde der Bodenwasserhaushalt für Referenz- und B2-Basiszenario modelliert. Die **Verdunstung** ist abhängig von der Bodenartengruppe, dem GW-Stand und der Nutzung. Die angenommene Klimaveränderung sorgt bei hohen GW-Ständen für einen Anstieg der Verdunstung von bis zu 70 mm/a. Mit sinkendem GW-Stand nimmt auch der Einfluss des Klimas ab und ist ab 150 cm unter GOF nicht mehr zu erkennen. Bei tiefen GW-Ständen bewirkt eine verstärkte Austrocknung des Oberbodens im B2-Basiszenario eine stärkere Einschränkung der Verdunstung als im Referenzzenario. Bei den unterschiedlichen Nutzungen sinkt die Verdunstung in der Reihenfolge Wald > Grünland > Acker. Die **Sickerwasserrate** nimmt unter den Bedingungen eines Klimawandels stark ab. Bei steigender Verdunstung und rückläufigen Niederschlägen wird dem Spreewald in Zukunft erheblich weniger Wasser zur Verfügung stehen. Neben den

Klimaveränderungen wirkt sich auch die Flutung von Tagebaurestlöchern im Einzugsgebiet des Spreewaldes auf das Wasserdargebot aus. Um die GW-Stände auch unter veränderten Klimabedingungen zu halten ist demnach eine erheblich höhere Zusatzwassermenge erforderlich. Diese kann mehr als 100 mm/a betragen. Kann dieses Zusatzwasser nicht aus dem Einzugsgebiet oder durch Maßnahmen im Spreewald selbst bereit gestellt werden, kommt es zu einem Absinken der GW-Stände. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf den Spreewald als Feuchtgebiet, die vorkommenden Vegetationsgesellschaften, die Ertragslage von Grünland und die Degradierung der Niedermoore und damit in der Konsequenz auch auf das Erscheinungsbild des Spreewaldes und dessen Attraktivität für den Tourismus als Haupteinahmequelle im Gebiet.

### Grünlandertrag

Die Kopplung der Ertragsprognose an die Klimabedingungen des jeweiligen Szenarios wurde mit Hilfe von Trockenstressfaktoren vollzogen. Diese wurden in Abhängigkeit von Boden, GW-Stand und Klimabedingungen mit Hilfe des Bodenwasserhaushaltsmodells (WESSOLEK 1989) berechnet. Es wurde deutlich, dass der Trockenstress für die Vegetation unter den veränderten Klimabedingungen und sinkenden GW-Ständen bedeutend zunimmt. In Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Käding von der Versuchstation Paulinenaue (ZALF) wurden mittlere Erträge für unterschiedliche Grünlandgesellschaften in Abhängigkeit von Boden, GW-Stand und N-Angebot für den Spreewald definiert. Aus diesen Größen wurde der im jeweiligen Szenario zu erwartende Ertrag berechnet. Die Untersuchungen von Dietrich et al. (vgl. EB TV 2.3) zeigen, dass die Grundwasserstände an den Randbereiche der Niederung am stärksten abfallen. Die Folgen sind höhere Ertragseinbußen als in der zentralen Niederung. Ertragseinbussen sind auf ca. 30 % der Grünlandflächen zu erwarten (v.a. Randbereiche), Ertragssteigerungen auf ca. 5 % (v.a. zentrale Niederung). Auf dem Grossteil der Grünlandflächen (65 %) sind die Ertragsänderungen jedoch kleiner als 5 dt TM/ha-a. Im Mittel über die gesamte Grünlandfläche gehen die Erträge unter den getroffenen Voraussetzungen um ca. 5 % zurück.

### Torfschwund

Die Erhöhung der Bodentemperaturen aufgrund der Klimaveränderungen und eine bessere Durchlüftung des Oberbodens durch sinkende GW-Stände verbessern die Bedingungen für den mikrobiellen Abbau der Niedermoortorfe. Die CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten verschiedener Spreewaldtorfe wurden im Labor untersucht. Hieraus konnten aufbauend auf Arbeiten aus dem Rhinluch und Paulinenaue mittlere CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten für unterschiedliche Klimabedingungen in Abhängigkeit des GW-Standes berechnet werden, aus denen nach WESSOLEK ET AL. (1999) der mittlere Torfschwund pro Jahr für unterschiedliche Torfe bestimmt werden kann. Die Grundwasserstände wurden aus den Pegelständen des TV 2.3 für die Szenarien ermittelt.

Die mittleren CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten steigen mit zunehmender Temperaturerhöhung und sinkenden GW-Ständen an. Demzufolge ist im B2-Basiszenario im Mittel mit einem Anstieg des Torfschwundes zu rechnen. Der Torfschwund ist im Mittel über die Moorfläche des Spreewaldes am Ende der betrachteten 50 Jahre im B2-Basiszenario um ca. 20 % höher als im Referenzszenario. Die Abnahme der Torfmächtigkeit ist jedoch abhängig von der Lage des jeweiligen Staubereiches. Der höchste Torfschwund tritt im B2-Basiszenario aufgrund der stärkeren GW-Absenkungen an den Randbereichen der Niederung auf (zwischen 2003 und 2052 bis zu 25 cm). Da die Torfmächtigkeiten auf diesen Flächen heute schon sehr gering ist, sind diese Niedermoore als sehr gefährdet einzustufen. Die Klimaänderung verkürzt die Lebensdauer dieser Niedermoore um fast 30 %. In der zentralen Niederung liegt der Torfschwund zwischen 0-15 cm. Hier finden sich überwiegend Flächen mit mächtigeren Torfen, so dass diese Niedermoore innerhalb der betrachteten 50 Jahre nicht als sehr gefährdet einzustufen sind. Die Lebensdauer verkürzt sich unter Klimaveränderung jedoch um ca. 20 %. Trotz der Unterschiede zwischen verschiedenen Bereichen ist allgemein von einer

