



## INKLIM 2012 BAUSTEIN II PLUS

Projektträger:  
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie  
Dr. Helmut Wolf  
Dr. Cornelia Fooker  
Rheingaustraße 186  
65203 Wiesbaden

### Teilprojekt

**WALD IN DER RHEIN-MAIN-EBENE – RISIKEN UND ANPASSUNGSMÄß-  
NAHMEN FÜR DIE FORSTWIRTSCHAFT ALS FOLGE DER PROGNOSTI-  
ZIERTEN KLIMAVERÄNDERUNG IN HESSEN**

Projektnummer 4500284417

Projektbearbeitung: Caroline Fiebiger  
Johannes Suttmöller  
Henning Meesenburg  
Johannes Eichhorn

## VERZEICHNISSE

Abbildungen .....	3
Tabellen .....	4
Anlagenverzeichnis.....	5

## INHALT

Zusammenfassung .....	6
1 Einleitung und Zielstellung.....	7
2 Untersuchungsflächen .....	9
3 Wasserhaushaltsmodellierung.....	10
3.1 Modellbeschreibung.....	10
3.2 Meteorologischer Antrieb.....	11
3.3 Parametrisierung der Bodeneigenschaften .....	12
3.4 Bestandesparametrisierung .....	13
3.5 Modellkalibrierung und - validierung .....	14
4 Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulation .....	16
4.1 Rekonstruktion des Zeitraumes 1961 – 1990 .....	16
4.1.1 <i>Wasserbilanzen</i> .....	16
4.1.2 <i>Bodenwasserverfügbarkeit</i> .....	19
4.2 Simulationsergebnisse unter Verwendung der Klimaszenarien.....	21
4.2.1 <i>Wasserbilanzen</i> .....	21
4.2.2 <i>Bodenwasserverfügbarkeit</i> .....	24
5 Diskussion und Fazit .....	26
6 Quellenverzeichnis .....	33
Anhang.....	36

## ABBILDUNGEN

Abbildung 1: Flächenanteil stark absterbegefährdeter bis abgestorbener (Schadstufe 2+) Bäume über 60 Jahre im Zeitraum 1984 – 2007 im Rhein-Main-Gebiet.....	8
Abbildung 2: Modellschema WaSiM-ETH (verändert nach Schulla 1997).....	11
Abbildung 3: Atmosphärische Treibhausgaskonzentration in CO <sub>2</sub> -Äquivalenten im Jahre 2100 bei den Hauptszenarien (Quelle: IPCC 2007).....	12
Abbildung 4: Entwicklung des LAI auf den Untersuchungsflächen. Buche o.E. = ohne waldbaulichen Eingriff .....	14
Abbildung 5: Vergleich des Grundwasserstandes in Biblis (Daten: HLUg) mit simulierten Grundwasserneubildungsraten der drei Teilflächen (Buche, Eiche, Kiefer) sowie einer Grasreferenzfläche .....	15
Abbildung 6: Klimatische Wasserbilanz (Niederschlag – pot. Grasreferenzverdunstung) für die Jahre und die Vegetationsperioden 1961 – 1990.....	16
Abbildung 7: Vergleich der realen Verdunstung der Kiefern-, Eichen- und Buchenflächen sowie der Referenzfläche (Gras). Zusätzlich Angabe des Niederschlages .....	17
Abbildung 8: Vergleich der Interzeption der Kiefern-, Eichen- und Buchenflächen sowie der Referenzfläche (Gras). Zusätzlich Angabe des Niederschlages...	18
Abbildung 9: Vergleich der Grundwasserneubildungsraten unter Kiefer, Eiche und Buche sowie der Referenzfläche (Gras). Zusätzlich Angabe des Niederschlages.....	18
Abbildung 10: Vergleich der Wasserbilanzen der Kiefern-, Eichen- und Buchenfläche sowie der Referenzfläche (Gras) in den Vegetationsperioden. Zusätzlich Angabe des Niederschlages .....	19
Abbildung 11: Pflanzenverfügbares Bodenwasser (in % der nFK) im Trockenjahr 1976 unter Buche. Zusätzlich Angabe der Monatsniederschläge. ....	20
Abbildung 12: Vergleich der realen Verdunstung (Jahresmittel) von 1961 – 1990 mit 2041 – 2050 der Szenarien A1B und B1 (trocken und feucht) unter Berücksichtigung zweier möglicher waldbaulicher Varianten (Buche: normale Nutzung und o.E = ohne Eingriff) .....	22
Abbildung 13: Vergleich der Quotienten $V_{real}/V_{pot}$ . (Jahresmittel) von 1961 – 1990 mit 2041 – 2050 der Szenarien A1B und B1 (trocken und feucht) unter Berücksichtigung zweier möglicher waldbaulicher Varianten (Buche: normale Nutzung und o.E = ohne Eingriff) .....	22
Abbildung 14: Vergleich der Interzeption (Jahresmittel) von 1961 – 1990 mit 2041 – 2050 der Szenarien A1B und B1 (trocken und feucht) unter Berücksichtigung zweier möglicher waldbaulicher Varianten (Buche: normale Nutzung und o.E = ohne Eingriff) .....	23
Abbildung 15: Vergleich der Grundwasserneubildung (Jahressummen) von 1961 – 1990 mit 2041 – 2050 der Szenarien A1B und B1 (trocken und feucht) unter Berücksichtigung zweier möglicher waldbaulicher Varianten (Buche: normale Nutzung und o.E = ohne Eingriff) .....	23

Abbildung 16: Vergleich der Wasserbilanzen (Mittel der Vegetationsperioden) von 1961 – 1990 mit 2041 – 2050 der Szenarien A1B und B1 (trocken und feucht) unter Berücksichtigung zweier möglicher waldbaulicher Varianten (Buche: normale Nutzung und o.E = ohne Eingriff) .....	24
Abbildung 17: Pflanzenverfügbares Bodenwasser (in % der nFK) im trockensten Jahr der Dekade 2041 – 2050 unter Buche (mit waldbaulichen Eingriffen). ..	25
Abbildung 18: Pflanzenverfügbares Bodenwasser (in % der nFK) im trockensten Jahr der Dekade 2041 – 2050 unter Buche (ohne waldbauliche Eingriffe). ....	26

## TABELLEN

Tabelle 1: Bodenprofilbeschreibung der drei Intensivmessflächen. Informationen aus dem Waldboden-Informationssystem der Hessischen Forsteinrichtungsanstalt, Abteilung Waldökologie. Aufnahme datum: 22.10.1999. Ableitung der nFK für die Humusaufgabe nach Leuschner (1997) und für Mineralböden nach Teepe et al. (2003) .....	10
Tabelle 2: Bestandeskenndaten (Aufnahme 1998) der drei Intensivmessflächen im Hessischen Ried.....	13
Tabelle 3: Vergleich gemessener mit simulierten Bestandesniederschlägen (BN) auf den Intensivmessflächen Buche, Eiche und Kiefer. Erhebungszeitraum: 01.01.1998 – 31.12.2006 (n = 186) .....	15
Tabelle 4: Auftreten von Trockenperioden (Tp.) im Zeitraum 1961 – 1990 in den obersten 6 Tiefenstufen (vgl. Tabelle 1) der Untersuchungsflächen (Angabe als Jahreswerte). .....	20
Tabelle 5: Vergleich der mittleren Temperatur, des Niederschlages und der Klimatischen Wasserbilanz der Szenarien A1B und B1 2041-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 – 1990 für die Jahre und Vegetationsperioden.....	21
Tabelle 6: Auftreten von Trockenperioden (Tp.) im Zeitraum 2041 – 2050 bei den Szenarien A1B trocken und B1 feucht in den obersten 6 Tiefenstufen der Buchenfläche mit und ohne waldbauliche Eingriffe.....	24

## ANLAGENVERZEICHNIS

Anlage I: Blattflächenindizes (LAI) des untersuchten Buchen-, Eichen- und Kiefernbestandes sowie von Grasvegetation im Hessischen Ried. Mit dem WaldPlaner berechnete Werte sind kursiv dargestellt. ....	36
Anlage II: Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Eiche (oben) und Kiefer (unten) im Jahr 1976 unter Angabe des Niederschlages. ....	37
Anlage III: Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Gras im Jahr 1976 unter Angabe des Niederschlages. ....	38
Anlage IV: Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Kiefer im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario A1B (trockene Variante) unter Angabe des Niederschlages. ....	38
Anlage V: Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Eiche im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario A1B (trockene Variante) unter Angabe des Niederschlages. ....	39
Anlage VI: Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Gras im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario A1B (feuchte Variante) unter Angabe des Niederschlages. ....	39
Anlage VII: Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Buche (oben) und Kiefer (unten) im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario A1B (feuchte Variante) unter Angabe des Niederschlages. ....	40
Anlage VIII: Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Buche ohne waldbauliche Eingriffe (oben) und Eiche (unten) im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario A1B (feuchte Variante) unter Angabe des Niederschlages. ....	41
Anlage IX: Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Buche (oben) und Kiefer (unten) im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario B1 (trockene Variante) unter Angabe des Niederschlages. ....	42
Anlage X: Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Buche ohne waldbauliche Eingriffe (oben) und Eiche (unten) im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario B1 (trockene Variante) unter Angabe des Niederschlages. ....	43
Anlage XI: Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Gras im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario B1 (trockene Variante) unter Angabe des Niederschlages. ....	44
Anlage XII: Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Kiefer im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario B1 (feuchte Variante) unter Angabe des Niederschlages. ....	44
Anlage XIII: Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Buche mit (oben) und ohne (unten) waldbauliche Eingriffe im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario B1 (feuchte Variante) unter Angabe des Niederschlages. ....	45
Anlage XIV: Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Eiche (oben) und Gras (unten) im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario B1 (feuchte Variante) unter Angabe des Niederschlages. ....	46

## ZUSAMMENFASSUNG

Wie in keiner anderen Region in Hessen sind die Wälder des Rhein-Main-Gebietes Belastungen und Risiken ausgesetzt, die die nachhaltige Erfüllung von Waldfunktionen gefährden und in Teilen des Gebietes die nachhaltige Entwicklung der gesamten Waldstruktur infrage stellen. Die klimatischen Bedingungen lassen schon aktuell ein häufiges Auftreten von Trockenstressbedingungen erwarten. Diese wirken insbesondere bei Eiche und Buche vitalitätsmindernd und prädisponierend für Schädlingskalamitäten und erhöhen die Mortalität. Bei der Kiefer ist ein substanzieller Mistelbefall an Bäumen festzustellen, die durch Trockenheit, Insektenbefall und Luftschadstoffe vorgeschädigt sind.

Am Beispiel von drei Waldstandorten (Buche, Eiche und Kiefer) wurde der Wasserhaushalt retrospektiv für den Zeitraum 1961 – 1990 und bis zum Jahr 2050 unter der Vorgabe verschiedener Klimaszenarien modelliert, um sowohl vergangene Perioden eingeschränkter Wasserverfügbarkeit zu identifizieren als auch Prognosen für mögliche zukünftige Entwicklungen des Wasserhaushaltes zu erstellen. Dabei wurde auf die Effekte verschiedener Baumarten und auf Auswirkungen unterschiedlicher Waldbehandlung eingegangen. Die zukünftige Klimaentwicklung wurde gemäß der IPCC-SRES Emissionsszenarien A1B und B1 unter Verwendung des globalen Klimamodells ECHAM 5 und des Regionalmodells WETTREG (jeweils trockene und feuchte Variante) abgeschätzt.

Für die Vergangenheit weisen die Ergebnisse durch eingeschränkte Verdunstungs- und Grundwasserneubildungsraten auf teilweise ausdauernde Trockenperioden hin. In der Folge muss davon ausgegangen werden, dass sich die Anfälligkeit gegenüber Schadinsekten stark erhöhte. Für die zeitliche Entwicklung der Wasserhaushaltskomponenten spielen neben den Effekten der Baumartenunterschiede die Altersstruktur der Waldbestände eine bedeutende Rolle.

Unter Annahme einer Klimaentwicklung gemäß der Szenarien A1B und B1 (jeweils trockene und feuchte Variante) bis zum Jahr 2050 treten durch die bestehende Unsicherheit bezüglich der Niederschlagsentwicklung große Spannen simulierter Wasserbilanzen auf. Für die feuchte Variante der Szenarien B1 und A1B ergaben die Modellierungen für die Dekade 2041- 2050 eine deutliche Verkürzung von Trockenperioden und einen Anstieg der Grundwasserneubildungsraten auf allen Flächen. Im Gegensatz dazu würde unter Annahme des trockenen A1B-Szenarios eine deutliche Verringerung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers und damit ein erhöhtes Risiko von Trockenstress eintreten. Die Grundwasserneubildung wäre an allen Standorten vollständig unterbunden. Die trockene Variante des B1-Szenarios nimmt eine Mittelstellung ein.

Die Berücksichtigung unterschiedlicher waldbaulicher Varianten zeigt, dass waldbauliche Eingriffe oft größere Auswirkungen auf den Standortwasserhaushalt haben als die bis zum Jahr 2050 erwarteten Klimaänderungen. Auch die baumarten- und altersspezifischen Unterschiede erwiesen sich hier im Vergleich als nicht so groß. Daraus leitet sich bei ausreichend vitalen Beständen die Empfehlung angepasster Bestockungsdichten ab, die eine reduzierte Evapotranspiration bewirken, ohne jedoch die Ausbreitung von Grasdecken durch die Bestandesauflichtung zu begünstigen. Den noch erheblichen Unsicherheiten hinsichtlich der erwarteten Niederschlagsentwicklung sollte waldbaulich mit einer Risikoverteilung durch Baumartenmischung begegnet werden.

## 1 Einleitung und Zielstellung

Das Rhein-Main-Gebiet in Südhessen ist als eine Region mit hoher industrieller und landwirtschaftlicher Prägung bekannt. Bewaldete Flächen sind mit einem Anteil von 26 % gegenüber dem gesamthessischen Durchschnitt von 42 % vergleichsweise selten.

Funktional wird der südhessische Raum vor allem vom Ballungsgebiet Frankfurt/Main beansprucht. Für das Umland bedeutet das einerseits eine starke Zersiedlung, Flächenversiegelung, Technisierung und Zerschneidung der Landschaft, andererseits einen hohen Bedarf an Freizeit- und Erholungsräumen.

Von herausragender Bedeutung für das weiträumige Umland ist der hohe Wasserbedarf des Ballungsraumes Frankfurt. Gedeckt wird er hauptsächlich aus Grundwasser der Lockergesteinsaquifere im Rhein-Main-Gebiet, nur ein Teil wird über Fernleitungen aus umliegenden Mittelgebirgen bezogen. Das Wasser des Mains eignet sich nur bedingt für die Trinkwassergewinnung. Diese aus Sicht der Wasserversorgung ungünstigen Bedingungen werden noch durch die klimatischen Gegebenheiten verstärkt. Die Rhein-Main-Ebene gehört mit einer entsprechend niedrigen Grundwasserneubildungsrate zu den niederschlagsärmsten Gegenden Hessens. Dieses Problem begleitete den Großraum Frankfurt in seiner Entwicklung seit über 100 Jahren und führte zu weiträumigen Grundwasserabsenkungen. Diese Tendenz wurde zusätzlich durch Maßnahmen zur Flurbereinigung verstärkt. Zahlreiche Bach- und Flussläufe, auch der Rhein, wurden begradigt, Mäander abgeschnitten und Feuchtstandorte drainiert. Dadurch verloren viele Standorte vor allem im Süden des Rhein-Main-Gebietes (Hessisches Ried) den Grundwasseranschluss (HMULF, 1999).

Die Auswirkungen dieser Entwicklung sind vor allem in den bewaldeten Gebieten nicht zu übersehen. Verglichen mit anderen Waldgebieten Hessens sind im südlich des Ballungsraumes gelegenen Hessischen Ried die Wälder besonders stark geschädigt (HMULV, 2007). Das zeigt sich vor allem in Verlichtungen im Kronenraum. Besonders betroffen ist die zum natürlichen Waldbild gehörende Eiche, die mit 25 % Flächenanteil im Rhein-Main-Gebiet vergleichsweise häufig vorkommt. Insgesamt 50 % aller Eichen zeigten 2007 eine mittelstarke bis starke Schädigung oder waren abgestorben (s. Abbildung 1). Aber auch bei anderen Baumarten sind schon bei jungen Bäumen teilweise erhebliche Blattverluste festzustellen (HMULV, 2007). Zunehmender Trockenstress verursacht neben direkten Schäden auch eine erhöhte Anfälligkeit der Wälder gegenüber biotischen oder abiotischen Schadereignissen.

Angesichts der klimatischen Verhältnisse im Rhein-Main-Gebiet kann davon ausgegangen werden, dass die Wasserversorgung ein limitierender Standortfaktor und damit ursächlich für den überdurchschnittlich schlechten Vitalitätszustand der Wälder ist. Die prognostizierten Klimaveränderungen lassen einerseits aufgrund erhöhter Temperaturen und verlängerter Vegetationsperioden einen erhöhten Wasserbedarf der Wälder, andererseits durch verringerte Sommerniederschläge ein geringeres Wasserdargebot erwarten. Damit muss von einer erhöhten Trockenstressdisposition für die Wälder ausgegangen werden.

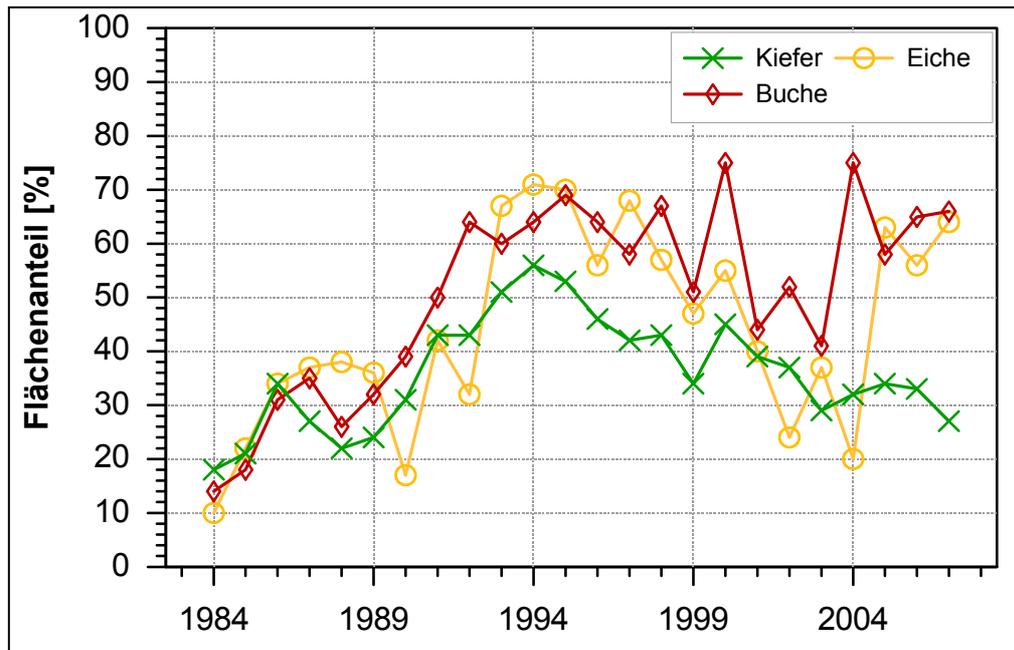


Abbildung 1: Flächenanteil mit stark absterbefährdeten bis abgestorbenen (Schadstufe 2+) Bäumen über 60 Jahre im Zeitraum 1984 – 2007 im Rhein-Main-Gebiet

Für eine vorausschauende forstliche Planung ist es unumgänglich, diese Risiken zu berücksichtigen. Dabei erschwert die noch bestehende Unsicherheit bezüglich der klimatischen Veränderungen die Planung der Waldbewirtschaftung erheblich. Neben der Wasserversorgung der Waldbestände ist die zukünftige Entwicklung der Grundwasserneubildungsrate von großem Interesse. In der im Jahr 2000 in Kraft getretenen EU-Wasserrahmenrichtlinie bezieht sich das Verschlechterungsverbot auch auf die Qualität und Quantität des Grundwassers. Das bedeutet für die Einzugsgebietsbewirtschaftung, dass die Maximierung der Sickerwasserraten prioritär behandelt werden muss.