zunehmenden Degradierung der Niedermoore unter den veränderten Klimabedingungen auszugehen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die angenommenen Veränderungen der Klimaverhältnisse erhebliche Auswirkungen auf das Feuchtgebiet Spreewald haben. Die Veränderungen im Bodenwasserhaushalt wirken sich sowohl auf ökologische als auch ökonomische Größen aus. Absinkende GW-Stände und eine zunehmende Degradierung der Niedermoore führen zu einem Verlust an Arten der Flora und Fauna, die an diese Bedingungen gebunden sind. Zudem beeinflussen die Niedermoore auch das Gebietsklima und fungieren als Filter- und Retentionsraum. Diese Funktionen sind zunehmend gefährdet. Mit der Torfmineralisierung und dem prognostizierten Torfschwund sind nicht nur Stoffausträge in die Atmosphäre (z.B. CO<sub>2</sub>, Methan oder Lachgas), sondern auch Austräge in die Gewässer in Form von ehemals gebundenen Nähr- und Schadstoffen verbunden. Im Zusammenspiel mit den gezeigten Wasserquantitätsproblemen und einer damit verbundenen Aufkonzentrierung der Stoffe, können sich hieraus, v.a. im Hinblick auf die Unterlieger (Ballungsraum Berlin), auch Wasserqualitätsprobleme ergeben. Für die Betrachtungen der Auswirkungen von Klimaveränderungen besteht hier noch Forschungsbedarf. Ebenso sind die Austragspfade mancher Stoffe im Nebeneinander von Mobilisierungs- und Immobilisierungsprozessen im Bodenkörper z.T. noch unklar. Im Rahmen dieses Vorhabens konnte auf diese Problematik jedoch nicht weiter eingegangen werden.

Des weiteren wirken sich die dargestellten Veränderungen auch auf den Spreewald als bewirtschaftetes Gebiet aus. Ein Aspekt sind hier die abnehmenden Grünlanderträge. Weitere Bereiche wie Fischerei und Tourismus sind ebenfalls betroffen (vgl. EB TV 2.8). Weiterhin können die angenommenen klimatischen Veränderungen das Erscheinungsbild des Spreewaldes und dessen Attraktivität für den Tourismus beeinflussen. Dies wirkt sich auch auf die im Spreewald lebende Bevölkerung aus, da der Tourismus die größte Einnahmequelle im Gebiet ist.

Die dargestellten Ergebnisse wurden für des Spreewaldgebiet regionalisiert und bewertet, so dass die klimatisch bedingten Veränderungen der dargestellten Bodenzustandsgrößen flächenhaft vorliegen. In Zusammenarbeit mit den anderen Teilvorhaben im TGP Spreewald ist so ein komplexes Feuchtgebietsmodellsystem (ArcGRM-BOWAS-VEGMOS-MODAM) entstanden, mit dem Gebietsaussagen zu unterschiedlichen Fragen des Wassermanagements und dessen Auswirkungen auf ökologische und ökonomische Größen unter veränderten Klima- und Wasserbewirtschaftungsszenarien getroffen werden können. Dieses Modellsystem könnte z.B. bei der Bewertung und Einschätzung der Folgen von wasserwirtschaftlichen Maßnahmen oder Schutzbestrebungen bestimmter Bereiche im Spreewald von Nutzen sein. Ebenso besteht die Möglichkeit, dieses Modellsystem auch auf andere Feuchtgebiete zu übertragen.

## **9 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Das Projekt ist von hoher wissenschaftspolitischer Relevanz, weil die Ergebnisse eine regionale Wertung von zu erwartenden Klimaänderungen auf wichtige hydrologische, ökologische und ökonomische Zusammenhänge unterschiedlicher Landnutzungssysteme zulässt und dadurch eine gezielte Politikberatung ermöglicht wird. Die Erarbeitung eines Wasserbewirtschaftungskonzeptes mit der Zielstellung, die Kulturlandschaft Spreewald zu erhalten, ist nach Eingang der Ergebnisse durchführbar.

Die Ergebnisse werden in den anderen Teilvorhaben des Teilgebietsprojektes Spreewald (TV 2.3, 2.7 und 2.8) genutzt und könnten ebenfalls bei der Planung und Umsetzung von Projekten wie z.B. dem Gewässerrandstreifenprojekte Spreewald von großem Nutzen sein.



Die Ergebnisse erbringen im Verbund mit den anderen Einzelvorhaben des TGP Spreewald die benötigten Grundlagen und Entscheidungshilfen für die Ermittlung der zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten von Feuchtgebieten im gesamten Elbe-Einzugsgebiet. Dieses Modellsystem kann auf andere Bereiche im Elbegebiet übertragen und zur Prognose der Auswirkungen von Veränderungen im Klima und im Wasserhaushalt auf ökologische und ökonomische Größen verwendet werden.

## **10 Während der Bearbeitung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen**

Keiner

## **11 Danksagung**

Wir danken dem BMBF für die Förderung des Projektes im Rahmen des Forschungsprogramms GLOWA-Elbe „Integrierte Analyse der Auswirkungen des Globalen Wandels auf die Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet“.

Ebenso danken wir Herrn Dr. Becker sowie Frau Gräfe und Herrn Dr. Wechsung vom PIK-Potsdam für das Projektmanagement.

Bei Herrn Dr. Gerstengarbe und Herrn Dr. Werner vom PIK-Potsdam möchten wir uns für die unkomplizierte Bereitstellung der Klimaszenarien bedanken.

Des Weiteren danken wir Herrn Dr. Käding von der Versuchsstation Paulinenaue (ZALF) für die Bereitstellung von Ertragsniveaus für unterschiedliche Grünlandgesellschaften für den Spreewald.

Dem Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (LGRB), Dezernat 24, AG Herr Dr. Kühn danken wir für die gute Zusammenarbeit bei den Aufnahmen von Bodenprofilen und der Erstellung einer Bodenkarte für den Spreewald.

Unser Dank gilt weiterhin dem Landesumweltamt Brandenburg (LUA) für die Überlassung einer digitalen Moorkarte für den Spreewald aus dem Bodeninformationssystem FIS-BOS. Ebenso möchten wir uns bei der Biosphärenreservatsverwaltung Spreewald für die unkomplizierte Zusammenarbeit bedanken.

## 12 Literatur

### 12.1 Projektliteratur

#### Tagungsbeiträge:

DIETRICH, O., M. REDEZKY & K. SCHWÄRZEL (2002): Modelling the water balance of wetlands with drainage/ sub-irrigation systems and surface water surplus integrated in watershed management model. International Conference on Water resources and Environment Research, Dresden.

DIETRICH, O. & K. SCHWÄRZEL (2002): Untersuchungen zu Auswirkungen des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt von Feuchtgebieten am Beispiel des Spreewalds. 32. Jahrestagung der Gesellschaft für Ökologie, Cottbus

KAYSER, M., A. BAURIEGEL, O. DIETRICH, J. HERING, K. SCHWÄRZEL, & G. WESSOLEK (2002): Ableitung bodenphysikalischer Flächendaten auf der Basis mittelmaßstäbiger Bodengeologischer Karten am Beispiel des Spreewaldes. GEO 2002, Würzburg.

LORENZ, M., K. SCHWÄRZEL & G. WESSOLEK (2003): Auswirkungen von Klima- und Grundwasserstandsänderungen auf den Grünlandertrag und die Lebensdauer der Niedermoore im Spreewald. Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Frankfurt/Oder.

SCHWÄRZEL, K. & G. WESSOLEK (2002): Measurement and modelling of actual evapotranspiration on peat soils. Congress of European Geophysical Society, Nizza.

WESSOLEK, G., K. SCHWÄRZEL, M. RENGER & C. SIEWERT (2002): Calculating C-Release from fen peatlands. Symposium of the IPS, Future utilisation of peatlands, Bremen.

#### Veröffentlichungen

RENGER, M., G. WESSOLEK, K. SCHWÄRZEL, R. SAUERBREY & C. SIEWERT (2002): Aspects of peat conservation and water management. J. Plant Nutrition and Soil Science, No. 165, pg. 487-493.

RENGER, M., G. WESSOLEK & R. SAUERBREY (2003): Einfluss des Grundwasserflurabstandes auf Kohlenstoff- und Stickstofffreisetzung von Niedermoorböden. Wasser & Boden, 55/4, S. 39-46.

SCHWÄRZEL, K., M. RENGER, R. SAUERBREY & G. WESSOLEK (2002): Soil physical characteristics of peat soils. J. Plant Nutrition and Soil Science, No. 165, pg. 479-486.

WESSOLEK, G., K. SCHWÄRZEL, M. RENGER, R. SAUERBREY & C. SIEWERT (2002): Soil hydrology and CO<sub>2</sub> mineralization of peat soils. J. Plant Nutrition and Soil Science, No. 165, pg. 494-500.

**Poster:**

LORENZ, M., K. SCHWÄRZEL & G. WESSOLEK (2003): Auswirkungen von Klima- und Grundwasserstandsänderungen auf den Torfschwund und die Lebensdauer der Niedermoore im Spreewald. Ökologietage Brandenburg IV „Landschaftswasserhaushalt und Klimaentwicklung in Brandenburg“, 5.-6. Juni 2003, Potsdam.

LORENZ, M., K. SCHWÄRZEL & G. WESSOLEK (2003): Auswirkungen von Klima- und Grundwasserstandsänderungen auf die Lebensdauer von Spreewaldmooren. Tagung der Deutschen Gesellschaft für Moor- und Torfkunde „Ökohydrologie und Hydrochemie von Mooren und Feuchtgebieten, Sankelmark.

**Geplante Veröffentlichungen**

LORENZ, M., K. SCHWÄRZEL & G. WESSOLEK: Torfschwund und CO<sub>2</sub>-Freisetzung von Niedermoortorfen unter dem Einfluss globaler Klimaveränderungen am Beispiel des Spreewaldes.

GROSSMANN, M., M. LORENZ: Vorstellung eines Modellansatzes zur Abschätzung des Grünlandertrages von Feuchtgebieten unter dem Einfluss globaler Klimaveränderungen und deren sozio-ökonomische Folgen.

LORENZ, M., M. GROSSMANN & K. SCHWÄRZEL: CO<sub>2</sub>-Freisetzung von Niedermooren des nordostdeutschen Tieflandes unter dem Einfluss globaler Klimaveränderungen und deren sozio-ökonomische Bewertung.

**Dissertationen/ Studien- und Diplomarbeiten**

KAYSER, M. (2001): Aspekte zum Wasserhaushalt von Sandlössen im Mitteldeutschen Trockengebiet. Dissertation TU Berlin, FG Standortkunde/ Bodenschutz.

HERLITZ, J. (2002): Untersuchungen zur CO<sub>2</sub>-Produktion von Oberbodenhorizonten des Oberspreewaldes. Diplomarbeit TU Berlin, FG Standortkunde/ Bodenschutz.

LORENZ, M. (2002): Bodenphysikalische Eigenschaften von Auenüberflutungsböden im Oberspreewald. Diplomarbeit TU Berlin, FG Standortkunde/ Bodenschutz.