Diese Problemfelder wurden als Schwerpunkte im Projekt „Wald in der Rhein-Main-Ebene – Risiken und Anpassungsmaßnahmen für die Forstwirtschaft als Folge der prognostizierten Klimaveränderung in Hessen“ aufgenommen.

Im Projekt werden drei zentrale Fragestellungen behandelt:

- 1) Retrospektive Abschätzung der Entwicklung der Wasserhaushaltskomponenten für ausgewählte Waldökosysteme anhand von drei Intensiv-Monitoringflächen (Baumarten: Kiefer, Eiche, Buche) im Hessischen Ried. Hauptaugenmerk liegt auf dem pflanzenverfügbaren Bodenwasser sowie der Grundwasserneubildung.
- 2) Abschätzung der Entwicklung der Wasserhaushaltskomponenten für die Untersuchungsbestände für den Zeitraum 2041 bis 2050 unter Verwendung der dekadischen Klimaprojektionen (Szenarien A1B und B1) und unter Berücksichtigung der Bestandesentwicklung und -behandlung.
- 3) Risikoanalyse für die untersuchten Bestände (Buche, Eiche, Kiefer) unter Berücksichtigung waldbaulicher Eingriffe nach den „Richtlinien zur Bewirtschaftung des Hessischen Staatswaldes“ (RIBES).

## 2 Untersuchungsflächen

Als Bezugsflächen für die Wasserhaushaltssimulation dienten drei Intensiv-Monitoringflächen, die im Rahmen der Waldökosystemstudie Hessen (WÖSSH) im Jahr 1998 eingerichtet wurden (EICHORN, 1992). Die Beobachtungsflächen befinden sich im Hessischen Ried, einem Teil des nordöstlichen Abschnitts der Oberrheinebene, nordwestlich von Bensheim auf ca. 90 m ü. NN. Die drei Untersuchungsflächen liegen räumlich dicht beieinander und unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Standortseigenschaften nur wenig.

Das Hessische Ried ist durch sehr geringe Reliefunterschiede und einem natürlicherweise geringen Grundwasserflurabstand gekennzeichnet. Bedingt durch großflächige Grundwasserabsenkungen entwickelten sich ursprünglich hydromorph beeinflusste Bereiche aufgrund des tiefgründig sandigen Substrates zu relativ trockenen Standorten. Auf vielen Flächen treten in unterschiedlichen Tiefen tonige Stauschichten auf (s. Tabelle 1), die zur Vergleyung führten. Örtlich neigen die Böden aufgrund der Quell- und Schrumpfeigenschaften der Tonminerale zur Ausbildung von Schrumpfrissen in Trockenperioden, die beim nächsten Niederschlagsereignis als Fließwege für eine schnelle Bodenpassage des Sickerwassers sorgen. Infolge dieser Bodeneigenschaften kann sich der Grundwasserstand in gewissem Rahmen relativ rasch ändern.

Der geologische Untergrund im Raum des Jägersburger Waldes, in dem sich die drei Intensivmessflächen befinden, besteht aus jungpleistozänen bzw. holozänen Hochflutlehmen des Neckars, über die sich bereits im letzten Glazial, überwiegend aber im Postglazial, äolische Sedimente lagerten. Das Tiefensediment zeichnet sich durch einen hohen Kalkgehalt aus, der den Nährstoff- und Wasserhaushalt der Standorte maßgeblich bestimmt (STREITZ, 1967). Das bodenbildende Ausgangssubstrat aller drei Intensivmessflächen wurde in der Standortkartierung als Windsediment aus karbonatfreien Sanden über karbonathaltigen Lehmen, Schluffen und Schlufflehm über karbonathaltigen Sanden angesprochen (s. Tabelle 1). Als Bodentyp entwickelten sich sehr tiefgründige Braunerde-Gleye aus pleistozänen und z. T. holozänen Ablagerungen. Teilweise sind in Tiefen von ca. 2 m nicht durchwurzelbare und schwer wasserdurchlässige Rheinweißschichten zu finden.

Standortkundlich befinden sich die Untersuchungsflächen im Wuchsbezirk Hessische Rheinebene des Wuchsgebiets Hessische Rhein-Main-Ebene. Als potenzielle natürliche Vegetation wird ein Tieflagen-Flattergras-Buchenwald ausgewiesen.

Mit Niederschlägen von im 30-jährigen Mittel (1961-90) 660 mm, davon 375 mm in der Vegetationsperiode und 285 mm im Winterhalbjahr, und einer Jahresmitteltemperatur von 9,5°C gehört das Hessische Ried zu den trockensten und wärmsten Regionen Hessens (vgl. HMULF, 1999).

Der wichtigste Unterschied zwischen den Flächen ist ihre Bestockung. Unterschieden werden eine Kiefern-, eine Buchen- und eine Eichenfläche, wobei letztere mit Buche unterbaut wurde. Auf allen Flächen, besonders aber bei der Kiefer, gibt es nach Auflockerung des Kronendaches die Tendenz zur Vergrasung.

**Tabelle 1: Bodenprofilbeschreibung der drei Intensivmessflächen. Informationen aus dem Waldboden-Informationssystem der Hessischen Forsteinrichtungsanstalt, Abteilung Waldökologie. Aufnahme datum: 22.10.1999. Ableitung der nutzbaren Feldkapazität (nFK) für die Humusaufgabe nach LEUSCHNER (1997) und für Mineralböden nach TEEPE et al. (2003)**

Fläche	Horizont	Tiefe [in cm, von... bis...]	Mächtigkeit [in cm, gerundet]	Boden- art	Kalk	Lagerungs- dichte	nFK [%]	nFK [mm]
Eiche	L, Of, Oh	+15-0	15	MOM	kein		34	51
	Ah	0-6	5	Su2	kein	2	21	11
	Bv	6-22	20	Su2	kein	3	20	40
	rGoBv	22-45	20	SI2	kein	3	20	40
	SrGo	45-75	30	SI2	kein	3	20	60
	II SdrGo	75-110	35	St3	kein	5	14	49
	rGco	110-120	10	St3	reich	5	14	14
	III rGo	120-135	15	Ss	arm	4	16	24
rGoGr	135-140	5	Ss	kein	4	16	8	
Buche	L, Of, Oh	+15-0	15	MO	kein		32	48
	A(e)h	0-10	10	Su2	kein	2	21	21
	SwBv	10-30	20	SI2	kein	2	21	42
	SwBv	30-50	20	SI2	kein	3	20	40
	II SdrGo	50-80	30	TI	Splitter	5	21	63
	III Gco	80-100	20	SI2	reich	4	16	32
	Go	100-140	40	Ss	kein	4	16	64
Kiefer	L, Of, Oh	+20-0	20	MO	kein		14	28
	RAi	0-20	20	SI2	kein	2	27	54
	fAh	20-50	30	SI2	kein	2	27	81
	Bv	50-70	20	SI2	kein	3	21	42
	II rGo	70-140	70	St3	kein	5	18	126

### 3 Wasserhaushaltsmodellierung

#### 3.1 Modellbeschreibung

Für die Modellierung des Wasserhaushaltes wurde das physikalisch basierte Modell WaSiM-ETH verwendet (SCHULLA 1997). Für die Wasserhaushaltsmodellierung der drei Standorte im Hessischen Ried bietet es folgende Vorteile:

- Der Datenbedarf für die standortsbezogene Parametrisierung des Modells kann mit den über das WÖSSH-Projekt erhobenen Daten weitgehend abgedeckt werden.
- Für den meteorologischen Antrieb stehen bei Auswahl mehrerer Stationen verschiedene mathematische Ansätze für die notwendige räumliche Interpolation zur Verfügung. Damit wird das Problem von Datenlücken in Zeitreihen modellintern gelöst.
- Die Niederschlagsdaten können optional einer windabhängigen Korrektur unterzogen werden.
- Zur Simulation der Bodenwasserflüsse wird der Richards-Ansatz verwendet, der eine detaillierte Beschreibung des Bodenprofilbaus zulässt.
- Die mehrfache erfolgreiche Anwendung des Modells lässt Vergleiche mit anderen Flächen zu (Standortsvergleich, Baumartenvergleich).

Hauptgrößen der Modellierung sind die Verdunstung, die nach Transpiration, Interzeption und Evaporation differenziert wird, und der Abfluss. Die Ermittlung der Verdunstung

erfolgt nach dem Ansatz von Penman-Monteith (MONTEITH 1965). Die Bodenwasserflüsse werden unter Verwendung der Richards-Gleichung berechnet, wobei die Größen Infiltration, Oberflächenabfluss, Interflow und Grundwasserabfluss separat ausgegeben werden (Abbildung 2).

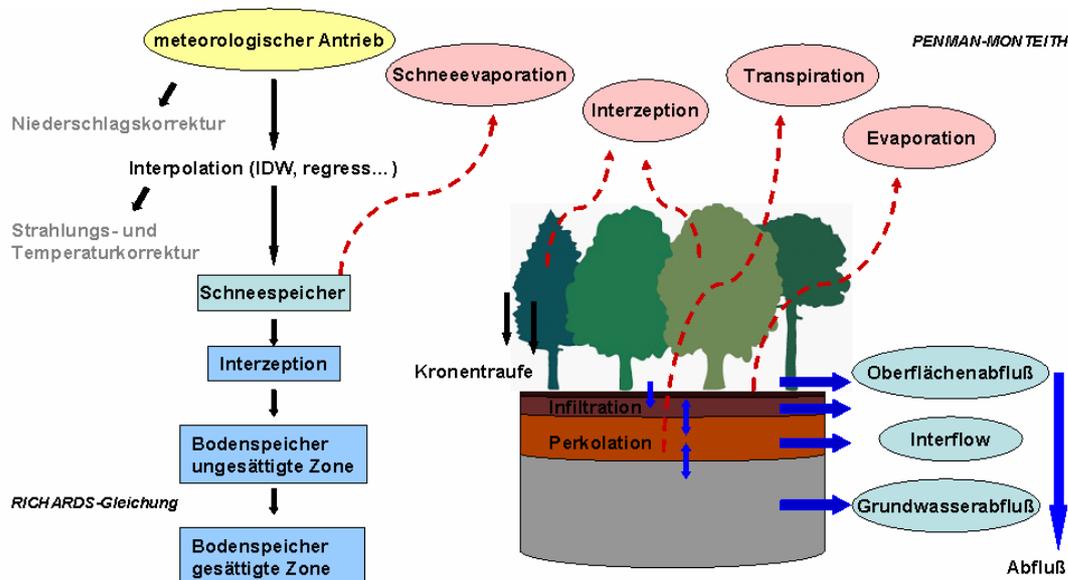


Abbildung 2: Modellschema WaSiM-ETH (verändert nach SCHULLA 1997)

Anhand der Ergebnisparameter können Änderungen der Wasserhaushaltskenngrößen (Interzeption, Evapotranspiration, Infiltration, Gesamtabfluss) in Vergangenheit und Zukunft abgeschätzt werden. Im konkreten Beispiel kann auf die Entwicklung der Wasserbilanz bei sich änderndem Klima und den Einfluss verschiedener Baumarten und forstlicher Behandlung auf die Grundwasserneubildungsrate geschlossen werden.

Der Datenbedarf wurde ausschließlich aus vorhandenen Datensätzen der NW-FVA und weiterer Quellen gedeckt. Neue Daten wurden im Rahmen des Projektes nicht erhoben.

### 3.2 Meteorologischer Antrieb

Die als Antrieb für das Wasserhaushaltsmodell benötigten meteorologischen Daten stammen für die retrospektive Betrachtung von nahe gelegenen Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Für den Zeitraum 1961 – 2007 konnte auf Klimadaten der DWD-Stationen Biblis, Bensheim, Pfungstadt, Riedstadt, Stockstadt und Lampertheim zurückgegriffen werden. Als Kalibrierzeitraum wurde 1998 – 2006 gewählt (s. Kap. 3.5).

Zur Berechnung möglicher Klimaentwicklungen werden globale Klimamodelle eingesetzt. Ihre maximale räumliche Auflösung beträgt 200 x 200 Kilometer. Für viele Fragestellungen ist diese räumliche Auflösung unzureichend, so dass für bestimmte Gebiete Regionalmodelle entwickelt wurden. Das statistische Modell WETTREG (SPEKAT et al.

2007) liefert regionale Klimaprojektionen für Deutschland. Es nutzt die Ergebnisse, die mit dem Globalmodell ECHAM5/MPI-OM des Hamburger Max-Planck-Institut für Meteorologie erzeugt wurden (ROECKNER et al., 2003, ROECKNER et al., 2004). Über statistische Beziehungen werden für Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) Zeitreihen berechnet. Die mit WETTREG generierten Zeitreihen für die genannten DWD-Stationen liegen für den Zeitraum von 1960 bis 2100 in verschiedenen Varianten der Szenarien B1, A1B und A2 vor. Die Übertragung der meteorologischen Daten von den DWD-Stationen auf die Untersuchungsflächen erfolgte mit einem Inverse-Distance-Weighting-Verfahren (IDW). Damit das Modell WASIM ETH für Szenariozwecke eingesetzt werden kann, wurde es für den Zeitraum von 1961 bis 1990 anhand von gemessenen Beobachtungsdaten validiert.

Als Basis für die Wasserhaushaltssimulation wurden die Szenarien B1 und A1B angewandt. Das A2-Szenario konnte nicht berücksichtigt werden, da die regionalisierten Daten für die ausgewählte Station nicht zur Verfügung standen. Wie aus Abbildung 3 hervorgeht, kann im Zeitfenster 2005 – 2050 das A2- durch das A1B-Szenario ersetzt werden, da beide weitgehend den gleichen Verlauf zeigen. Die Unsicherheiten vor allem bezüglich der Niederschlagsentwicklung werden jeweils durch die Berücksichtigung einer trockenen und einer feuchten Variante abgedeckt (SPEKAT et al. 2007).

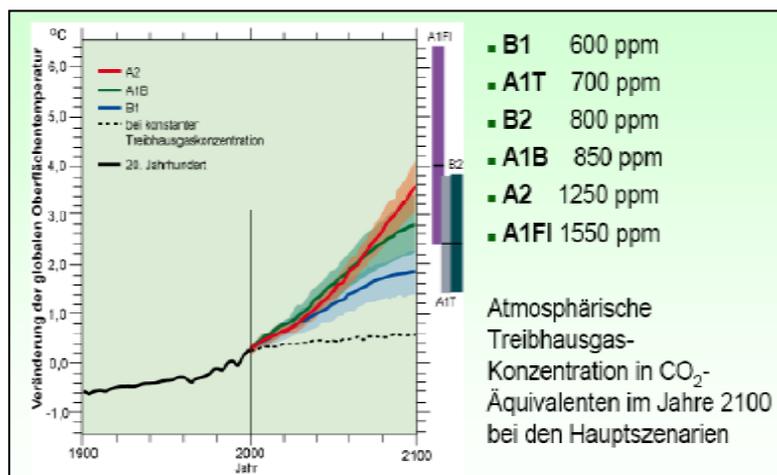


Abbildung 3:

Atmosphärische Treibhausgaskonzentration in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten im Jahre 2100 bei den Hauptszenarien (Quelle: IPCC 2007)

### 3.3 Parametrisierung der Bodeneigenschaften

Für die Ableitung der nutzbaren Feldkapazität (nFK) wurde der Ansatz von TEEPE et al. (2003) verwendet. Dieser auf Pedotransferfunktionen basierende Ansatz wurde explizit für Waldböden entwickelt. Nach TEEPE et al. (2003) wird in den vorwiegend anhand landwirtschaftlicher Böden entwickelten Pedotransferfunktionen nach AG BODEN (2005) die nFK von Waldböden in der Regel unterschätzt. So beträgt die nutzbare Feldkapazität für den Wurzelraum bis 1,4 m Tiefe nach TEEPE et al. (2003) auf der Eichenfläche 297 mm, auf der Buchenfläche 320 mm und der Kiefernfläche 330 mm. In Anlehnung an AG Boden (2005) ergeben sich deutlich niedrigere Werte von 253 mm (Eiche), 240 mm (Buche) und 242 mm (Kiefer). Alle Angaben umfassen neben dem Mineralboden auch

den Humus. Die Humusaufgabe hat auf allen drei Flächen mit bis zu 20 cm eine bedeutende Mächtigkeit und spielt demnach sowohl für den Wasser- als auch den Nährstoffhaushalt dieser Standorte eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Zur Ableitung der nFK der Humushorizonte wurde der Ansatz von LEUSCHNER (1997) herangezogen. Die Durchwurzelungstiefe wurde auf allen drei Standorten in Anlehnung an die Bodenprofilansprache auf 1,4 m festgelegt.

### 3.4 Bestandesparametrisierung

Das Ziel bestand in der detaillierten Charakterisierung der zeitlichen Entwicklung der Untersuchungsbestände, um Effekte der Waldentwicklung von klimatischen Einflüssen zu trennen. Für alle drei Intensiv-Monitoringflächen wurden wachstumskundliche Kenndaten wie Alter, Stammzahlen, Bestandeshöhe etc. im Zeitraum 1974 bis 2000 etwa alle 5 Jahre erhoben. Als Besonderheit muss hervorgehoben werden, dass die Kiefernfläche erst zu Beginn der 60er Jahre begründet wurde (s. Tabelle 2).