LORENZ, M.: Untersuchung der Auswirkungen des globalen Klimawandels auf ökologische Zustandsgrößen am Beispiel des Spreewalds. Laufende Dissertation TU-Berlin, FG Standortkunde/Bodenschutz

BOSTELL, V. A. & GEB, H. (2002): Kartierung der Böden im Spreewald zwischen Großem Fliess und Leipe. Diplomkartierung TU Berlin, FG Standortkunde/ Bodenschutz.

DITTMER, J. & KOWALSKI, S. (2002): Kartierung der Böden im Spreewald im Bereich des Sommerpolder Nord. Diplomkartierung TU Berlin, FG Standortkunde/ Bodenschutz.

## 12.2 Literaturverzeichnis

- AG BODEN (HRSG.) (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover. 4. Aufl.
- BERGSTRÖM, S. (1998): Requirements on climate scenarios for water resources impact: studies – A Nordic perspective. Proceedings of The Second international Conference on Climate and Water, Espoo, Finland, Vol. 1, 114-124.
- CLARK, C. (1998): „Climate change, evaporation, and water resources“, Proceedings of the „Second International Conference on Climate and Water“, Espoo, Finland, 139-149.
- COLLIN, C. (1998): Climate change, evaporation, and water resources. , Proceedings of the Secondinternational Conference on Climate and Water, Espoo, Finland, Vol. 1, 139-149.
- FACHBEREICHSTANDARD TECHNISCHE NORMEN, GÜTEVORSCHRIFTEN UND LIEFERBEDINGUNGEN Nr. 24300/08 (TGL 24300/08) (1989): Aufnahme landwirtschaftlich genutzter Standorte - Moorstandorte (1986a).
- FACHBEREICHSTANDARD TECHNISCHE NORMEN, GÜTEVORSCHRIFTEN UND LIEFERBEDINGUNGEN Nr. 24300/08 (TGL 24300/08) (1989): Aufnahme landwirtschaftlich genutzter Standorte – Horizonte, Bodentypen und Bodenformen von Mineralböden (1986b).
- FOWLER, A. (1998): Potential Climate change impacts on water resources: Are the uncertainties narrowing? , Proceedings of The Second international Conference on Climate and Water, Espoo, Finland, Vol. 1, p. 104-114.
- GÖTTLICH, K.-H. (1990): Moor- und Torfkunde. Stuttgart. 3. Aufl.
- HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. Mitt. dt. Wetterdienst 2 (11), S. 1-24.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND RAUMORDNUNG DES LANDES BRANDENBURG (MUNR) (Hrsg.)(1998): Landschaftsrahmenplan Biosphärenreservat Spreewald. Potsdam.
- MUALEM, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. In: Water Resour. Res. No. 12, p. 513-522.
- MUNDEL, G. (1976): Untersuchungen zur Torfmineralisation in Niedermooren. Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd., Berlin (20) 10, 669-679.
- RENGER, M., O. STREBEL, H. SPONAGEL & G. WESSOLEK (1984): Einfluss des Grundwasserflurabstandes auf den Pflanzenertrag landwirtschaftlich genutzter Flächen. Wasser und Boden 36, S. 499-502.
- RENGER, M. & G. WESSOLEK (1993): Bestimmung des Beregnungsbedarfs. Wasser & Boden. Heft 9, S.731-734.
- RENGER, M., RIEK, W. & WESSOLEK, G. (1995): „Beziehung zwischen Bodenwasserhaushalt, Evapotranspiration und Pflanzenwachstum“, Schr.-R. Vegetationskunde, H. 27, S. 307-316.

- RENGER, M., WESSOLEK, G. & RIEK, W. (1996): „Auswirkungen der Grundwasserentnahme auf Land und Forstwirtschaft“, Niedersächsische Akademie der Geowissenschaften, H. 11, S. 75-85.
- RENGER, M. STOFFREGEN, H., KLOCKE, J., FACKLAM, M., WESSOLEK, G., ROTH, C.H. & PLAGGE, R. (1999): „Ein autoregressives Verfahren zur Bestimmung der gesättigten und ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit“, Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde, H. 2, 123-130.
- RENGER, M. & G. WESSOLEK (2000): Influence of groundwater depth and available soil water on evapotranspiration and plant growth. J. of Agrophysics, accepted.
- RENGER, M., K. SCHWÄRZEL, G. WESSOLEK, R. SAUERBREY & V. SIEWERT (2001): CO<sub>2</sub>-Freisetzung in Niedermooren. Mitteil. d. dt bodenk. Ges. Bd 96, S. 647-648.
- RICHTER, D. (1996): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. In: Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, S. 3-93.
- RIEK, W., G. WESSOLEK & M. RENGGER (1995): Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität und Feldkapazität von Substrat-Horizontgruppen – eine statistische Auswertung von Labordatenbanken. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde. H. 158, S. 485-491.
- RIJTEMA, P.E. (1968): On the relation between transpiration, soil physical properties and crop production as a basis for water supply plans. Techn. Bulletin 58, Inst. For Land and Water Managem. Res., Wageningen.
- SCHÄFER, W. (1996): Changes in physical properties of organic soils induced by land use. 10th International Peat Congress, Vol. 4, 77-83, Bremen.
- SCHWÄRZEL, K., (2000): Dynamik des Wasserhaushaltes von Niedermooren. Dissertation TU Berlin, FG Standortkunde/Bodenschutz.
- SCHWÄRZEL, K. & H. BOHL (2001): An easy instable groundwater lysimeter to determine water balance components and hydraulic properties of peat soils. Submitted Hydrology and Earth System Science (HESS).
- SCHWÄRZEL, K., G. WESSOLEK (2001): Wie genau kann die ungesättigte Wasserleitfähigkeit und damit der kapillare Wasseraufstieg in Niedermooren geschätzt werden? Mitteil. d. dt bodenk. Ges. Bd 96, S. 655-656.
- STEGMANN & ZEITZ, J. (2001): Bodenbildende Prozesse entwässerter Moore. In: Succow, M. & H. Joosten: Landschaftsökologische Moorkunde. E. Schweizerbart. 2. Aufl. Stuttgart.
- VAN GENUCHTEN, M.TH. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. In: Soil Sc. Soc. Am. J. 44, p. 892-898.
- VÖTT, A. (2000): Ökosystemveränderungen im Unterspreewald durch Bergbau und Meliorationsmaßnahmen. (= Marburger Geographische Schriften. H. 136).

- WESSOLEK, G. (1989): Einsatz von Wasserhaushalts- und Photosynthesemodellen in der Ökosystemanalyse. Berlin. (= Landschaftsentwicklung und Umweltforschung, Nr. 61).
- WESSOLEK, G. & M. RENGER (1993): Einfluß der Beregnungssteuerung auf Wasserhaushalt und Pflanzenertrag. Z. für Kulturtechnik und Landentwicklung, 34, S.9-18.
- WESSOLEK, G. & ASSENG, S., (1994): Klimaänderungen und Wasserhaushalt: Szenarien für unterschiedliche Boden-, Klima- und Vegetationsbedingungen, Materialsammlung, Verein für Umweltschutz, (Vfu), Hannover, S.1-11
- WESSOLEK, G., R. PLAGGE, F.J. LEIJ & M.TH. VAN GENUCHTEN (1994): Analysing problems in describing field and laboratory measured soil hydraulic properties. Geoderma, 64, S. 93-110.
- WESSOLEK, G. (1996): „Klimaänderung und Wasserwirtschaft: Zukünftige Veränderungen der Grundwasserneubildung“, Inst. F. Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, H. 56a, S.119-137
- WESSOLEK, G. UND M. RENGER (1998) in H. Sukopp & R. Wittig (Hrsg.): Wasserhaushalt urbaner Böden. Stadtökologie, 186-200, G. Fischer Verlag.
- WESSOLEK, G., GERSTENGARBE, F.-W., WERNER, P.C. (1998): A new climate scenario model and its application for regional water balance studies, Proceedings of The Second international Conference on Climate and Water, Espoo, Finland, Vol. 1, 160-171.
- WESSOLEK, G., D. ESCHNER, M. RENGER, K. SCHWÄRZEL & R. SAUERBREY (1999): Kennzeichnung der Bodenentwicklungsprozesse in Niedermooren. Ökolog. Hefte der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin, Endbericht der DFG-Forschergruppe: Grundlagen umweltschonender Bodennutzungsstrategien im norddeutschen Tiefland Heft 11, 228 S.
- WESSOLEK, G. & K. SCHWÄRZEL (2001): Wasser- und Stoffumsatz in Niedermooren. Geog. Rundschau, 53, S. 24-34.
- ZEITZ, J., TITZE, E., KOSOV, V. (1987): Auswirkungen von tiefen Grundwasserständen auf Standorteigenschaften und Ertrag bei tiefgründigen Niedermooren. Feldwirtschaft 28, S. 214-216
- ZEITZ, J. (1992): Bodenphysikalische Eigenschaften von Substrat-Horizont-Gruppen in landwirtschaftlich genutzten Niedermooren. Z. f. Kulturtechnik u. Landentwicklung 33, S. 301-307
- ZEITZ, J., VOGEL, I., TÖLLE, R., LEHRKAMP, H. (1997): Entwicklung eines Bewertungsverfahrens und Erarbeitung von Richtlinien zum Schutz der Bodenfunktion in Niedermooren Brandenburgs. Ökolog. Hefte der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin, Heft 8, 153 S.

## 12.3 Karten

AKADEMIE DER LANDWIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN DER DDR, FORSCHUNGSZENTRUM FÜR BODENFRUCHTBARKEIT MÜNCHENBERG, BEREICH BODENKUNDE EBERSWALDE (HRSG.)(1997): Mittelmaßstäbige landwirtschaftliche Standortkartierung (MMK), Blatt-Nr. 38, Maßstab 1:100000.

BAURIEGEL, A.; KÜHN, D.; SCHMIDT, R.; HERING, J., HANNEMANN, J., (2001): Bodengeologische Übersichtskarte des Landes Brandenburg 1 : 300.000. Hrsg: LGR mit LVerm Brandenburg, Potsdam.

HOFFMANN, W., INSTITUT FÜR WASSERWIRTSCHAFT ABTEILUNG MOORWISSENSCHAFT DER HUMBOLDT UNIVERSITÄT BERLIN (HRSG.)(1954): Spreewaldkartierung. Berlin.

LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG (LUA): Schutzkonzeptkarte für Niedermoore Land Brandenburg –digitale Moorkarte-. Fachinformationssystem Bodenschutz Brandenburg. Potsdam.

WERBAN, M. (1999): Bodenkarte Spreewald (digital vorliegend).