**Tabelle 2: Bestandeskenndaten (Aufnahme 1998) der drei Intensivmessflächen im Hessischen Ried.**

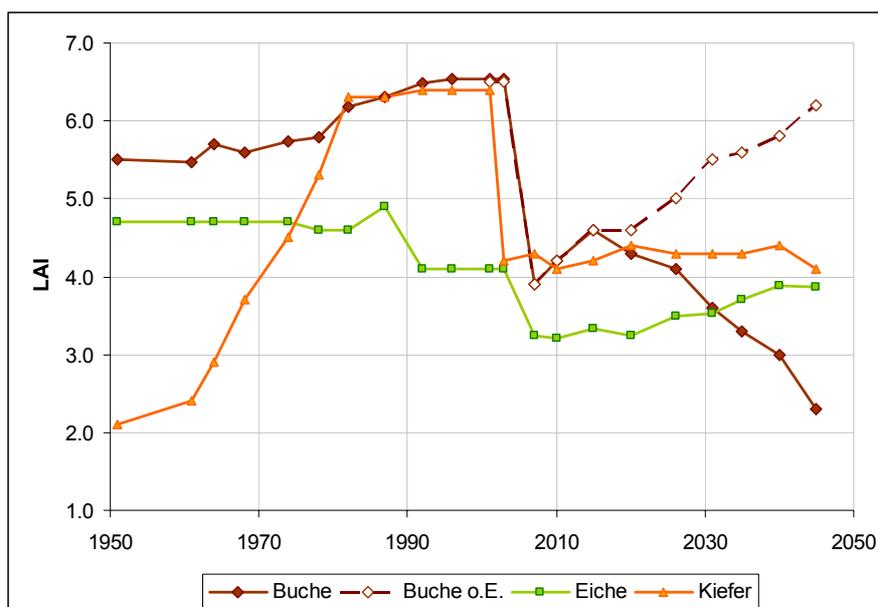
	Buche	Kiefer	Eiche
Bestandesgründung	1903	1964	1906
mittlere Bestandeshöhe [m]	27	20	27
Brusthöhendurchmesser [cm]	32	18	31
Bestockungsgrad	1,01	1,35	0,83
Grundfläche [m <sup>2</sup> /ha]	32,31	40,61	24,87

Für die zukünftige Waldentwicklung bis zum Jahr 2050 und auch für die Rekonstruktion des Zeitraumes 1960 – 1974 wurden waldwachstumskundliche Daten über das Simulationsmodell WaldPlaner berechnet. Eine genaue Beschreibung des Modellaufbaues kann ALBERT & HANSEN (2007) entnommen werden.

Aufbauend auf dem Brusthöhendurchmesser (BHD) und der Bestandesdichte werden mit Hilfe des WaldPlaners baumartenspezifisch die langfristige Veränderung des Blattflächenindex (LAI) und der Bedeckungsgrad abgeleitet und für die Wasserhaushaltssimulation bereitgestellt. Dabei werden nicht nur das Baumwachstum, sondern auch waldbauliche Eingriffe, deren Art, Stärke und Zeitpunkt frei definierbar sind, berücksichtigt. Für das vorliegende Projekt wurden Maßnahmen gemäß dem niedersächsischen LÖWE-Programm zugrunde gelegt ([www.landesforsten.de](http://www.landesforsten.de)). Das hessische RIBES-Programm ist derzeit noch nicht im Waldplaner implementiert und konnte daher nicht berücksichtigt werden. Die grundlegende forstliche Behandlung der untersuchten Baumarten ist nach RIBES und LÖWE jedoch weitgehend ähnlich.

Für die laubabwerfenden Baumarten Buche und Eiche wurden Beginn und Ende der Vegetationszeit über ein Temperatursummenmodell berechnet (MENZEL 1997) und für die Perioden zwischen zwei waldbaulichen Eingriffen gemittelt. Im gesamten Durchschnitt lag die Vegetationszeit etwa zwischen dem 11. April und dem 05. Oktober. Für die Zeit der Vegetationsruhe wurde als Interzeptionsfläche der Stammflächenindex (SAI) mit

50 % des maximalen LAI angenommen (vgl. ELEND, 2000). Der LAI der Kiefer wurde nach HAMMEL & KENNEL (2001) für das Winterhalbjahr mit 90 % des maximalen LAI im Sommer angenommen. Für den Zeitraum 1970 – 1990 konnte überwiegend auf waldwachstumskundliche Erhebungen zurückgegriffen werden. Die fehlenden Zeiträume wurde mit Hilfe des WaldPlaners simuliert. Für die Buchenfläche ergibt sich nach dem Behandlungsmodell, dass der Bestand etwa 2040 allmählich aufgelichtet und bis zum Ende der Dekade der Endnutzung zugeführt wird. Damit werden die Vergleichsmöglichkeiten zwischen den Flächen erschwert. Aus diesem Grund wurden für die Buche zwei Varianten der Bestandesentwicklung gerechnet, die einmal die Endnutzung und einmal den Bestand ohne Eingriff (im Folgenden Buche o.E.) beschreiben. In Abbildung 4 ist die zeitliche Entwicklung des LAI für alle drei Bestände dargestellt. Zu Beginn des Simulationszeitraumes 2005 – 2050 werden alle drei Bestände in der WaldPlaner-Simulation mehr oder weniger stark durchforstet, so dass der Blattflächenindex stark herabgesetzt wird. Nur die Buchenfläche, auf der ein Abgang nur durch natürliche Mortalität erfolgt (Buche o.E.), wird zum Ende der Simulation annähernd wieder das LAI-Niveau der letzten Bestandesaufnahme erreicht.



**Abbildung 4:**  
**Entwicklung des maximalen LAI auf den Untersuchungsflächen.**  
**Buche o.E. = ohne waldbaulichen Eingriff**

Bei allen Teilflächen wird unterstellt, dass die Krautschicht durch Gras dominiert ist. Ein sich verringernder Bedeckungsgrad in der Baumschicht wird im Modell mit Ausbreitung der Grasvegetation gekoppelt. Die Summe der Bedeckungsgrade ist dabei immer 95 %, d.h. es wird stets von einem Anteil unbedeckten Bodens von 5 % ausgegangen.

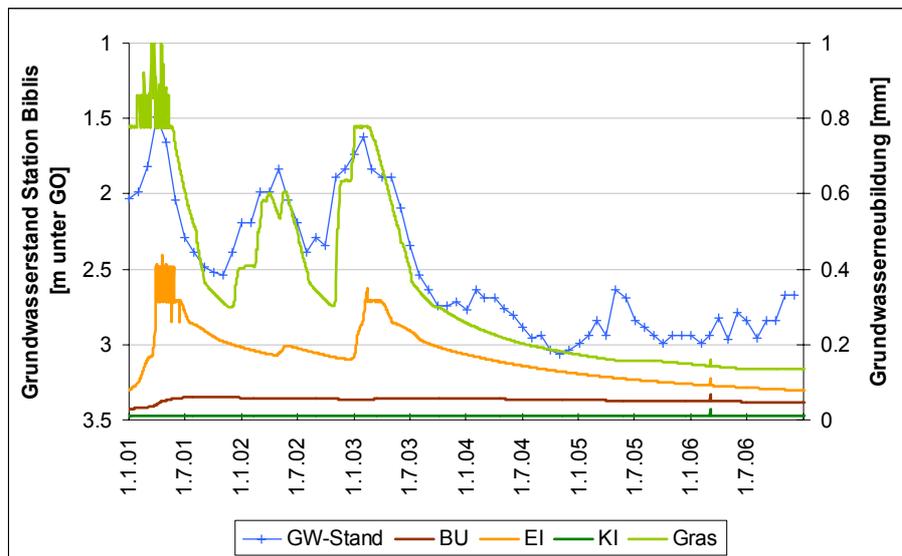
### 3.5 Modellkalibrierung und -validierung

Das forstliche Umweltmonitoring im Rahmen des WÖSSH-Programmes beinhaltet auch die Erfassung von Freiland- und Bestandesniederschlag der Untersuchungsflächen. Diese Daten wurden zur Kalibrierung des Wasserhaushaltes herangezogen, indem das Interzeptionsmodell anhand des gemessenen Bestandesniederschlags kalibriert wurde.

**Tabelle 3:** Vergleich gemessener mit simulierten Bestandesniederschlägen (BN) auf den Intensivmessflächen Buche, Eiche und Kiefer. Erhebungszeitraum: 01.01.1998 – 31.12.2006 (n = 186)

Monatsmittel	BN Buche [mm]		BN Eiche [mm]		BN Kiefer [mm]	
	gemessen	simuliert	gemessen	simuliert	gemessen	simuliert
Jan	44	41	43	41	41	42
Feb	38	39	37	39	35	39
Mrz	47	47	46	48	43	47
Apr	33	36	32	36	30	35
Mai	41	47	42	47	45	48
Jun	36	37	36	37	40	39
Jul	69	65	69	66	77	68
Aug	39	41	42	41	42	43
Sep	53	50	53	50	56	52
Okt	52	47	52	48	55	48
Nov	54	53	51	54	52	53
Dez	44	43	42	44	41	43
Σ Jahr	550	546	547	552	557	559

Die Feinkalibrierung erfolgte in erster Linie über den freien Parameter zur spezifischen Speicherkapazität. Durch diese Anpassung konnte eine hohe Ergebnisqualität erzielt werden. Für die Buchenfläche ergab die Regressionsanalyse der modellierten und gemessenen Bestandesniederschläge mit  $R^2 = 0,81$  eine hohe erklärte Varianz bei einem Stichprobenumfang von  $n=186$  (s. Tabelle 3). Bei der Eichenfläche konnten 80 % und bei der Kieferfläche 84 % der Varianz der Messwerte mit den Simulationsergebnissen erklärt werden. Der Standardfehler der Simulationsergebnisse liegt zwischen 2,3 mm (Kiefer) und 2,5 mm (Eiche).



**Abbildung 5:** Vergleich des Grundwasserstandes des Pegels 544267 (Biblis, Daten: HLUG) mit simulierten Grundwasserneubildungsraten der drei Teilflächen (Buche, Eiche, Kiefer) sowie einer Grasreferenzfläche

Daten zum Bodenwasserhaushalt konnten aufgrund fehlender bzw. zu weniger Messungen nicht als Kalibriergrößen herangezogen werden. Auf der Buchenfläche wurden im Dezember 2007 Profilsonden zur Messung des Bodenwassergehaltes und Tensiometer installiert. Mit Hilfe dieser Messergebnisse konnte die Plausibilität der simulierten Bodenwassergehalte der entsprechenden Tiefenstufen überprüft werden. Außerdem wur-

den die berechneten Grundwasserneubildungsraten mit Pegelständen benachbarter Grundwassermessstationen des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG) verglichen.

In Abbildung 5 ist der Pegelgang der in der Nähe der Versuchsflächen befindlichen Station Biblis mit den Grundwasserneubildungsraten der drei Versuchsflächen und einer Grasreferenzfläche im Zeitraum 2001 – 2006 verglichen. Vor allem unter Gras verlaufen die Grundwasserneubildung und die Grundwasserstände konform, bei den Waldstandorten werden die Niederschlagsereignisse vom Bestockungsgrad bzw. den Effekten waldbaulicher Eingriffe überlagert.

## 4 Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulation

### 4.1 Rekonstruktion des Zeitraumes 1961 – 1990

#### 4.1.1 Wasserbilanzen

Im ersten Schritt der Wasserhaushaltsmodellierung wurden für jede Intensivfläche die Wasserbilanzen für den Zeitraum 1961 – 1990 berechnet. Sie bilden den Bezug für die Interpretation der für die Klimaszenarien berechneten Wasserhaushaltsgrößen.

Der für das Untersuchungsgebiet ermittelte Niederschlag betrug im Mittel 659 mm, wobei 57 % während der Vegetationsperiode fielen.

Bereits die mittlere klimatische Wasserbilanz (KWB = Niederschlag – potenzieller Verdunstung bei Grasbedeckung) für diesen Zeitraum weist darauf hin, dass das Hessische Ried zu den trockensten Gebieten Hessens zählt. Mit einem mittleren Defizit von 4,3 mm liegt sie deutlich unter dem hessischen Durchschnitt von 238 mm Überschuss, und ebenfalls deutlich unter dem gesamtdeutschen Mittelwert von 191 mm Überschuss (ANDERS et al., 2004).

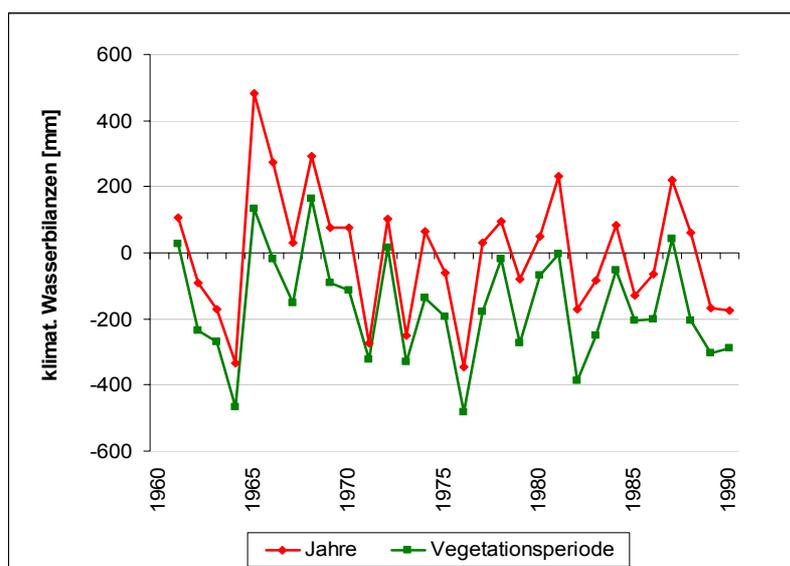


Abbildung 6:

Klimatische Wasserbilanz (Niederschlag – pot. Grasreferenzverdunstung) für das Gesamtjahr und die Vegetationsperioden 1961 – 1990

Schon zu Beginn der 1960er Jahre war die klimatische Wasserbilanz für mehrere aufeinander folgende Jahre negativ (s. Abbildung 6). Spätestens seit Mitte der 1970er Jahre bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes war die potentielle Verdunstung häufig höher als der Niederschlag. Dieser zeigte von 1961 – 1990 eine leicht abnehmende Tendenz (Abnahme um im Mittel 1 mm/a), während die Jahresdurchschnittstemperatur mit 0,02 K/a leicht anstieg.

Real verdunstet als Interzeption, Transpiration und Evaporation infolge der Abhängigkeit von der verfügbaren Wassermenge häufig deutlich weniger als potenziell möglich. Die Höhe der Verdunstungskomponenten wird maßgeblich durch den Blattflächenindex (abhängig von Baumart und -alter), Übershirmungsgrad, Bestandesrauhigkeit, aber auch der Bodenwasserverfügbarkeit beeinflusst. Für die drei Untersuchungsflächen zeigen sich bei einem Vergleich der Verdunstungsraten des Bezugszeitraumes 1961-1990 z. T. deutliche Unterschiede (s. Abbildung 7). Im langjährigen Mittel verdunstete auf den Flächen mit über 90 % (ca. 630 mm) der größte Teil des Niederschlages.

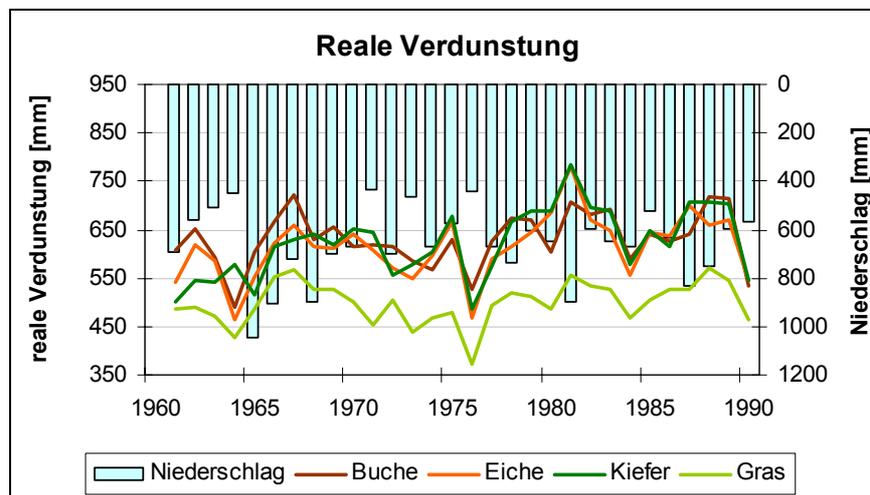


Abbildung 7:  
Vergleich der realen Verdunstung der Kiefern-, Eichen- und Buchenflächen sowie der Referenzfläche (Gras). Zusätzlich Angabe der jährlichen Niederschlagsmenge.

Der Einfluss der Wasserverfügbarkeit auf die Verdunstung wird bei der Betrachtung des Verhältnisses der realen zur potenziellen Verdunstung deutlich. Nur bei uneingeschränkter Wasserversorgung kann dieses Verhältnis bei 1,0 liegen. Im Betrachtungszeitraum wurden im Jahresmittel Werte von maximal 0,8 erreicht. Innerhalb der Vegetationsperioden deuten niedrige Quotienten von 0,74 (Kiefer) bis 0,77 (Buche) auf deutlichen Wassermangel. Im Trockenjahr 1976 betrug die reale Verdunstung der Eichenfläche nur 41 % der potenziell möglichen.

Deutlichere baumartenspezifische Unterschiede ergaben sich für die Interzeption. Als direkte Verdunstung von Niederschlagswasser von der Baumoberfläche (v. a. Blätter, aber auch Stamm, Zweige, Früchte) steht dieses Wasser den Bäumen nicht für den Stoffwechsel zur Verfügung. Für die Eiche lag der Anteil am Gesamtwasserhaushalt mit im Durchschnitt 20 % (125 mm) am höchsten, gefolgt von Buche mit 18 % (115 mm) und Kiefer mit 16 % (101 mm).

In Abbildung 8 ist zu erkennen, wie die Interzeptionsverdunstung im Laufe der Bestandesentwicklung der Kiefer anstieg, bis sie gegen Ende des Betrachtungszeitraumes den im Baumartenvergleich höchsten Wert erreichte.

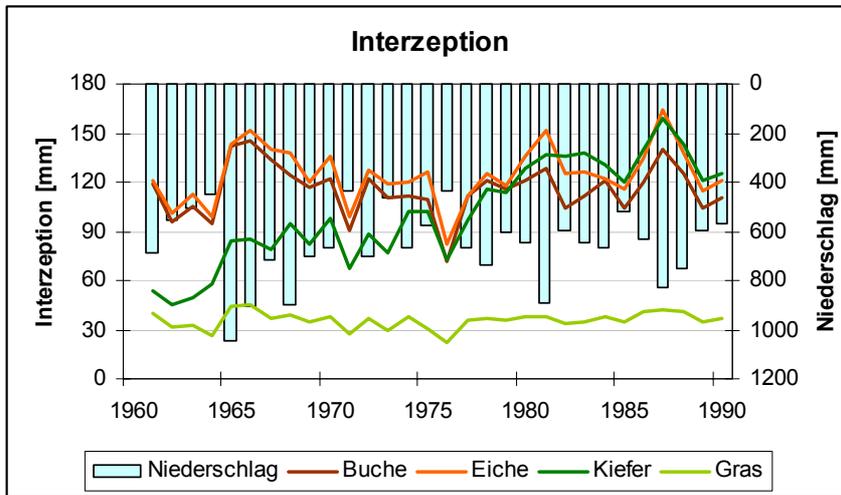


Abbildung 8:  
Vergleich der Interzeption der Kiefern-, Eichen- und Buchenflächen sowie der Referenzfläche (Gras). Zusätzlich Angabe der jährlichen Niederschlagsmenge.

Im Wasserhaushaltsmodell wird der Wasserfluss so simuliert, dass die gesamte nicht verdunstende Wassermenge als Sickerwasser zur Grundwasserneubildung beiträgt. Oberflächennahen, lateralen Abfluss gibt es aufgrund der fehlenden Reliefenergie nicht.

Für die drei Untersuchungsflächen erreichten im 30-jährigen Mittel mit maximal 60 mm (Kiefer) weniger als 10 % des Niederschlages das Grundwasser. Die höchste jährliche Grundwasserneubildung mit 215 mm fand Ende der 1960er Jahre infolge der noch geringen Verdunstung auf der neu begründeten Kiefernfläche statt. In Abbildung 9 fällt auf, dass niederschlagsreiche Jahre seit Beginn der 1970er Jahre keine erhöhte Grundwasserneubildung im Folgejahr nach sich zogen, wie es in den 1960er Jahren der Fall war.

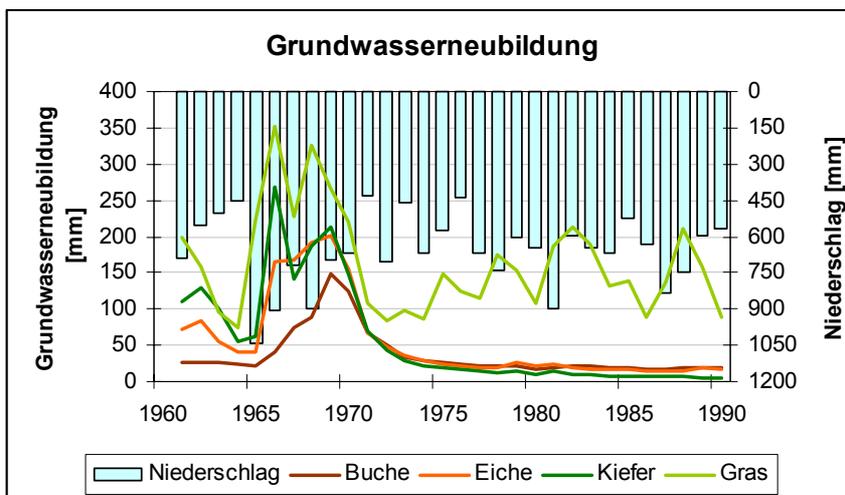


Abbildung 9:  
Vergleich der Grundwasserneubildungsraten unter Kiefer, Eiche und Buche sowie der Referenzfläche (Gras). Zusätzlich Angabe der jährlichen Niederschlagsmenge.

Innerhalb der Vegetationszeiten lag der Wasserverbrauch auf den Flächen fast durchweg über dem Input durch den Niederschlag (Abbildung 10). Dadurch ergibt sich außer in

besonders niederschlagsreichen Jahren wie 1965, 1968 oder 1987 für die Vegetationszeiten stets eine negative Wasserbilanz, die durch das pflanzenverfügbare Bodenwasser kompensiert wird. Das größte Defizit von -306 mm wurde für die Buchenfläche im Jahr 1982 ermittelt.

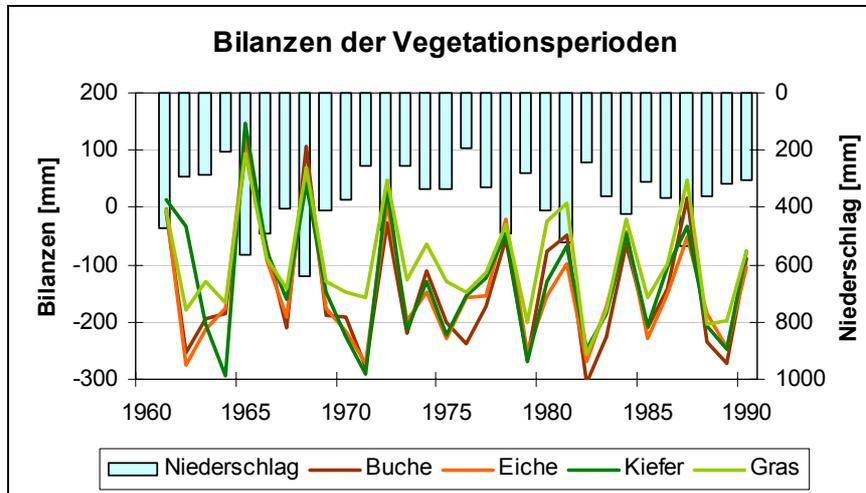


Abbildung 10:  
Vergleich der Wasserbilanzen der Kiefern-, Eichen- und Buchenfläche sowie der Referenzfläche (Gras) in den Vegetationsperioden. Zusätzlich Angabe der jährlichen Niederschlagsmenge.

#### 4.1.2 Bodenwasserverfügbarkeit

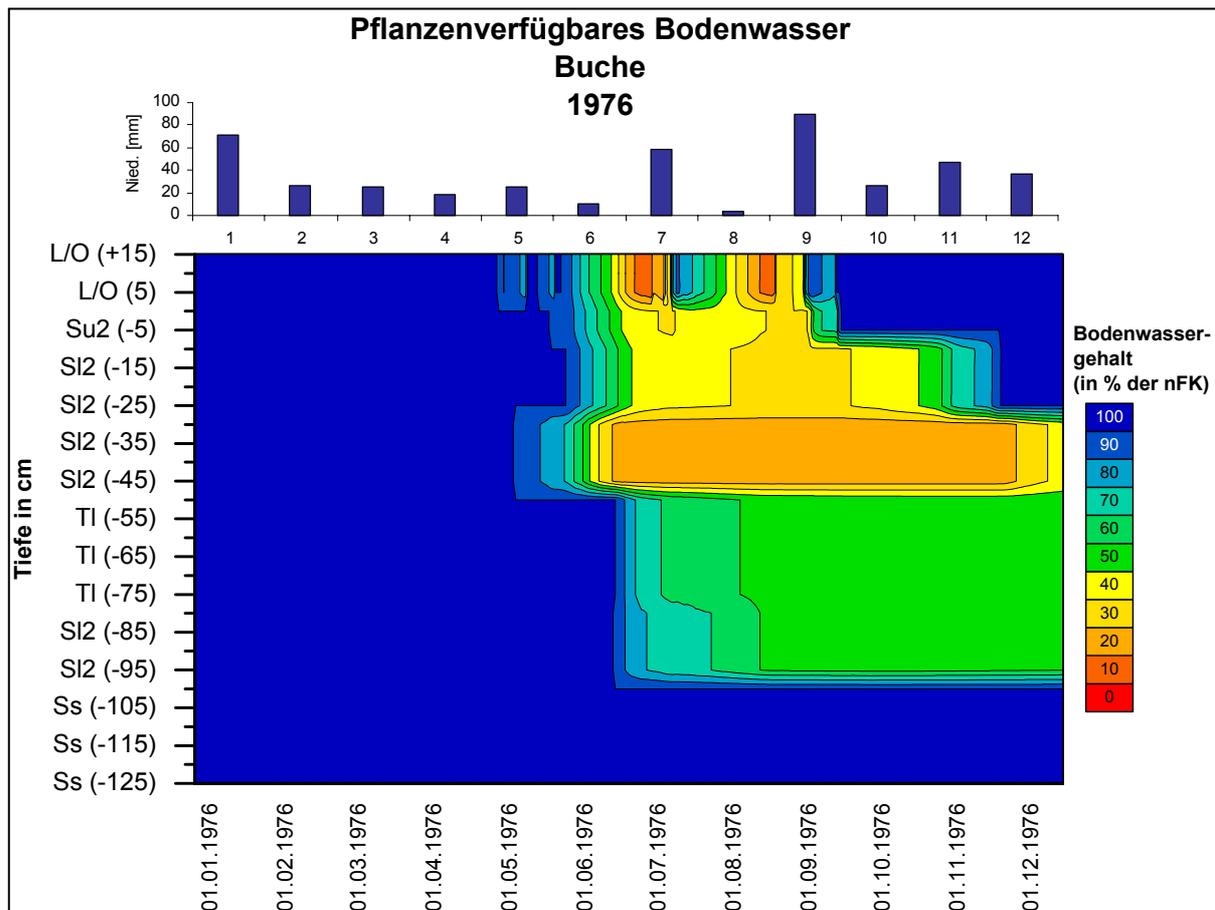
Negative Wasserbilanzen, d.h. ein höherer Verbrauch als durch Niederschlag ausgeglichen wird, sind stets mit der Verringerung des pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrates gekoppelt. Je höher dieser Vorrat ist, desto mehr Speicherwasser steht der Vegetation in Trockenperioden zur Verfügung. Bei den Untersuchungsflächen liegt der maximale Vorrat pflanzenverfügbaren Bodenwassers im durchwurzelten Raum zwischen 266 mm und 331 mm vergleichsweise hoch (s. Tabelle 1). Dieser Maximalwert ist aber nur nach einer vollständigen Auffüllung real verfügbar. Die Auffüllung eines großen Bodenwasserspeichers kann nur durch hohe Winterniederschläge erfolgen. Im Hessischen Ried liegen diese im Mittel bei 285 mm (s. Kap. 2). Demnach kann ein trockenes Winterhalbjahr die Trockenstressgefährdung in der folgenden Vegetationsperiode stark erhöhen, bei einem heißen, trockenen Folgesommer sind Trockenschäden unvermeidbar.

Relevant für die Beurteilung von Trockenstressgefährdung ist die tatsächliche Bodenfeuchte. Ist sie gering, ist das Bodenwasser zu stark an die Matrix gebunden und kann von der Vegetation nicht mehr aufgenommen werden. Da es je nach Standort und Baumart spezifische Grenzen für Trockenstress gibt, ist eine pauschale Bewertung des Gefährdungspotentials nicht möglich. Als Richtwert wird in der Literatur ein Bodenwassergehalt von 40 % der nFK angegeben, ab dessen Unterschreitung mit trockenstressbedingten Schäden für Waldbestände gerechnet werden muss (ANDERS et al., 2004).

**Tabelle 4:** Auftreten von Trockenperioden (Tp.) im Zeitraum 1961 – 1990 in den obersten 6 Tiefenstufen (vgl. Tabelle 1) der Untersuchungsflächen (Angabe als Jahreswerte).

MW 61-90	mittlere Anzahl der Tp./Jahr				max. Dauer der Tp./Jahr				mittlere Dauer der Tp./Jahr			
	Gras	Buche	Eiche	Kiefer	Gras	Buche	Eiche	Kiefer	Gras	Buche	Eiche	Kiefer
Humus	1	0	1	0	70	31	76	32	18	16	21	13
Tiefe 1	0	0	0	0	74	55	0	0	23	34		
Tiefe 2	0	0	1	0	0	68	197	0		59	104	
Tiefe 3	0	1	1	0	0	205	200	0		128	125	
Tiefe 4	0	0	1	0	0	0	323	0			161	
Tiefe 5	0	0	0	0	0	0	0	0				

Die Auswertung der Simulationsergebnisse der Bodenwassergehalte ergab für den Zeitraum 1961 – 1990 vor allem für die Buchen- und die Eichenfläche, dass Trockenperioden in den oberen Horizonten häufiger und kürzer sind als in den unteren (s. Tabelle 4). Die mit 323 Tagen längste Periode mit einem Wassergehalt unterhalb der 40 % nFK – Grenze wurde für die Eichenfläche in einer Tiefe von 45 – 75 cm (Horizont 5) im Jahr 1972 ermittelt. Unterhalb des Horizontes 5 wurde der Grenzwert im Betrachtungszeitraum auf keiner der Flächen erreicht. Auf der Kiefernfläche traten den Simulationsergebnissen zufolge nur im obersten Horizont Wassergehalte von weniger als 40 % nFK auf.



**Abbildung 11:** Pflanzenverfügbares Bodenwasser (in % der nFK) im Trockenjahr 1976 unter Buche. Zusätzlich Angabe der Monatsniederschläge.

Abbildung 11 veranschaulicht exemplarisch die zeitliche Entwicklung der nFK im Trockenjahr 1976 am Beispiel der Buchenfläche. Ab Ende Juni entstanden im Hauptwurzelraum infolge des Wasserentzuges durch die Vegetation Zonen besonders geringen Bodenwassergehaltes. Vor allem die obersten 15 cm (Humusaufgabe) trockneten durch den zusätzlichen Wasserentzug der Grasvegetation sowie durch die Evaporation relativ stark aus, ebenso die Tiefenstufe zwischen 35 cm und 55 cm, wo durch Verdichtung eine geringere absolute Feldkapazität vorliegt, die sich schneller erschöpft. Infolge der Niederschläge Ende des Jahres 1976 und zu Beginn des Jahres 1977 war das gesamte Profil im Frühjahr 1977 wieder durchfeuchtet.

## 4.2 Simulationsergebnisse unter Verwendung der Klimaszenarien

### 4.2.1 Wasserbilanzen

Der Wasserhaushalt der Dekade 2041 – 2050 wurde auf Grundlage von WETTREG-Projektionen der Szenarien A1B und B1 simuliert. Um die erheblichen Schwankungsbreiten der prognostizierten Niederschlagsentwicklung abzudecken, wurden die jeweils extremen Varianten trocken und feucht für die Modellierung verwendet (s. Kap. 3). Für die Region des Hessischen Rieds wird für die Szenarien gegenüber 1961 – 1990 eine Temperaturzunahme um 1,5 K bis 1,8 K im Jahresmittel und 1,1 K bis 1,9 K in den Vegetationsperioden erwartet. Die Jahressummen der Niederschläge verringern sich nur im Szenario A1B trocken, für alle anderen Szenarien sind Anstiege prognostiziert (s. Tabelle 5). Dabei erhöhen sich gemäß den Szenarien vor allem die Winterniederschläge, während die Sommerniederschläge etwas geringer ausfallen.

**Tabelle 5:** Vergleich der mittleren Temperatur, des Niederschlages und der Klimatischen Wasserbilanz der Szenarien A1B und B1 2041-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 – 1990.

	Temperatur		Niederschlag		Klimat. Wasserbilanz	
	Jahr	Veg. periode	Jahr	Veg. periode	Jahr	Veg. periode
1961 – 1990	10 °C	16 °C	659 mm	375 mm	-5 mm	-163 mm
A1B (trocken)	11,7 °C	17,9 °C	607 mm	322 mm	-188 mm	-321 mm
A1B (feucht)	11,8 °C	17,4 °C	728 mm	382 mm	-10 mm	-201 mm
B1 (trocken)	11,5 °C	17,1 °C	677 mm	353 mm	-44 mm	-227 mm
B1 (feucht)	11,6 °C	17,1 °C	763 mm	402 mm	50 mm	-160 mm

Der Vergleich der klimatischen Wasserbilanz der Szenarien mit der der Referenzperiode 1961 – 1990 zeigt, dass die potenziell mögliche Verdunstung in Zukunft bei allen Szenarien (am ausgeprägtesten bei der trockenen Variante des A1B-Szenarios) deutlich über dem prognostizierten Niederschlag liegt. Für die Vegetationsperiode variiert die KWB zwischen -160 mm (B1 feucht) und -321 mm (A1B trocken).

Die Veränderung der realen Verdunstung ist sowohl von der Klima- als auch von der Bestandesentwicklung abhängig. Anhand der simulierten Grasreferenzverdunstung ist zu

erkennen, dass die Verdunstungsrate bei allen Szenarien ansteigt, was auf die Temperaturzunahme zurückzuführen ist (s. Tabelle 5). Einen größeren Effekt haben jedoch waldbauliche Eingriffe. So unterscheiden sich die Verdunstungsraten für die beiden Waldbehandlungsvarianten der Buchenfläche stärker voneinander als die der Klimaprojektionen 2041-50 von der Referenzperiode, da die Auflichtung des Bestandes (Rückgang des LAI) einen dominanten Einfluss sowohl auf die Interzeption als auch auf die Transpiration ausübt.

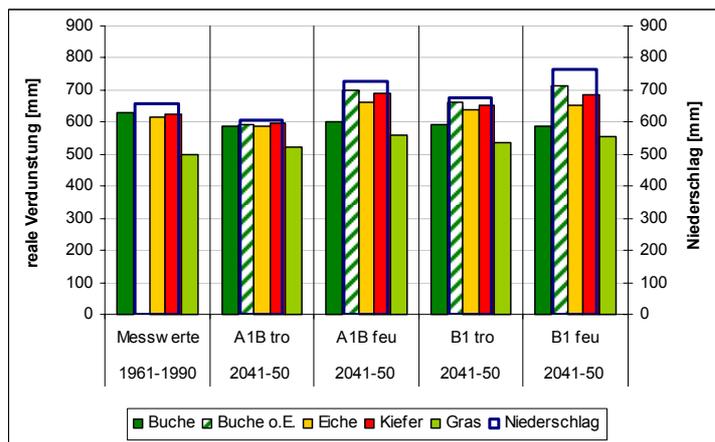


Abbildung 12:

Vergleich der realen Verdunstung Jahresmittel von 1961 – 1990 mit 2041 – 2050 der Szenarien A1B und B1 (trocken und feucht) unter Berücksichtigung zweier möglicher waldbaulicher Varianten (Buche: normale Nutzung und o.E = ohne Eingriff). Zusätzlich Angabe des Niederschlages.

Bei natürlicher Bestandesentwicklung ist die Verdunstung bei den feuchten Szenarien am höchsten. Im Baumartenvergleich zeigt die Kiefer von allen Flächen mit waldbaulichen Eingriffen im Mittel die höchsten Verdunstungsraten. Dabei können die Waldbestände aufgrund eingeschränkter Bodenwasserverfügbarkeit nur maximal 85 % (Buche, Kiefer) der potenziellen Verdunstung für das feuchte B1-Szenario und minimal 63 % (Buche ohne Eingriff) für das trockene A1B-Szenario ausschöpfen (Abbildung 12 und Abbildung 13).