## 13 Anhang

### 13.1 Bodenhydraulik

Tab. 18: Zuordnung der verwendeten Substrate zu den Horizonten der Bodenprofile aus denen sie entstammen

	Sand	Lehmsand	Torf/Torf über Sand
<b>Bodenart</b>	Ss (mSfs)	SI3	Hav
<b>Profil/ Horizont</b>	IV 5	I 3	IV 1
<b>Horizont- symbol</b>	Gor	Gor	nHp

Tab. 19: Eigenschaften des aufgenommenen Bodenprofils am Standort I

Profilnummer 2420189 Spreewald Standort I														
Horizont	Bodenart	db	dF	X	GPV	LK	nFK	FK	PWP	kf	C	N	C/N	pH
<b>Mittelwerte</b>											Tütenproben			
Hp	Hnv	0.495	2.050	31.0%	76	17	36	59	23	34	14.12	0.83	17.0	5.0
Fhh	Fhh	0.863	2.192	22.5%	61	5	29	56	27	17	24.13	1.32	18.3	5.4
aGor	St2	1.751	2.646	1.0%	34	12	17	22	5	34	0.48	0		5.7
<b>Standardabweichung</b>														
Hp		0.033	0.079	4.0%	1	3	5	3	2	65				
Fhh		0.196	0.113	6.0%	7	4	3	7	7	28				
aGor		0.052	0.012	0.5%	2	2	3	3	3	70				
<b>Vergleich KA4</b>														
Horizont	Bodenart	db	dF	X	GPV	LK	nFK	FK	PWP	kf				
Hp	Hnv				78	16	32	62	30	<1				
Fhh	Fhh				keine Angaben									
aGor	St2				35	13	12	22	10	106				
<b>Vergleich SHG-Ansatz Riek et al.</b>														
Horizont	Bodenart	db	dF	X	GPV	LK	nFK	FK	PWP					
Hp	Hnv				keine Angaben									
Fhh	Fhh				keine Angaben									
aGor	St2				35	14	14	21	7					

Tab. 20: Eigenschaften des aufgenommenen Bodenprofils am Standort II

Profilnummer 2420187 Spreewald Standort II														
Horizont	Bodenart	db	dF	X	GPV	LK	nFK	FK	PWP	kf	C	N	C/N	pH
<b>Mittelwerte</b>											Tütenproben			
aAh	Tt	0.67	2.30	16.8%	69	18	22	50	28		17.94	1.45	12.4	4.7
Sd-Go-Ah	Tt	1.12	2.50	9.2%	58	9	16	50	36	420	13.82	0.85	16.3	5.1
Sd-Ah-aGo		nicht beprobt												
Sd-aGo	Tu2	0.98	2.52	7.5%	61	6	24	55	31	39	3.65	0.17	21.5	5.5
Sd-aGor	Lt3	1.01	2.55	6.9%	61	4	30	57	27	38	3.13	0.15	20.9	5.4
fAh-aGr	Lt2	0.50	2.23	25.6%	80	3	44	77	30	280	10.88	0.57	19.1	5.1
<b>Standardabweichung</b>														
aAh	Tt	0.20	0.108	4.3%	6	7	8	3	8	-				
Sd-Go-Ah	Tt	0.11	0.018	0.8%	2	2	nb	1	36	300				
Sd-Ah-aGo		nicht beprobt												
Sd-aGo	Tu2	0.02	0.018	0.4%	1	1	1	2	2	82				
Sd-aGor	Lt3	0.06	0.024	1.0%	2	1	0	2	1	76				
fAh-aGr	Lt2	0.15	0.171	9.5%	5	0	nb	5	nb	310				
<b>Vergleich KA4</b>														
Horizont	Bodenart	db	dF	X	GPV	LK	nFK	FK	PWP	kf				
aAh	Tt				77	5	32	72	40	4				
Sd-Go-Ah	Tt				77	5	32	72	40	4				
Sd-aGo	Tu2				66	6	20.5	60.5	40	5				
Sd-aGor	Lt3				62	7	20	55.5	36	9				
fAh-aGr	Lt2				69	10.5	23.5	58	34	9				
Horizont	Bodenart	db	dF	X	GPV	LK	nFK	FK	PWP					
aAh	Tt				keine Angaben									
Sd-Go-Ah	Tt				keine Angaben									
Sd-aGo	Tu2				58	4	19	54	35					
Sd-aGor	Lt3				58	8	21	50	29					
fAh-aGr	Lt2				58	11	23	47	24					



Tab. 21: Eigenschaften des aufgenommenen Bodenprofils am Standort III

Profilnummer 2420188 Spreewald Standort III														
Horizont	Bodenart	db	dF	X	GPV	LK	nFK	FK	PWP	kf	C	N	C/N	pH
<b>Mittelwerte</b>										cm/d	Tütenproben			
aAh	Hav	0.43	2.04	34.7%	79	27	32	52	21	500	16.35	1.25	13.1	5.1
aGo-rAp	Hav	0.48	2.11	28.5%	77	7	47	71	24	45	16.06	0.95	16.9	5.1
Ah-aGo	Hav	0.29	1.93	45.2%	86	7	60	79	19	39	20.97	1.17	17.9	5
Ah-Gr	mSfs	nicht beprobt									1.78	0.07	25.4	5.3
aGr	mSfs	nicht beprobt									nicht beprobt			
<b>Standardabweichung</b>														
aAh	Hav	0.09	0.034	2.1%	4	12	11	10	1	260				
aGo-rAp	Hav	0.05	0.086	3.4%	1	1	3	1	4	40				
Ah-aGo	Hav	0.03	0.026	2.7%	1	3	2	3	3	39				
Ah-Gr	mSfs	nicht beprobt												
aGr	mSfs	nicht beprobt												
<b>Vergleich KA4</b>														
Horizont	Bodenart	db	dF	X	GPV	LK	nFK	FK	PWP	kf				
	Hav				77	5	32	72	40	<1				
	Lt2/Hav				66	6	20.5	60.5	40	<1				
	Hav				62	7	20	55.5	36	<1				
<b>Vergleich SHG-Ansatz Riek et al.</b>														
Horizont	Bodenart	db	dF	X	GPV	LK	nFK	FK	PWP					
	Hav									keine Angaben				
	Lt2/Hav									keine Angaben				
	Hav									keine Angaben				

Tab. 22: Eigenschaften des aufgenommenen Bodenprofils am Standort IV

Profilnummer 2440528 Spreewald Standort IV														
Horizont	Bodenart	db	dF	X	GPV	LK	nFK	FK	PWP	kf	C	N	C/N	pH
<b>Mittelwerte</b>										cm/d	Tütenproben			
nHp	Hp	0.45	1.82	45.4%	75	12	39	64	25	-	24.6	1.73	14.2	5.6
nHv	Hav	0.44	1.75	53.0%	75	6	41	69	29	15	22.3	1.44	15.5	5.6
nHw	Hav	0.27	1.55	72.2%	82	6	56	76	21	40	40.7	1.94	21.0	5.5
For	Fhh	0.30	1.76	52.6%	83	14	40	69	29	6	31.6	1.65	19.2	5.2
Gor	mSfs	0.94	2.46	8.5%	62	15	24	47	22	13	nicht beprobt			
<b>Standardabweichung</b>														
nHp	Hp	0.03	0.094	4.3%	1	5	6	6	5	-				
nHv	Hav	0.08	0.093	5.7%	3	3	3	2	2	51				
nHw	Hav	0.02	0.013	3.2%	1	4	10	3	9	16				
For	Fhh	0.05	0.100	7.7%	2	10	7	8	3	-				
Gor	mSfs	0.12	0.060	2.7%	4	4	3	3	4	28				
<b>Vergleich KA4</b>														
Horizont	Bodenart	db	dF	X	GPV	LK	nFK	FK	PWP	kf				
nHp	Hp				78	16	32	62	30	<1				
nHv	Hav				keine Angaben					<1				
nHw	Hav				keine Angaben					<1				
For	Fhh				keine Angaben									
Gor	mSfs				43	26	14.5	16.5	2	344				
<b>Vergleich SHG-Ansatz Riek et al.</b>														
Horizont	Bodenart	db	dF	X	GPV	LK	nFK	FK	PWP					
nHp	Hp				keine Angaben									
nHv	Hav				keine Angaben									
nHw	Hav				keine Angaben									
For	Fhh				keine Angaben									
Gor	mSfs				60	20.5	28.5	42	13					

Tab. 23: MvG-Parameter der verschiedenen Bodenartengruppen bei der pF-Anpassung

	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	n
<b>Sand</b>	0,58	0,06	0,06	1,15
<b>Lehmsand</b>	0,33	0,00	0,08	1,25
<b>Torf</b>	0,77	0,09	0,03	1,27

Tab. 24: MvG-Parameter der verschiedenen Bodenartengruppen bei der Ku-Anpassung

	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	n
<b>Sand</b>	0,31	0,10	5,23	2,86
<b>Lehmsand</b>	0,35	0,00	0,04	2,31
<b>Torf</b>	0,35	0,00	0,01	1,26

## 13.2 Kapillare Aufstiegsraten

Tab. 25: Kapillare Aufstiegsraten [mm/d] aus dem Grundwasser an die Untergrenze des Wurzelraums für unterschiedliche Böden im Referenzszenario

<b>Sand</b>															
Aufstiegs- höhe [cm]	Wasserspannung im Wurzelraum [pF]														
	1.48	1.60	1.70	1.78	1.85	1.90	2.00	2.18	2.30	2.60	2.78	3.00	3.30	3.48	3.90
20	1.7	2.9	3.2	3.8	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	5	5
40	0	0	0.5	0.9	1.3	1.5	2	2.2	2.4	2.5	2.7	3	3.1	3.2	3.2
50	0	0	0	0.3	0.6	0.9	1.3	1.8	1.8	1.8	1.9	1.9	2	2	2
60	0	0	0	0	0.2	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
80	0	0	0	0	0	0	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
100	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
120	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Lehmsand</b>															
Aufstiegs- höhe [cm]	Wasserspannung im Wurzelraum [pF]														
	1.48	1.60	1.70	1.78	1.85	1.90	2.00	2.18	2.30	2.60	2.78	3.00	3.30	3.48	3.90
20	0.4	0.7	1.1	1.4	1.7	1.9	2.4	3.7	4.2	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
40	0	0	0.2	0.3	0.5	0.6	0.9	1.3	1.6	1.9	2.1	2.5	2.5	2.5	2.5
50	0	0	0	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	1.8
60	0	0	0	0	0.1	0.3	0.4	0.7	0.9	1.2	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4
80	0	0	0	0	0	0	0.1	0.5	0.6	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9
100	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
120	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Torf</b>															
Aufstiegs- höhe [cm]	Wasserspannung im Wurzelraum [pF]														
	1.48	1.60	1.70	1.78	1.85	1.90	2.00	2.18	2.30	2.60	2.78	3.00	3.30	3.48	3.90
20	3.9	3.9	4.1	4.3	4.5	4.7	4.9	5	5	5	5	5	5	5	5
40	0	0	0.8	1.3	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
50	0	0	0	0.4	0.7	1	1.3	1.8	2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.2	2.1
60	0	0	0	0	0.3	0.5	0.7	1.2	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
80	0	0	0	0	0	0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
100	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
120	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Torf über Sand</b>															
Aufstiegs- höhe [cm]	Wasserspannung im Wurzelraum [pF]														
	1.48	1.60	1.70	1.78	1.85	1.90	2.00	2.18	2.30	2.60	2.78	3.00	3.30	3.48	3.90
20	3.9	3.9	4.1	4.3	4.5	4.7	4.9	5	5	5	5	5	5	5	5
40	0	0	0.7	1	1.5	1.7	2	2.3	2.6	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
50	0	0	0	0.4	0.6	0.8	1.1	1.6	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
60	0	0	0	0	0.2	0.4	0.6	0.9	1.1	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
80	0	0	0	0	0	0	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
100	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
120	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Lehm</b>															
Aufstiegs- höhe [cm]	Wasserspannung im Wurzelraum [pF]														
	1.48	1.60	1.70	1.78	1.85	1.90	2.00	2.18	2.30	2.60	2.78	3.00	3.30	3.48	3.90
20	1	1.1	1.2	1.4	1.5	1.6	1.7	2	2	2	2	2	2	2	2
40	0	0	1.3	1.6	1.7	1.9	2.1	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
50	0	0	0	0.3	0.6	0.9	2.2	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
60	0	0	0	0	0.2	0.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.5	2.5	2.5	2.5
80	0	0	0	0	0	0	0.3	0.7	1.1	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
100	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8
120	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