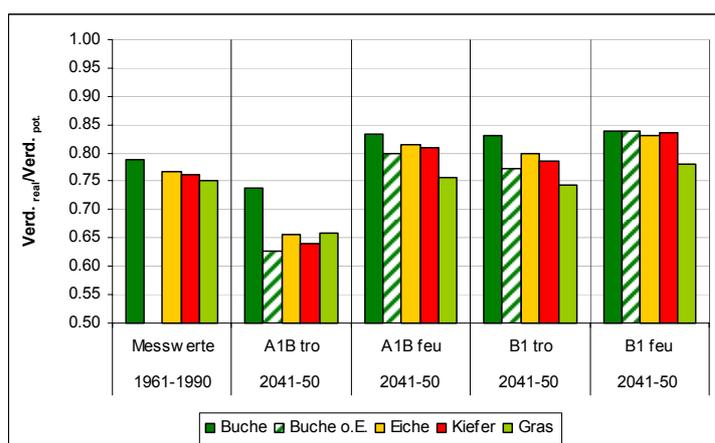


Abbildung 13:

Vergleich der Quotienten Verdunstung<sub>real</sub>/Verd.<sub>pot.</sub> (Jahresmittel) von 1961 – 1990 mit 2041 – 2050 der Szenarien A1B und B1 (trocken und feucht) unter Berücksichtigung zweier möglicher waldbaulicher Varianten (Buche: normale Nutzung und o.E = ohne Eingriff)

Zieht man den Quotienten zwischen realer und potenzieller Verdunstung als Trockenstressindikator heran, ergibt sich die stärkste Differenzierung beim Szenario A1B trocken. Auch hier spielt die Waldbehandlung eine große Rolle. So ermöglicht der Bodenwasser-

speicher für den aufgelichteten Bestand eine Ausschöpfung der potenziellen Verdunstung zu 74 %, während es für den Bestand ohne Eingriff nur 63 % sind.

Die Interzeption zeigt von den Verdunstungsgrößen am deutlichsten, welche Auswirkungen forstliche Maßnahmen auf den Wasserhaushalt haben (s. Abbildung 14).

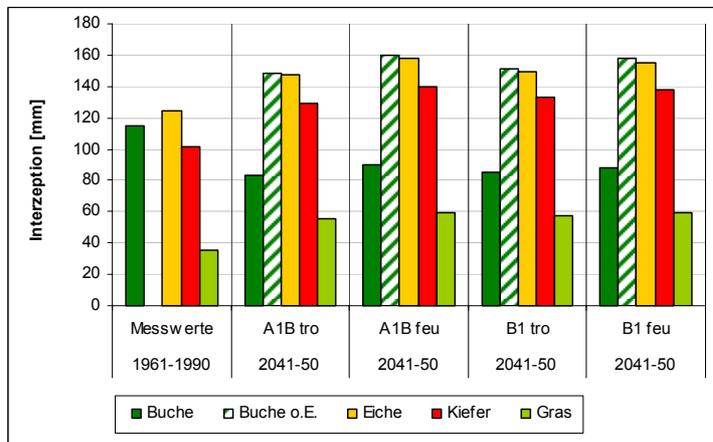


Abbildung 14

Vergleich der Interzeption (Jahresmittel) von 1961 – 1990 mit 2041 – 2050 der Szenarien A1B und B1 (trocken und feucht) unter Berücksichtigung zweier möglicher waldbaulicher Varianten (Buche: normale Nutzung und o.E = ohne Eingriff)

Einerseits ist bei einem Vergleich der Referenzperiode 1961 – 1990 für Buche ohne waldbaulichen Eingriff, Eiche und Kiefer ein deutlicher Anstieg der Interzeptionsraten zu erkennen, andererseits zeigt der Vergleich der beiden Nutzungsvarianten für die Buche, dass diese Entwicklung maßgeblich durch die Veränderung des Bestockungsgrades und damit der „Auffangfläche“ für Niederschlag hervorgerufen wird (vgl. auch Anlage I).

Ähnliches gilt für die Grundwasserneubildungsraten (Abbildung 15). Auch hier unterscheiden sich die Waldbehandlungsvarianten, wobei allerdings ähnlich große Differenzen zwischen den einzelnen Klimaprojektionen liegen. Bei der trockenen Variante des Szenarios A1B wurden für alle Flächen Grundwasserneubildungsraten nahe oder gleich Null berechnet, wogegen vor allem für die feuchten Varianten der Szenarien höhere Raten simuliert wurden als für den Referenzzeitraum 1961 – 1990.

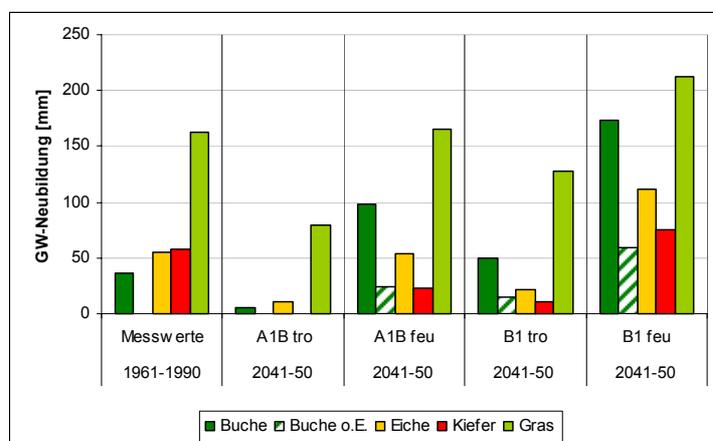


Abbildung 15

Vergleich der Grundwasserneubildung (Jahressummen) von 1961 – 1990 mit 2041 – 2050 der Szenarien A1B und B1 (trocken und feucht) unter Berücksichtigung zweier möglicher waldbaulicher Varianten (Buche: normale Nutzung und o.E = ohne Eingriff)

Das Defizit, das sich innerhalb der Vegetationsperiode durch die hohe Verdunstung bei geringem Niederschlag ergibt, entwickelt sich je nach Szenario unterschiedlich. Außer

bei A1B trocken, wo offenbar die Verdunstung durch Wassermangel zu stark eingeschränkt wird, erhöht sich das Wasserdefizit bei allen anderen Szenarien gegenüber dem Referenzzeitraum leicht. Bei ausreichender Wasserversorgung drückt sich der hohe Wasserverbrauch der Buche ohne waldbaulichen Eingriff in dem vergleichsweise höchsten Defizit aus (Abbildung 16).

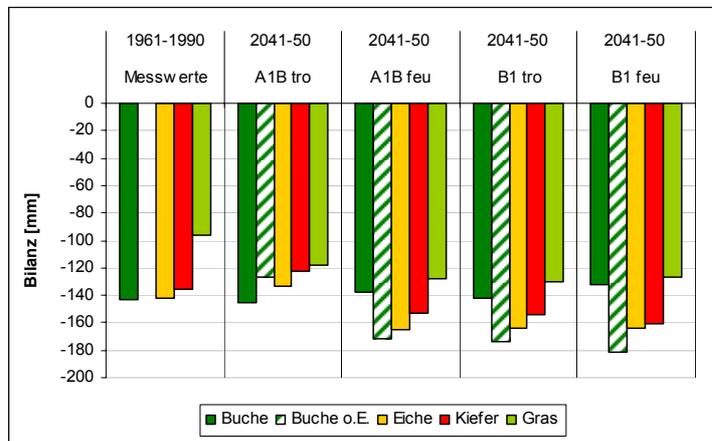


Abbildung 16:

Vergleich der Wasserbilanzen (Mittel der Vegetationsperioden) von 1961 – 1990 mit 2041 – 2050 der Szenarien A1B und B1 (trocken und feucht) unter Berücksichtigung zweier möglicher waldbaulicher Varianten (Buche: normale Nutzung und o.E. = ohne Eingriff)

#### 4.2.2 Bodenwasserverfügbarkeit

Die Bodenfeuchteverteilung für das trockene Szenario A1B zeigt, dass Trockenstressbedingungen in Zukunft zunehmen können. Unter den Klimabedingungen dieses Szenarios fällt der Bodenwassergehalt an deutlich mehr Tagen unter 40 % der nutzbaren Feldkapazität als im Referenzzeitraum 1961-1990. Betroffen sind vor allem die Humusaufgabe sowie die Bereiche oberhalb der Stauhazone. Besonders in diesen Bodenhorizonten verlängern sich die Trockenperioden, so dass oftmals auch gegen Ende des Winterhalbjahres keine Auffüllung bis zur Feldkapazität erreicht wird. Der Auflagehumus fällt häufiger trocken, kann aber durch verhältnismäßig geringe Niederschlagsereignisse kurzfristig wieder aufgefeuchtet werden (Tabelle 6).

Tabelle 6: Auftreten von Trockenperioden (Tp.) im Zeitraum 2041 – 2050 bei den Szenarien A1B trocken und B1 feucht in den obersten 6 Tiefenstufen der Buchenfläche mit und ohne waldbauliche Eingriffe

Tiefe [in cm]	mittlere jährliche Anzahl der Tp.				max. Dauer der jährl. Tp.				mittlere jährliche Dauer der Tp.			
	Buche		Buche o. E.		Buche		Buche o. E.		Buche		Buche o. E.	
	A1B tro	B1feu	A1B tro	B1feu	A1B tro	B1feu	A1B tro	B1feu	A1B tro	B1feu	A1B tro	B1feu
+15 - 0	2	1	3	1	24	10	67	29	10	5	17	18
0 - 10	0	0	1	0	0	0	82	38			33	38
10 - 30	0	0	1	0	0	0	130	0			102	
30 - 50	1	0	1	1	222	0	365	160	151		302	90
50 - 80	0	0	0	0	0	0	0	0				
80 - 100	0	0	0	0	0	0	0	0				

Beispielhaft für das trockenste Jahr innerhalb der Dekade 2041 – 50 (Szenario A1B trocken) veranschaulichen die folgenden Abbildung 17 und Abbildung 18 die Bodenfeuchteverteilung der Buchenfläche im Vergleich beider Waldentwicklungsvarianten. Hier zeigt sich ein weiteres Mal der starke Einfluss der forstlichen Waldbehandlung auf den Bodenwasserhaushalt. Bei ungestörter Bestandesentwicklung wird der Bodenwasserspeicher durch die Transpiration der Bäume deutlich stärker entleert und fällt dadurch zeitweise über den Großteil der durchwurzelten Zone unter 40 % der nFK. Als Folge entsteht für den Bestand ein durch die lange Dauer als kritisch zu bewertender Wasserstress. Unter Annahme des Szenarios A1B trocken dauern Trockenperioden in Bereichen der Hauptwurzelzone das gesamte Jahr an. Unter der genutzten Buchenfläche sind zwar ebenfalls deutliche Zeichen für Wasserdefizite erkennbar, die aber einen geringeren Anteil des Profils betreffen und kürzer andauern.

Der Vergleich mit den anderen Szenarien verdeutlicht die starke Gegensätzlichkeit der Entwicklung des Niederschlagsgeschehens mit den Auswirkungen auf das Bodenwasser. Beispielsweise fällt der Wassergehalt bei der feuchten Variante des Szenarios B1 nur im Auflagehumus tageweise unter die 40 %-Grenze, ansonsten ist das Profil auch für die Buchenfläche ohne waldbauliche Eingriffe immer ausreichend durchfeuchtet.

Weitere Abbildungen zur Bodenfeuchte der untersuchten Flächen sind für die verschiedenen Szenarien im Anhang in den Anlagen III bis XIV zu finden.

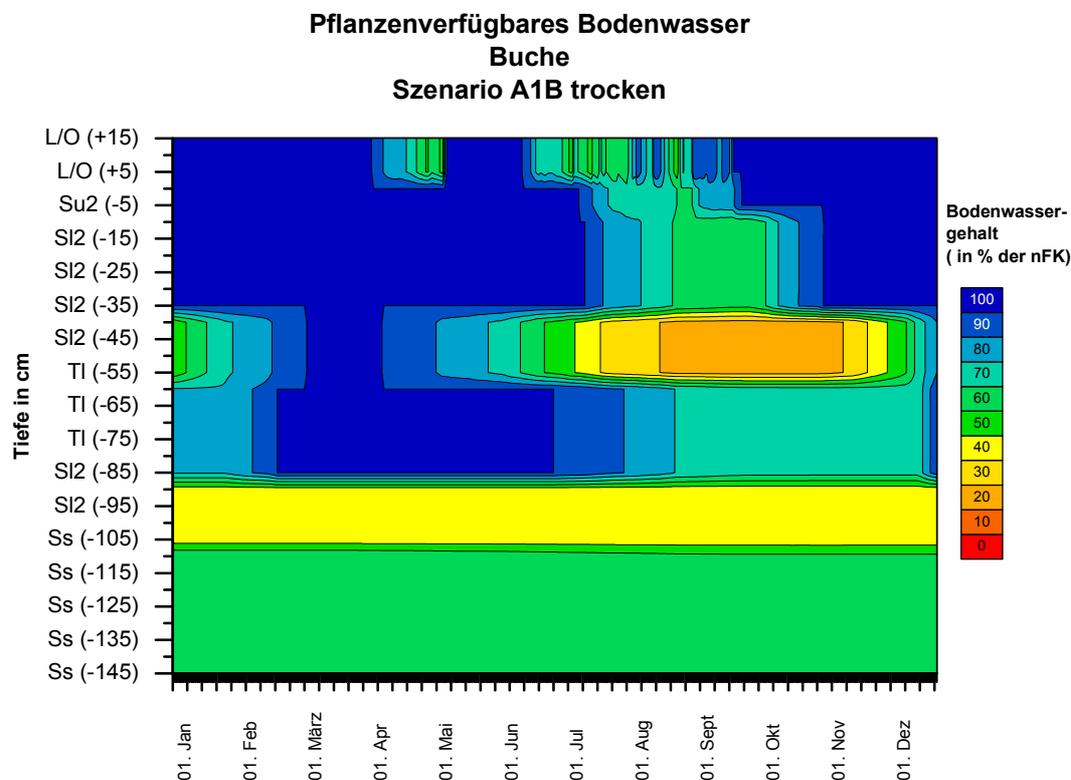


Abbildung 17: Pflanzenverfügbares Bodenwasser (in % der nFK) im trockensten Jahr der Dekade 2041 – 2050 unter Buche (mit waldbaulichen Eingriffen).

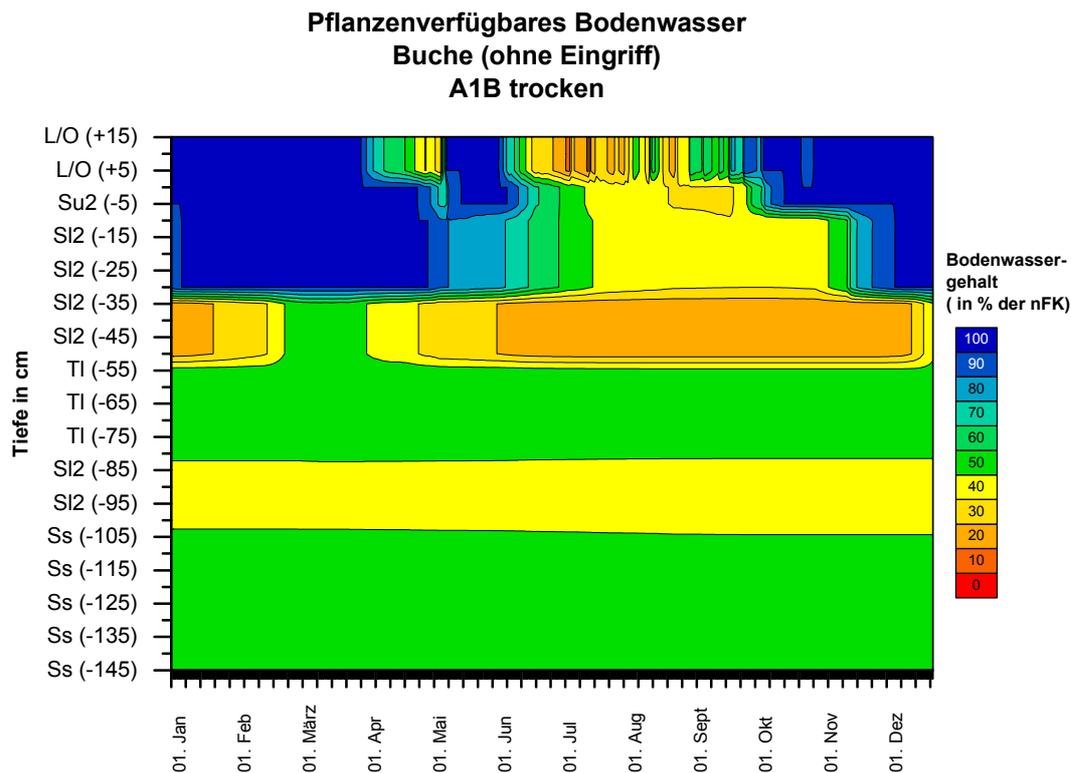


Abbildung 18: Pflanzenverfügbares Bodenwasser (in % der nFK) im trockensten Jahr der Dekade 2041 – 2050 unter Buche (ohne waldbauliche Eingriffe).

## 5 Diskussion und Fazit

Seit mehreren Jahrzehnten ist der Wald im Hessischen Ried stark geschädigt, ohne dass sich eine Tendenz zur Erholung abzeichnet. Das Ökosystem ist aufgrund der natürlichen klimatischen Voraussetzungen (trockenes, warmes Klima) und vielseitiger, intensiver Nutzung besonders empfindlich gegenüber Störungen. In den 1970er Jahren traten gehäuft Trockenjahre auf, die auf die durch großräumige Grundwasserabsenkungen bereits stark angespannte Wasserversorgung gravierende Auswirkungen zeigten und in den Folgejahren die Stabilität der Wälder massiv beeinträchtigten.

Neben dem primären Einfluss der Klimafaktoren ist der Wasserhaushalt von Waldflächen stark abhängig von der Bewirtschaftung. Neben baumartenspezifischen Parametern (z. B. LAI, Vegetationsruhe) beeinflusst vor allem das Bestandesalter über Transpiration und Interzeption den Wasserhaushalt, so dass in gewissem Grad über die Baumartenwahl und Umtriebszyklen bzw. Verjüngungsstrategien forstwirtschaftliche Steuerungsmöglichkeiten bestehen. Dazu muss aber zunächst ein interessenübergreifender Konsens über die Prioritäten in der Bewirtschaftung erzielt werden, da sich infolge der Funktionsvielfalt der Wälder vor allem im Hessischen Ried Nutzungskonkurrenzen entwickelten, die auf den ersten Blick konträre Maßnahmen fordern.