**Tab. 26: Kapillare Aufstiegsraten [mm/d] aus dem Grundwasser an die Untergrenze des Wurzelraums für unterschiedliche Böden im B2-Basisszenario**

<b>Sand</b>															
Aufstiegs- höhe [cm]	Wasserspannung im Wurzelraum [pF]														
	1.48	1.60	1.70	1.78	1.85	1.90	2.00	2.18	2.30	2.60	2.78	3.00	3.30	3.48	3.90
20	1.7	2.9	3.2	3.8	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	5	5
40	0	0	0.5	0.9	1.3	1.5	2	2.2	2.4	2.5	2.7	3	3.1	3.2	3.2
50	0	0	0	0.3	0.6	0.9	1.3	1.8	1.8	1.8	1.9	1.9	2	2	2
60	0	0	0	0	0.2	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
80	0	0	0	0	0	0	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
100	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
120	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Lehmsand</b>															
Aufstiegs- höhe [cm]	Wasserspannung im Wurzelraum [pF]														
	1.48	1.60	1.70	1.78	1.85	1.90	2.00	2.18	2.30	2.60	2.78	3.00	3.30	3.48	3.90
20	0.4	0.7	1.1	1.4	1.7	1.9	2.4	3.7	4.2	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
40	0	0	0.2	0.3	0.5	0.6	0.9	1.3	1.6	1.9	2.1	2.5	2.5	2.5	2.5
50	0	0	0	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	1.8
60	0	0	0	0	0.1	0.3	0.4	0.7	0.9	1.2	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4
80	0	0	0	0	0	0	0.1	0.5	0.6	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9
100	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
120	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Torf</b>															
Aufstiegs- höhe [cm]	Wasserspannung im Wurzelraum [pF]														
	1.48	1.60	1.70	1.78	1.85	1.90	2.00	2.18	2.30	2.60	2.78	3.00	3.30	3.48	3.90
20	3.9	3.9	4.1	4.3	4.5	4.7	4.9	5	5	5	5	5	5	5	5
40	0	0	0.8	1.3	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
50	0	0	0	0.4	0.7	1	1.3	1.8	2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.2	2.1
60	0	0	0	0	0.3	0.5	0.7	1.2	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
80	0	0	0	0	0	0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
100	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
120	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Torf über Sand</b>															
Aufstiegs- höhe [cm]	Wasserspannung im Wurzelraum [pF]														
	1.48	1.60	1.70	1.78	1.85	1.90	2.00	2.18	2.30	2.60	2.78	3.00	3.30	3.48	3.90
20	3.9	3.9	4.1	4.3	4.5	4.7	4.9	5	5	5	5	5	5	5	5
40	0	0	0.7	1	1.5	1.7	2	2.3	2.6	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
50	0	0	0	0.4	0.6	0.8	1.1	1.6	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
60	0	0	0	0	0.2	0.4	0.6	0.9	1.1	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
80	0	0	0	0	0	0	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
100	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
120	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Lehm</b>															
Aufstiegs- höhe [cm]	Wasserspannung im Wurzelraum [pF]														
	1.48	1.60	1.70	1.78	1.85	1.90	2.00	2.18	2.30	2.60	2.78	3.00	3.30	3.48	3.90
20	1	1.1	1.2	1.4	1.5	1.6	1.7	2	2	2	2	2	2	2	2
40	0	0	1.3	1.6	1.7	1.9	2.1	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
50	0	0	0	0.3	0.6	0.9	2.2	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
60	0	0	0	0	0.2	0.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.5	2.5	2.5	2.5
80	0	0	0	0	0	0	0.3	0.7	1.1	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
100	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8
120	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

### 13.3 Trockenstressfaktoren

Tab. 27: Trockenstressfaktoren für unterschiedliche Böden und Grundwasserstände [cm unter GOF] im Referenz- und B2-Basiszenario

Bodenarten- hauptgruppe	Grundwasser- flurabstand	Trockenstressfaktoren					
		Referenzszenario (Apr.-Sept.)			B2-Basiszenario (Apr.-Sept.)		
		Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.
Torf	0 - 20	-	-	-	-	-	-
	20 - 40	0,51	0,71	0,91	0,75	1,03	1,32
	40 - 70	0,91	0,94	0,98	1,32	1,36	1,39
	70-120	0,78	0,89	0,98	0,98	1,19	1,39
	> 120	0,69	0,72	0,78	0,82	0,88	0,98
Lehm	0 - 20	-	-	-	-	-	-
	20 - 40	0,43	0,51	0,64	0,58	0,69	0,86
	40 - 70	0,64	0,78	0,91	0,86	1,07	1,27
	70-120	0,87	0,89	0,91	1,19	1,23	1,27
	120-150	0,71	0,79	0,87	0,88	1,04	1,19
	> 150	0,66	0,69	0,71	0,78	0,83	0,88
Sand	0 - 20	-	-	-	-	-	-
	20 - 40	0,54	0,61	0,68	0,80	0,90	1,00
	40 - 70	0,68	0,82	0,96	1,00	1,18	1,37
	70-120	0,77	0,87	0,96	0,95	1,16	1,37
	> 120	0,71	0,74	0,77	0,83	0,89	0,95