Untersucht wurde der Wasserhaushalt dreier ausgewählter Waldstandorte mit Kiefern-, Eichen- und Buchenbestockung, um Erkenntnisse über die Wasserversorgung der Flä-

chen sowohl retrospektiv seit 1961 als auch prognostisch unter Annahme der Klimaszenarien A1B und B1 (jeweils trockene und feuchte Varianten) für die Dekade 2041-2050 zu erhalten. Diese standortsbezogenen Ergebnisse stellen einen ersten Einblick in die Gesamtsituation dar, sind aber in keinem Fall ausreichend, um fundierte flächenbezogene Aussagen bzw. gesicherte Handlungsempfehlungen ableiten zu können. Diese Fragestellungen sind Schwerpunkt des Projektes „Waldentwicklungsszenarien für das Hessische Ried“, das, gefördert durch das Land Hessen, seit Anfang 2008 durch die NW-FVA, FENA Gießen und die Universität Göttingen bearbeitet wird.

An den drei ausgewählten Standorten war der Wasserhaushalt bereits in der Vergangenheit von teilweise lang anhaltenden Trockenperioden geprägt. Darauf weisen eingeschränkte Verdunstungs- und Grundwasserneubildungsraten hin. Es muss davon ausgegangen werden, dass sich die Anfälligkeit der Bestände gegenüber Schadinsekten infolge dieses wiederholten Trockenstresses stark erhöhte, was zu den ausgeprägten, in den Waldzustandsberichten dokumentierten Schädigungen führte (HMULV, 2007). Die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Baumarten (Laub-Nadelbaumvergleich), u. a. da hier die artenspezifischen Unterschiede von den altersspezifischen überlagert wurden.

Unter Annahme einer Klimaentwicklung gemäß der ECHAM5-Klimaszenarien A1B und B1 (jeweils trockene und feuchte Varianten) bis zum Jahr 2050 treten durch die bestehende Unsicherheit bezüglich des Niederschlages große Unterschiede in den simulierten Wasserbilanzen auf. Für die feuchte Variante des Szenarios B1 (und z. T. A1B) ergab die Modellierung für die Dekade 2041- 2050 eine deutliche Verkürzung von Trockenperioden und einen Anstieg der Grundwasserneubildungsraten auf allen Flächen. Im Gegensatz dazu würde eine Klimaveränderung im Sinne des trockenen A1B-Szenarios zu einer massiven Verringerung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers und damit der erhöhten Gefahr von Trockenstress führen. Massiver Trockenstress ist bei den Modellergebnissen an der Einschränkung der Verdunstung zu erkennen. Bei optimaler Wasserversorgung kann real über 90 % der potentiellen Verdunstung erreicht werden. Die Verdunstungsleistung der Bestände betrug im Referenzzeitraum 1961 – 1990 durchschnittlich 75 % der potentiell möglichen, was auf erhöhten Wassermangel schließen lässt. Bei Eintreten der feuchten Varianten der Klimaszenarien wäre mit einer Verbesserung der Wasserversorgungssituation zu rechnen, während vor allem das trockene A1B-Szenario zu einem weiteren Absinken der realen Verdunstung bei gleichzeitigem temperaturbedingtem Anstieg der potentiellen Verdunstung und damit erhöhtem Trockenstress führen würde.

Die Wasserversorgung der Standorte wirkt sich letztendlich direkt auf die Menge der Grundwasserneubildung aus. In den 1960er Jahren erreichten noch größere Mengen an Sickerwasser den Grundwasserleiter. Ausgelöst durch mehrere aufeinander folgende, relativ trockene Jahre sanken diese Werte bereits zu Beginn der 1970er Jahre gegen Null. Unter den Bedingungen des moderaten Klimaszenarios B1, feuchte Variante, wäre insgesamt mit einer Steigerung der Grundwasserneubildungsraten zu rechnen, während gemäß den Simulationsergebnissen bei Eintreten der trockenen Variante des A1B-Szenarios die Grundwasserneubildung an allen Standorten vollständig unterbunden wäre.

Bei den Simulationen für die Jahre 2041 bis 2050 wurde für die Buchenfläche einerseits eine normale forstliche Nutzung gemäß den Leitlinien nachhaltiger Forstwirtschaft, andererseits ein vollkommen ungenutzter Bestand (ohne waldbauliche Eingriffe) angenommen. Durch die Berücksichtigung dieser unterschiedlichen Nutzungsvarianten wurde deutlich, dass waldbauliche Eingriffe in vitalen Beständen oft größere Auswirkungen auf den Standortwasserhaushalt haben als die bis zum Jahr 2050 prognostizierten Klimaänderungen. Auch die baumarten- und altersspezifischen Unterschiede erwiesen sich hier im Vergleich als nicht so groß. Für die ungenutzte, dicht bestandene Buchenfläche lieferten die Ergebnisse vor allem für das trockene A1B-Szenario Anzeichen für häufigeren und stärker ausgeprägten Trockenstress.

Aktuell gilt es auf den untersuchten Flächen, die existierenden Waldbestände zu erhalten und zu stabilisieren. Unter Berücksichtigung der zu erwartenden Klimaveränderung ist zu empfehlen, die Waldbehandlung auf eine Vermeidung bzw. Abmilderung von Trockenstresssituationen auszurichten. In Frage kommende Instrumente werden im Folgenden diskutiert.

## 1. Baumartenwahl

### a. *Beurteilung von Interzeption und Transpiration*

Infolge der klimatischen und morphologischen Voraussetzungen verdunstet auf den drei Untersuchungsflächen der Hauptteil des Niederschlages. Etwa 20 % des Niederschlages wird von Blättern und Zweigen zurückgehalten (Interzeptionsverdunstung) und steht damit den Pflanzen nicht zur Verfügung. Generell sind daher Baumarten mit geringem Kronenraumspeicher vorteilhaft, in diesem Fall eher Buche und Eiche als Kiefer, da bei diesen Laubbäumen die Interzeption während der Vegetationsruhe sehr gering ist und bei Buche durch den Stammabfluss ein Teil des Niederschlages schnell zum Boden geleitet wird. In der vorliegenden Studie konnte kein explizit baumartenspezifischer Zusammenhang bezüglich der Interzeption erkannt werden, da die Unterschiede stets von Effekten des Bestandesalters oder der Bestockungsdichte überlagert wurden.

Die gleiche Aussage gilt für die Transpiration, die im Mittel 75 % der Niederschlagsmenge betrug. Im Baumartenvergleich lag der Wasserverbrauch in ähnlichen Größenordnungen, wobei die Eiche geringfügig weniger als die anderen Baumarten transpierte.

### b. *Trockenstress*

Die Wasserverfügbarkeit im Boden wird nicht allein über die Niederschläge innerhalb der Vegetationsperiode definiert, sondern in gleichem Maß über die Speicherfähigkeit des Bodens. Je höher die nutzbare Feldkapazität des Bodens (und je mächtiger die durchwurzelbare Zone) ist, desto mehr Niederschlagswasser kann aus der Nicht-Vegetationsperiode im Solum gespeichert werden und steht für die Pflanzen während der Sommermonate zur Verfügung. Demnach sind die Höhe und der Füllgrad des Bodenwasserspeichers entscheidend für das Trockenstressrisiko eines Bestandes (SUTMÖLLER et al., 2008).

Trockenstress kann in Abhängigkeit von Baumart, Alter und Vitalität, aber auch Adaption bei unterschiedlicher Bodenwasserverfügbarkeit eintreten (z.B. KAHLE et al., 2007; SUTMÖLLER et al., 2008). Bis zu einem gewissen Grad sind Bäume je nach Herkunft, Standort und Vitalität in der Lage, sich an Trockenstress anzupassen (SCHRAML et al.,

2000; CZAJKOWSKI, 2006), indem sie beispielsweise in Schichten noch höheren Wassergehaltes die Feinwurzelmasse erhöhen, während in trockenen Bodenschichten Feinwurzeln absterben (LEUSCHNER et al., 2003; BURK, 2006; SUTMÖLLER et al., 2008). Allgemein wirkt sich Trockenstress innerhalb der Wachstumsperiode direkt sowohl auf das Pflanzenwachstum als auch die Vitalität aus (BRÉDA et al., 2006). In Zeiten ausgeprägt negativer Wasserbilanzen reagieren Bäume in erster Linie mit der Einschränkung des Dickenwachstums (WILSON & HOWARD, 1968, KAHLE et al., 2007; EICHHORN et al., 2008). Je nach Zeitpunkt der Trockenperiode kann auch die Anlage der Knospen und somit das Höhenwachstum für das darauf folgende Jahr beeinträchtigt werden (ROLOFF, 1988; EICHHORN et al., 2008). Die Fruchtbildung kann bereits im Trockenjahr qualitativ und quantitativ beeinträchtigt werden (DIETRICH et al., 2004, EICHHORN et al., 2008). Ein nachhaltiger Effekt von Trockenstress ist die Verminderung der Vitalität, die sich in einer erhöhten Anfälligkeiten gegenüber Schadorganismen ausdrückt (SUTMÖLLER et al., 2008). Die Auswirkungen von Extremtrockenzeiten wie beispielsweise das Sommerhalbjahr 2003 können nach ANDERS et al. (2004) bis zu 10 Jahre andauern.

Die Auswertung modellierter Bodenwassergehalte ergab, dass es in trockenen Jahren innerhalb des Intensivwurzelraumes Horizonte mit als kritisch einzustufender Wasserverfügbarkeit gibt (Wassergehalt < 40 % der nFK, ANDERS et al., 2004). Nach den Klimaprojektionen ist auch zukünftig mit solchen Austrocknungsperioden zu rechnen. Das größte Risiko besteht dabei für Pflanzen mit geringer Wurzeltiefe wie z.B. für die Baumverjüngung. Eine sich daraus ableitende Frage ist, inwieweit die Baumarten in der Lage sind, sich den Veränderungen langfristig anzupassen, d.h. speziell in diesem Fall, Tiefenwurzeln bis in Grundwasser leitende Schichten auszubilden und damit einen größeren Wurzelraum zu erschließen. Diese Frage muss Inhalt nächster Untersuchungen sein.

### *c. Anbaueignung bezüglich der Verbreitungsgrenzen*

Über die Kenntnis der natürlichen Verbreitungsgrenzen der Baumarten ist es möglich, eine erste Abschätzung der Anbaueignung unter der Prämisse sich ändernder Klimabedingungen wie z.B. einer Umverteilung der Niederschläge zu geben. Hierzu existiert eine Vielzahl wissenschaftlicher Ansätze, die teilweise infolge einseitiger Betrachtung der Einflussgrößen lediglich als grobe Annäherung gewertet werden können.

So definiert LEUSCHNER (1998) die Verbreitung von Buchenwäldern in Mitteleuropa über den Jahresniederschlag, der zwischen 460 mm bis < 2000 mm liegt. Präzisiert wird diese Angabe von RENNENBERG et al. (2004) über die Einbeziehung der Bodenwasserverfügbarkeit. ELLENBERG (1998) beschreibt die Buche als in der submontanen Stufe Mitteleuropas konkurrenzkräftigste Art, die jedoch sehr empfindlich auf Spätfröste und sommerliche Dürrezeiten reagiert. Die Eiche (vor allem *Quercus robur*) und die Kiefer weisen gegenüber Trockenperioden im Sommer eine entschieden geringere Empfindlichkeit auf (ELLENBERG, 1998). Nach HMULF (1999) befindet sich die Kiefer (*Pinus sylvestris*) in der südlichen Rhein-Main-Ebene bereits unter heutigen Klimabedingungen an ihrer Verbreitungsgrenze. Dabei hat die Kiefer bezüglich ihrer Ansprüche an den Standortwasserhaushalt einen sehr breiten Toleranzbereich und erschließt sich sowohl sehr trockene als auch sehr feuchte bis sogar moorige Standorte. Kritisch sind für die sehr frostresistente Art allerdings die milden Winter, die in Kombination mit Trockenjahren zu Vitalitäts-

einbußen führen können. Der untersuchte Kiefernbestand war in der Jugendphase sehr wüchsig, zeigt mittlerweile jedoch eine zunehmende Instabilität mit hohem Mistelbefall und üppiger Bodenvegetation mit Brombeere und Drahtschmiele. Auch die hohen Stickstoffeinträge werden auf dem jetzigen Niveau als destabilisierend für die Kiefer eingeschätzt (HMULF, 1999).

Nach HMULF (1999) bietet das jetzige und prognostizierte Klima des Rhein-Main-Gebietes der Buche keine Optimalbedingungen. Diese Beurteilung basiert auf dem Quotienten aus dem Juli-Temperaturmittel und dem Jahresniederschlag (multipliziert mit 1000): liegt er unter 30, ist die Buche gegenüber anderen Baumarten konkurrenzkräftiger. Für den Referenzzeitraum 1961 – 1990 wurde ein Wert von 32, für die Szenarien Werte zwischen 27 (B1 feucht) und 35 (A1B trocken) ermittelt, was eher für die Dominanz der Eiche spricht. Es ist jedoch fraglich, ob dieser Indikator auch weiterhin bei veränderten Klimabedingungen (Niederschlagsverteilung, Erhöhung der Wintertemperatur) seine Aussagekraft behält.

KÖLLING (2007) prognostiziert auch für die Zukunft eine gute Anpassung der Rotbuche im mitteleuropäischen Raum, leitet diese Aussage allerdings ausschließlich von der Jahresmitteltemperatur und der Jahresniederschlagssumme ab. Eine ähnliche Prognose gilt für die Eiche (sowohl *Quercus petraea*, *Quercus robur* als auch *Quercus pubescens*), die Kiefer dagegen gehört zu den gegenüber Temperaturerhöhungen empfindlichen Baumarten (KÖLLING 2007).

SUTMÖLLER et al. (2008) stellen heraus, dass die Buche als nicht sehr trockenstresstolerante Baumart in Zukunft an einigen Standorten Deutschlands Probleme bekommen kann. Durch ihr ausgesprochen breites Anbauspektrum wird sie sich aber auch in Zukunft in unseren Breiten heimisch fühlen, möglicherweise jedoch auf anderen Standorten als bisher (SUTMÖLLER et al., 2008).

Aus der vorliegenden Untersuchung ist eine Prognose der Anbaueignung der Baumarten nicht möglich, zumal viele Aspekte durch die Auswirkungen der Grundwasserabsenkungen überlagert werden. Pflanzenphysiologische Betrachtungen standen nicht im Mittelpunkt des Projektes. Als wichtiges Ergebnis der Untersuchungen lässt sich jedoch ableiten, dass sich unter Berücksichtigung der Klimaszenarien A1B und B1 in trockener und feuchter Variante der prognostizierte Standortwasserhaushalt bis zum Jahr 2050 nicht derartig ändern wird, dass eine der drei Baumarten absolut ungeeignet und damit nicht überlebensfähig wäre. Einschränkungen in der Anbaueignung könnte es jedoch in Hinsicht der Konkurrenzüberlegenheit geben. Eine Häufung sommerlicher Trockenperioden könnte vor allem für die Buche problematisch werden (BRESSEM, 2008). Die Tendenz zu milderem Wintern kann für die Laubbaumarten zu verfrühtem Laubaustrieb bei gleich bleibendem Spätfrostisiko führen (MENZEL, 1998; SUTMÖLLER et al., 2008).

In jedem Fall kann nicht nur die Baumart, sondern innerhalb der Baumarten auch in starkem Maß die Herkunft ausschlaggebend für die Anpassungsfähigkeit und Stresstoleranz der Individuen sein (CZAJKOWSKI, 2006; BOLTE et al., 2007; JANSEN et al., 2008).

#### *d. Schädlingsanfälligkeit*

Aus den Wasserhaushaltssimulationen geht hervor, dass die untersuchten Bestände seit den 70er Jahren wiederholt infolge niedriger Niederschläge und durch die Absenkung des Grundwassers intensivem Trockenstress ausgesetzt waren. In den seit den 80er Jahren regelmäßig durchgeführten Waldzustandserhebungen sind als Folge überdurchschnittlich hohe Schäden durch Insektenkalamitäten dokumentiert.

Die Voraussetzungen für die Massenvermehrung von Schadinsekten (z.B. Maikäfer, Eichenprozessionsspinner, Schwammspinner) sind im Raum Hessisches Ried durch milde Winter, warme und trockene Sommer, verbunden mit durch Wasserstress geschwächten Beständen, gegeben. Gemäß den in den Untersuchungen berücksichtigten Klimaszenarien können in Zukunft infolge der Erwärmung und der veränderten Niederschlagsverteilung vermehrt Trockenperioden auftreten. Unter diesen Bedingungen ist auch zukünftig mit einem erhöhten Auftreten von Schadinsekten zu rechnen (vgl. BRESSEM, 2008).

#### *e. Alternativen*

Verändern sich auf lange Sicht die Umweltbedingungen derart, dass einheimische Baumarten zunehmend geschädigt werden, besteht eine Möglichkeit der Bestandesstabilisierung in der Einbringung fremder Baumarten. Unter den gegebenen Klimabedingungen eignen sich hierfür z. B. Roteiche oder Douglasie, bei starken Bestandesauflichtungen aber auch Pionierbaumarten wie Birke oder Robinie. Da ein großer Teil des Waldgebietes unter Schutz steht (z. B. FFH-Schutzgebiete), ist diese Alternative kaum einsetzbar. Eine weitere Erfolg versprechende Möglichkeit der Stabilisierung der Bestände unter Beibehaltung des einheimischen Baumartenspektrums ist die Einbringung von Provenienzen aus dem kontinentaleren südlichen und östlichen Europa (vgl. BOLTE et al., 2007; BEIER-KUHNLEIN u. FOKEN, 2008).

## **2. Bestockungsdichte**

Die Höhe der Grundwasserneubildungsrate ist einerseits abhängig von der baumartenabhängigen Interzeption, im stärkeren Maße aber von der Bestockungsdichte. Ein Vergleich der Szenarien unterschiedlicher waldbaulicher Behandlung der Buchenfläche ergab größere Unterschiede der Grundwasserneubildung als zwischen unterschiedlichen Baumarten oder Klimaszenarien. Gleichzeitig wird durch Bestandesauflichtung das Trockenstressrisiko reduziert. Bei zu starker Auflichtung besteht jedoch die Gefahr einer Vergrasung der Bestände. Die Bodenvegetation kann sich dann zu einer bedeutsamen Konkurrenz um die Bodenwasservorräte entwickeln (MÜLLER 2003). Bei den vorliegenden Wasserhaushaltssimulationen wurde die Bodenvegetation in Abhängigkeit des Überschirmungsgrades des Waldbestandes berücksichtigt (s. Kap. 3.4). Zusätzlich bieten Grasflächen optimale Bedingungen für die Entwicklung von Maikäferlarven (vgl. Abschnitt 5.1.d). Die derzeitige Datengrundlage gestattet es nicht, einen Schwellenwert zur Überschirmung anzugeben, bei dessen Unterschreitung die Bodenvegetation durch die Auflichtung zu einer ernsthaften Konkurrenz für den Baumbestand würde.

In der Konsequenz sollte auf eine ausgewogene Bestandesdichte geachtet werden. Hier haben gestaffelte Durchforstungen mit starken Eingriffen in der Jugend und abnehmender Eingriffsstärke mit zunehmendem Bestandesalter den Vorteil, dass sie die Produkti-

ons- und damit auch Gefährdungszeiträume verkürzen. Niederdurchforstungen sind ein gutes Instrument zur Verringerung von Trockenstress.

Exakte Richtlinien können aus den Ergebnissen der drei Standortmodellierungen nicht gegeben werden, hierzu müssen noch räumlich differenzierte Untersuchungen folgen.

### **3. Schlussfolgerungen**

Aus dem Vergleich der Wasserbilanzen bei unterschiedlicher forstwirtschaftlicher Nutzung lässt sich die Empfehlung nach angepassten Bestockungsdichten ableiten, die im Falle ausreichenden Niederschlages eine mittlere Grundwasserneubildung zulassen, ohne die Ausbreitung von Grasdecken unter stark aufgelichteten Beständen zu begünstigen. Den noch erheblichen Unsicherheiten hinsichtlich der prognostizierten Niederschläge kann waldbaulich am ehesten mit einer Risikoverteilung durch Baumartenmischung begegnet werden. Die Empfehlungen sind im Rahmen dieser als Vorstudie zu wertenden Untersuchung als pauschal zu verstehen und müssen im aktuell laufenden Projekt „Waldentwicklungsszenarien für das Hessische Ried“ geprüft werden. Aus der Praxis ist bekannt, dass infolge der teilweise massiven Waldschäden kaum noch Spielraum für zielorientierte forstliche Maßnahmen vorhanden ist. Die Schadensbeseitigung erreicht in einigen Forstämtern oft die Dimensionen des Jahreseinschlages.

In den drei untersuchten Beständen lag ein solches Schadenmaß bisher nicht vor. Daher können explizit für diese drei Standorte zusammenfassend folgende waldbaulichen Anpassungsempfehlungen abgeleitet werden:

- Erhöhung bzw. Beibehaltung des Laubbaumanteils zur Senkung der Interzeption (und Transpiration)
- Gewährleistung einer ausgewogenen Bestandesdichte durch gestaffelte Durchforstungen zur Reduktion des Trockenstressrisikos bei gleichzeitiger Minimierung des Risikos der Vergrasung
- Rechtzeitige Verjüngung unter Schirm und ausgewogene Altersstruktur erhöhen die Bestandeselastizität
- Horstweise Baumartenmischungen gewährleisten eine Risikoverteilung gegenüber Schädlingen und Sturmwurfgefährdung, erhöhen die Elastizität nach Störungen und sichern dennoch die Effizienz waldbaulicher Eingriffe
- Ergänzung der Bestände durch wärmeliebende, trockenstressresistente Fremdbaumarten (z.B. Roteiche, Douglasie), wo keine naturschutzfachlichen Restriktionen bestehen

Abschließend soll nochmals betont werden, dass die Ergebnisse anhand von drei Untersuchungsbeständen abgeleitet wurden und damit nicht direkt auf das gesamte Rhein-Main-Gebiet übertragbar sind. Weiterführende, flächenbezogene Untersuchungen sind Hauptthema des Projektes „Waldentwicklungsszenarien für das Hessische Ried“, das, gefördert durch das Land Hessen, seit Anfang 2008 durch die NW-FVA, FENA Gießen und die Universität Göttingen bearbeitet wird.

## 6 Quellenverzeichnis

- AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Auflage. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover
- Albert, M., Hansen, J. (2007): Ein Entscheidungsunterstützungssystem für die multifunktionale Forstplanung auf Landschaftsebene. *Forst und Holz* 62 (12): 14-18
- Anders, S.; Beck, W.; Lux, W.; Müller, J.; Fischer, R.; König, A.; Küppers, J.-G.; Thoroe, C.; Kätzel, R.; Löffler, S. Heydeck, P.; Möller, K. (2004): Auswirkung der Trockenheit 2003 auf Waldzustand und Waldbau. BMVEL 533-7120/1. Zwischenbericht der BFH
- Beierkuhnlein, C.; Foken, Th. (2008): Klimawandel in Bayern. Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten. *Bayreuther Forum Ökologie*, Vol. 113
- Bolte, A.; Czajkowski, T. (2007): Beech is not merely beech – adaptation potential of different European beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances to climate change. *Verh. Ges. Ökol.* 37: 350
- BMVEL, Referat 533 (2001): Luftqualität und atmosphärische Stoffeinträge an Level-II-Dauerbeobachtungsflächen in Deutschland.
- Bressem, U. (2008): Komplexe Erkrankungen der Buche. In: *Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 3*
- Burk, D. (2006): Physiologische, anatomische und chemische Aspekte der Regulation der Wurzelwasseraufnahme bei Rotbuche, Kiefer und Birke auf zwei unterschiedlich wasserversorgten Standorten. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen
- Czajkowski, T. (2006): Zur zukünftigen Rolle der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in der natürlichen Vegetation – waldökologische Untersuchungen zur Buchen-Naturverjüngung an der östlichen Buchenwald-Verbreitungsgrenze. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen
- de Haar, U.; Hoffmann, D. (Hrsg.) (1986): *Wasser aus dem Wald – Wasser für den Wald. Ein Rundgespräch der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Verlag Beiträge zur Hydrologie, Kirchzarten; ISSN 0174-0555*
- Dietrich, H.-P.; Raspe, S.; Schubert, A. (2004): Trockenheit 2003 war nicht die einzige Ursache für starke Zuwachsverluste. *LWF-aktuell* Nr. 43, Seite 14-16
- Eichhorn, J. (Hrsg.) (1992): *10 Jahre Waldökosystemstudie Hessen: Ergebnisse und Perspektiven. Forschungsber. Hessische Forstliche Versuchsanstalt* 15
- Eichhorn, J.; Dammann, I.; Schönfelder, E.; Albrecht, M.; Beck, W.; Paar, U. (2008): Untersuchungen zur Trockenheitstoleranz der Buche am Beispiel des witterungsextremen Jahres 2003. In: *Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 3*
- Elend, C. (2000): Untersuchungen zum Einsatz von hemisphärischen Fotos zur Ermittlung von Bestandesstrukturparametern und deren Einfluss auf die Interception von Waldbeständen. *Dipl.-Arb. Fachber. Forstwirtschaft und Umweltmanagement, Fachhochschule Hildesheim/Holzminde/Göttingen*
- Hammel, K.; Kennel, M. (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell Brook90. *Forstliche Forschungsberichte München*, Nr. 185

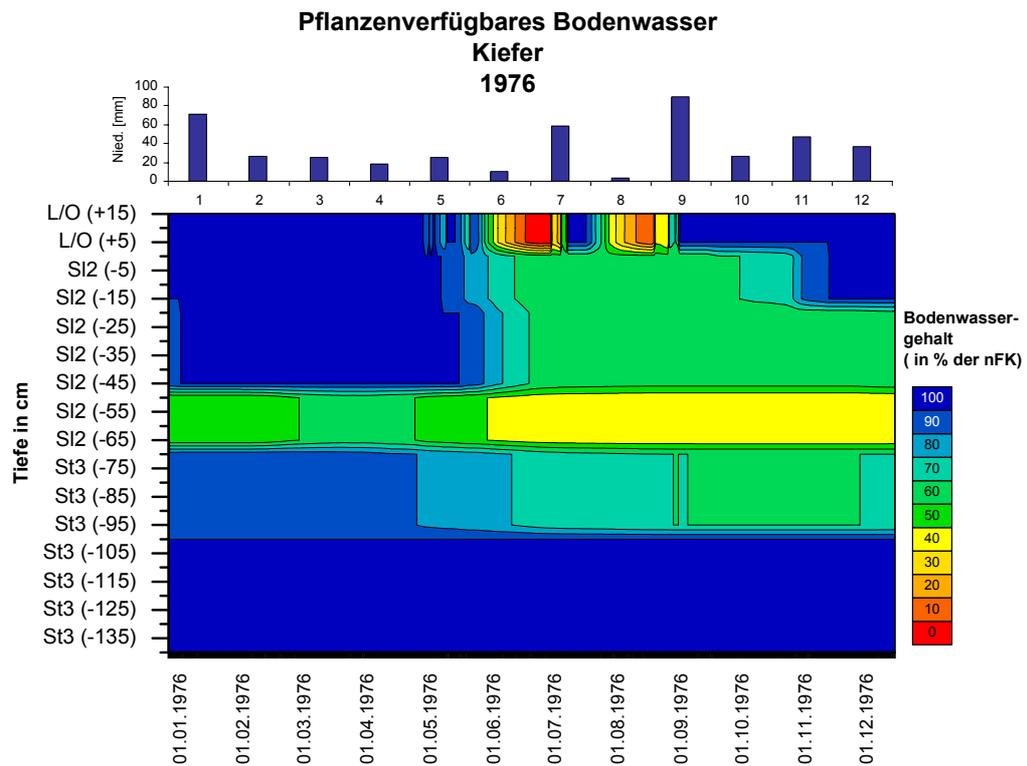
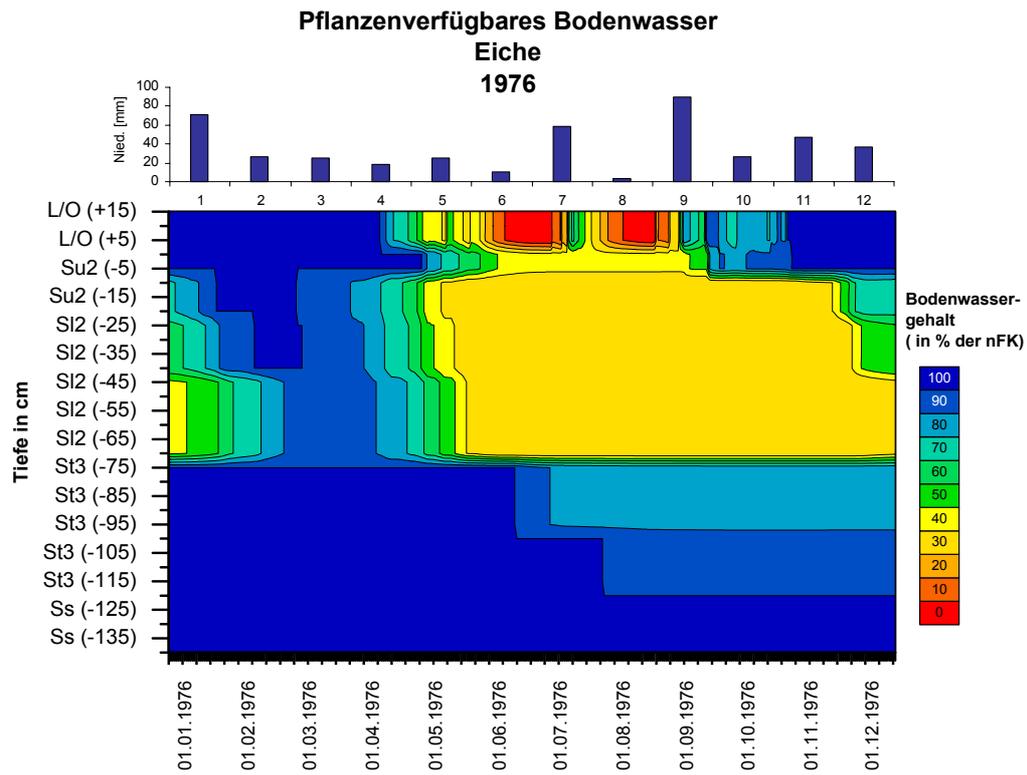
- Hessen Forst (2002): Richtlinie für die Bewirtschaftung des Hessischen Staatswaldes
- HMULF (Hrsg.) Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten (1999): Gefährdung der Wälder im Rhein-Main-Gebiet – Konzepte zur Walderhaltung und Waldstabilisierung. Mitteilung der Hessischen Landesforstverwaltung, Band 35
- HMULV (Hrsg.) Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (2007): Waldzustandsbericht 2007
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change - (2007): Climate Change 2007 – The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the IPCC
- Janßen, A.; Gebhardt, K.; Steiner, W. (2008): genetische Vielfalt nordwestdeutscher Buchenwälder. In: Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 3
- Kahle, H.-P.; Mutschler, A.; Spiecker, H. (2007): Zuwachsreaktionen von Waldbäumen auf Trockenstress - Erste Ergebnisse retrospektiver Analysen in verschiedenen Höhenlagen des Südschwarzwaldes unter besonderer Berücksichtigung der Jahre 1947, 1976 und 2003. Beiträge zur Jahrestagung des Deutschen Verbandes Forstlicher Forschungsanstalten - Sektion Ertragskunde. 21.-23. Mai 2007 Alsfeld-Eudorf
- Kölling, Ch. (2007): Klimahüllen für 27 Baumarten. AFZ-DerWald, 23/2007, 1242-1245
- Lehnardt, F. (1983): Forsthydrologische Bodenwasserhaushalts-Untersuchungen im Hessischen Ried und Stadtwald Frankfurt. Bericht der Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt, Institut für Forsthydrologie. Unveröffentlicht
- Leuschner, Ch. (1997): Water extraction by fine roots in the forest floor of a temperate Fagus-Quercus forest. *Annals of Forest Science* (1998) 55, 141-157
- Leuschner, Ch. (1998): Mechanismen der Konkurrenzüberlegenheit der Rotbuche. *Ber. D. Reinh. Tüxen-Ges.*, 10, 5-18
- Leuschner, Ch.; Hertel, D. (2003): Fine root biomass of temperate forests in relation to soil acidity and fertility, climate, age and species. *Progress in Botany* 64, 405-438
- Menzel, A. (1997): Phänologie von Waldbäumen unter sich ändernden Klimabedingungen - Auswertung der Beobachtungen in den Internationalen Phänologischen Gärten und Möglichkeiten der Modellierung von Phänodaten. *Forstliche Forschungsberichte München*, 164
- Menzel, A. (1998): Klimaerwärmung und Austrieb von Waldbäumen. *LWF Aktuell* 15, 21-23
- Monteith, J.L. (1965): Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 19: S. 205-224
- Müller, J. (2003): Die Verdunstung der Bodenvegetation am Beispiel verbreiteter Vegetationsformen der Kiefer des nordostdeutschen Tieflands. In: Hörmann, G.; Scherzer, J.; Suckow, F.; Müller, J.; Wegehenkel, M.; Lukes, M.; Hammel, K.; Knieß, A.; Meeßenburg, H.: Wasserhaushalt von Waldökosystemen: Methodenleitfaden zur Bestimmung der Wasserhaushaltskomponenten auf Level II-Flächen. Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) (Hrsg.), 23-27
- Nagel, J. (2002): Das Open Source Entwicklungsmodell - eine Chance für Waldwachstumssimulatoren. *Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten - Sektion Ertragskunde, Jahrestagung Schwarzburg* 13-15. Mai 2002, 1-6
- Niedersächsische Landesforsten: <http://www.landesforsten.de/index.php?id=20>

- Peck, A.K. (2004): Hydrometeorologische und mikroklimatische Kennzeichen von Buchenwäldern. Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg Nr. 10
- Rennenberg, H.; Seiler, W.; Matyssek, R.; Gessler, A. u. Kreuzwieser, J. (2004): Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) – ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa? Allg. Forst- u. J.-Ztg. 175, 210-224
- Roeckner, E.; Baeuml, G.; Bonaventura, L.; Brokopf, R.; Esch, M.; Giorgetta, M.; Hagemann, S.; Kirchner, I.; Kornblueh, L.; Manzini, E.; Rhodin, A.; Schlese, U.; Schulzweida, U. u. Tompkins, A. (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM5 – Part 1: Model Description. MPI-Berichte, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bd. 349
- Roeckner, E.; Brokopf, R.; Esch, M.; Giorgetta, M.; Hagemann, S.; Kornblueh, L.; Manzini, E.; Schlese, U. u. Schulzweida, U. (2004): The atmospheric general circulation model ECHAM5 – Part 2: Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution. MPI-Berichte, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bd. 354
- Roloff, A. (1988): Morphology of crown development of *Fagus sylvatica* L. (beech) in consideration of new modifications. II. strategy of airspace conquest and modifications by environmental influences Flora 180, 297-339
- Schraml, C.; Rennenberg, H. (2000): Ökotypen der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) zeigen unterschiedliche Reaktionen auf Trockenstreß. Forstwissenschaftliches Centralblatt 119, 51-61
- Schulla, J. (1997): Wasserhaushalts-Simulationsmodell WaSiM-ETH, Anwender-Handbuch, Geogr. Inst. ETH Zürich, unveröff.
- Spekat, A.; Enke, W.; Kreienkamp, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Endbericht Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens: "Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland - Phase I: Erstellung regionaler Klimaszenarios für Deutschland" des Umweltbundesamtes. Förderkennzeichen 204 41 138
- Streitz, H. (1967): Bestockungswandel in Laubwaldgesellschaften des Rhein-Main-Tieflandes und der Hessischen Rheinebene. Univ. Göttingen, Dissertation
- Sutmöller, J.; Spellmann, H.; Fiebiger, C.; Albert, M. (2008): Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Buchenwälder in Deutschland. In: Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 3
- Teepe, R.; Dilling, H.; Beese, F. (2003) Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. J. Plant Nutr. Soil Sci. 2003, 166, 111-119
- Wilson, B. F.; Howard, R. A. (1968): A Computer Model For Cambial Activity. Forest Science 14, 77-90

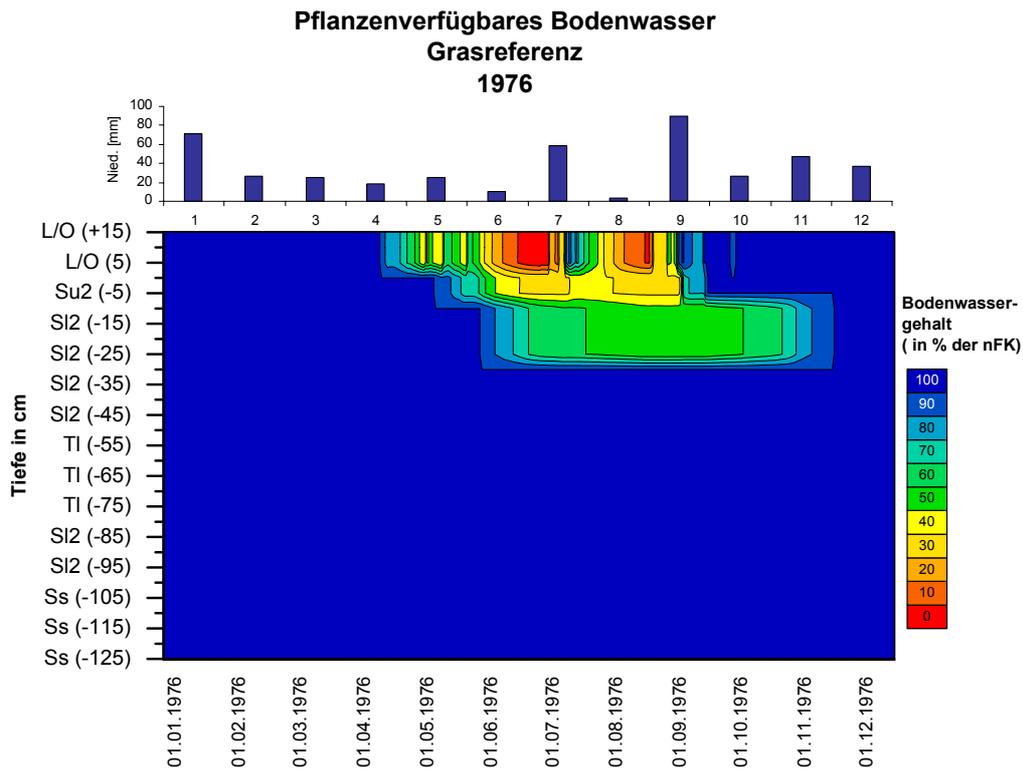
## Anhang

Anlage I: Blattflächenindizes (LAI) des untersuchten Buchen-, Eichen- und Kiefernbestandes sowie von Grasvegetation im Hessischen Ried. Mit dem WaldPlaner berechnete Werte sind kursiv dargestellt.

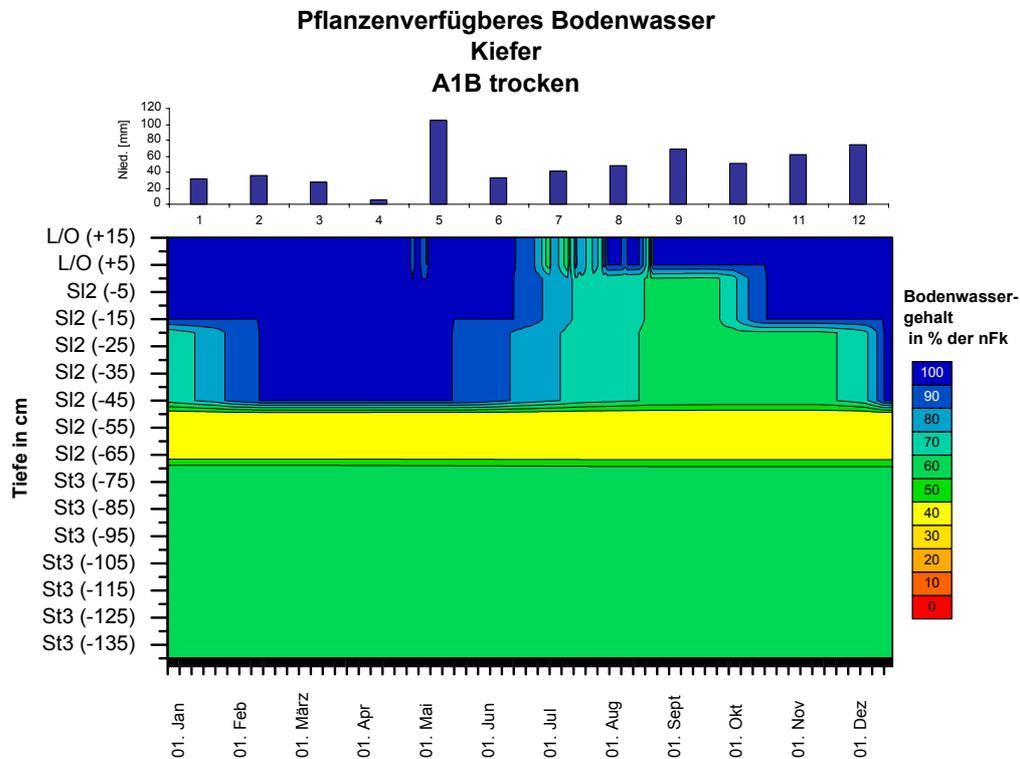
Zeitspanne	Buche		<i>Buche ohne Eingriff</i>		Eiche		Kiefer		Gras	
	Sommer	Winter	<i>Sommer</i>	<i>Winter</i>	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter
1951-1960	5.5	2.7	-	-	4.7	2.3	2.1	1.9	2.0	1.0
1961-1963	5.5	2.7	-	-	4.7	2.3	2.4	1.9	2.0	1.0
1964-1967	5.7	2.8	-	-	4.7	2.3	2.9	2.6	2.0	1.0
1968-1973	5.6	2.8	-	-	4.7	2.3	3.7	3.3	2.0	1.0
1974-1977	5.7	2.9	-	-	4.7	2.3	4.5	4.0	2.0	1.0
1978-1981	5.8	2.9	-	-	4.6	2.3	5.3	4.7	2.0	1.0
1982-1986	6.2	3.1	-	-	4.6	2.3	6.3	5.5	2.0	1.0
1987-1991	6.3	3.1	-	-	4.9	2.4	6.3	5.5	2.0	1.0
1992-1995	6.5	3.2	-	-	4.1	2.0	6.4	5.7	2.0	1.0
1996-2000	6.5	3.3	-	-	4.1	2.0	6.4	5.7	2.0	1.0
2001-2003	6.5	3.3	-	-	4.1	2.0	6.4	5.7	2.0	1.0
2003-2006	6.5	3.3	-	-	4.1	2.0	4.2	3.6	2.0	1.0
2007-2009	3.9	2.0	3.9	2.0	3.2	1.6	4.3	3.6	2.0	1.0
2010-2014	4.2	2.1	4.2	2.1	3.2	1.6	4.1	3.3	2.0	1.0
2015-2019	4.6	2.3	4.6	2.3	3.3	1.7	4.2	3.5	2.0	1.0
2020-2025	4.3	2.1	4.6	2.3	3.2	1.6	4.4	3.7	2.0	1.0
2026-2030	4.1	2.1	5.0	2.5	3.5	1.7	4.3	3.6	2.0	1.0
2031-2034	3.6	1.8	5.5	2.7	3.5	1.8	4.3	3.6	2.0	1.0
2035-2039	3.3	1.7	5.6	2.8	3.7	1.9	4.3	3.6	2.0	1.0
2040-2044	3.0	1.5	5.8	2.9	3.9	1.9	4.4	3.7	2.0	1.0
2045-2050	2.3	1.2	6.2	3.1	3.9	1.9	4.1	3.4	2.0	1.0



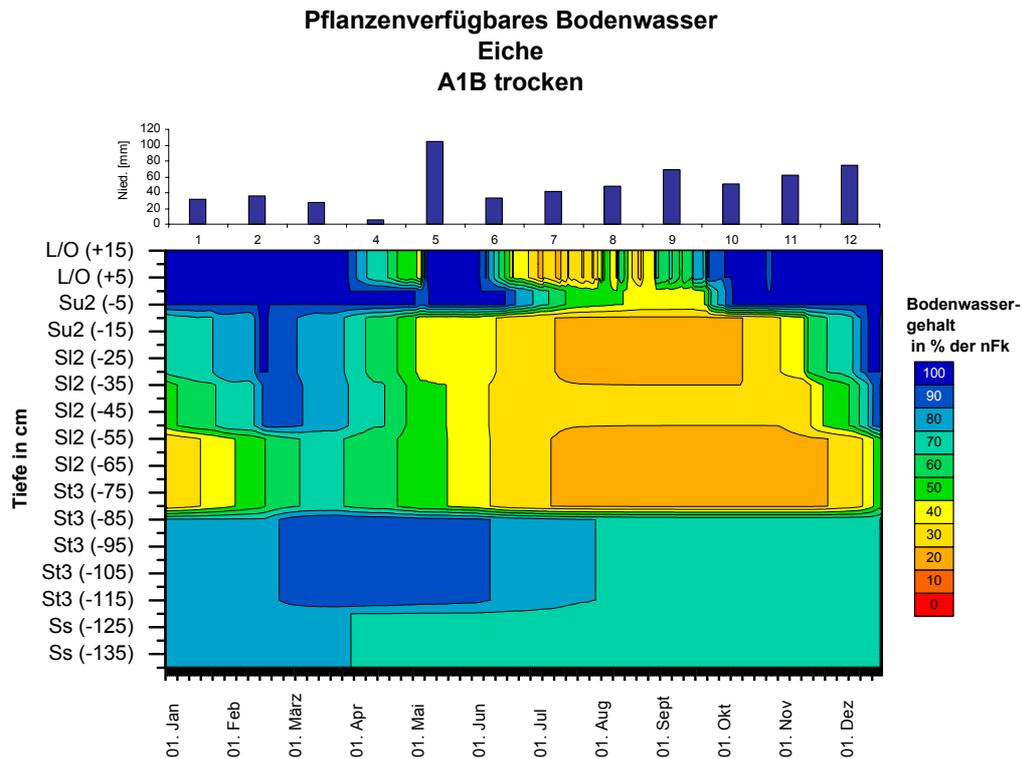
Anlage III: Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Eiche (oben) und Kiefer (unten) im Jahr 1976 unter Angabe des Niederschlages.



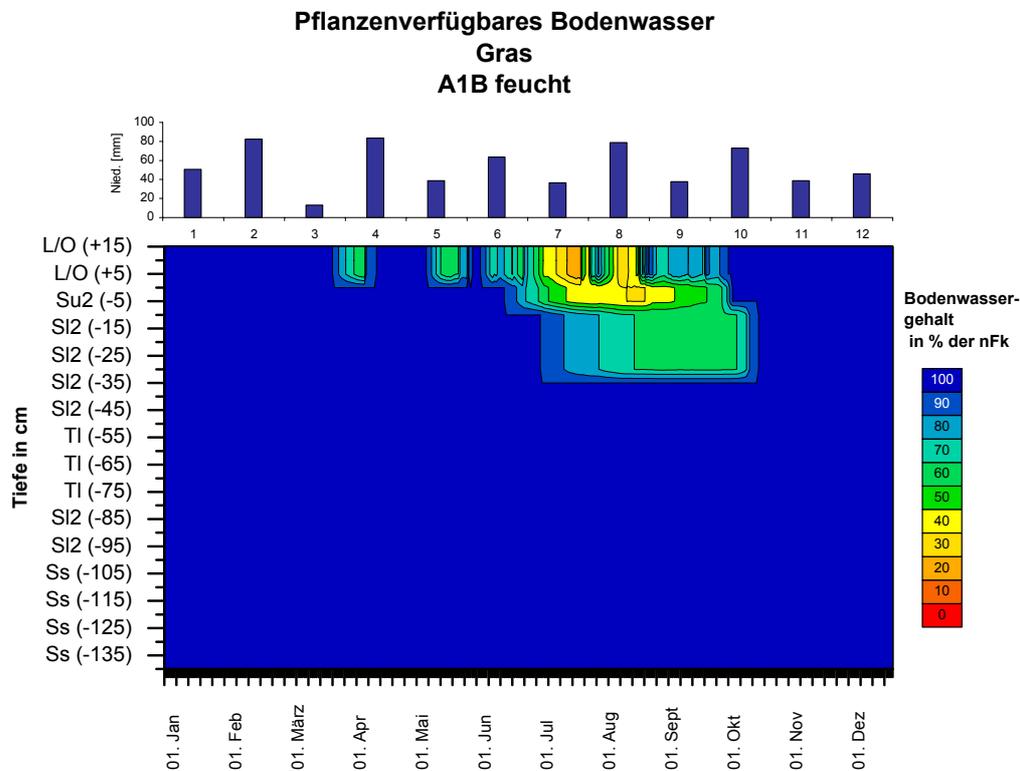
**Anlage III:** Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Gras im Jahr 1976 unter Angabe des Niederschlages.



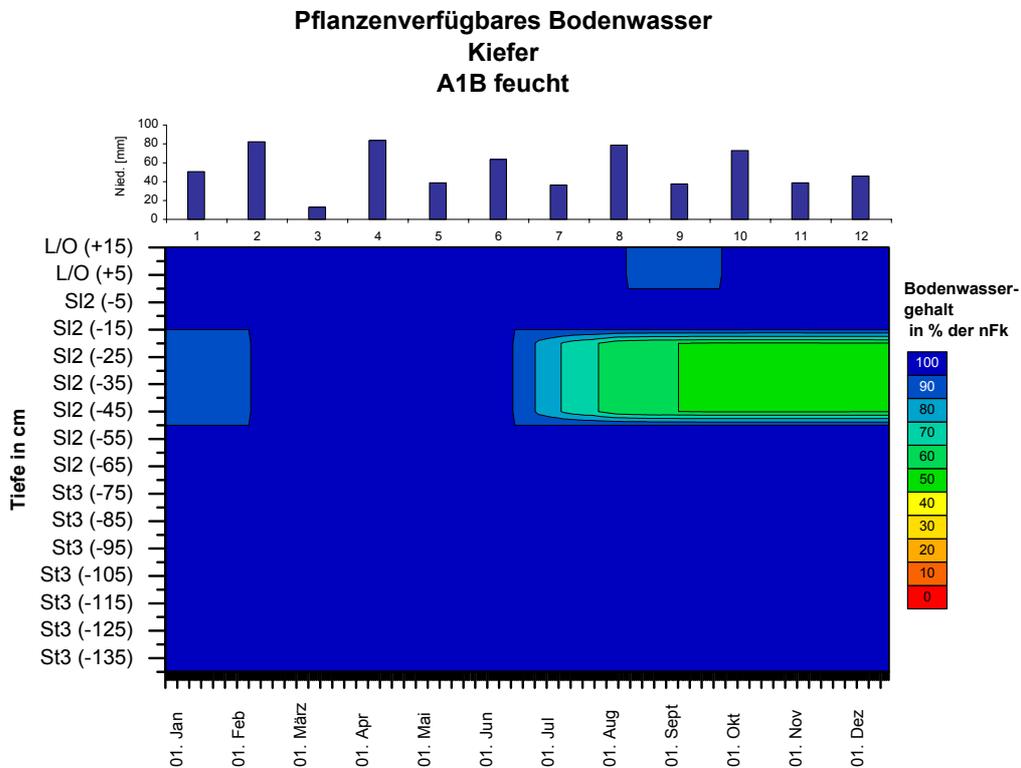
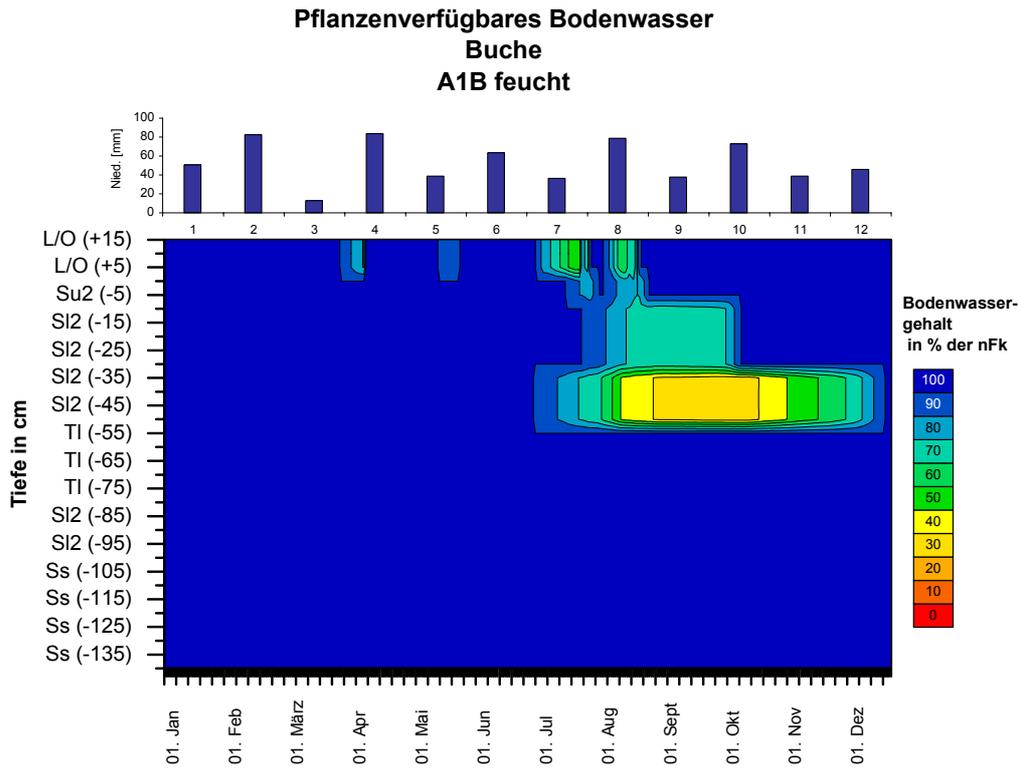
**Anlage IV:** Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Kiefer im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario A1B (trockene Variante) unter Angabe des Niederschlages.



**Anlage V:** Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Eiche im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario A1B (trockene Variante) unter Angabe des Niederschlages.

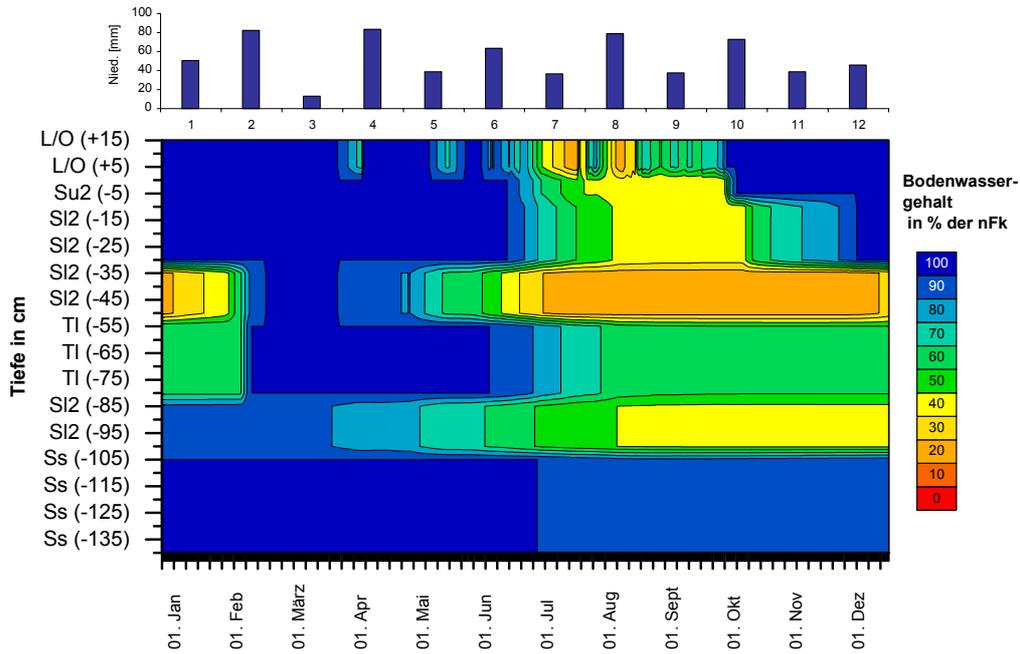


**Anlage VI:** Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Gras im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario A1B (feuchte Variante) unter Angabe des Niederschlages.

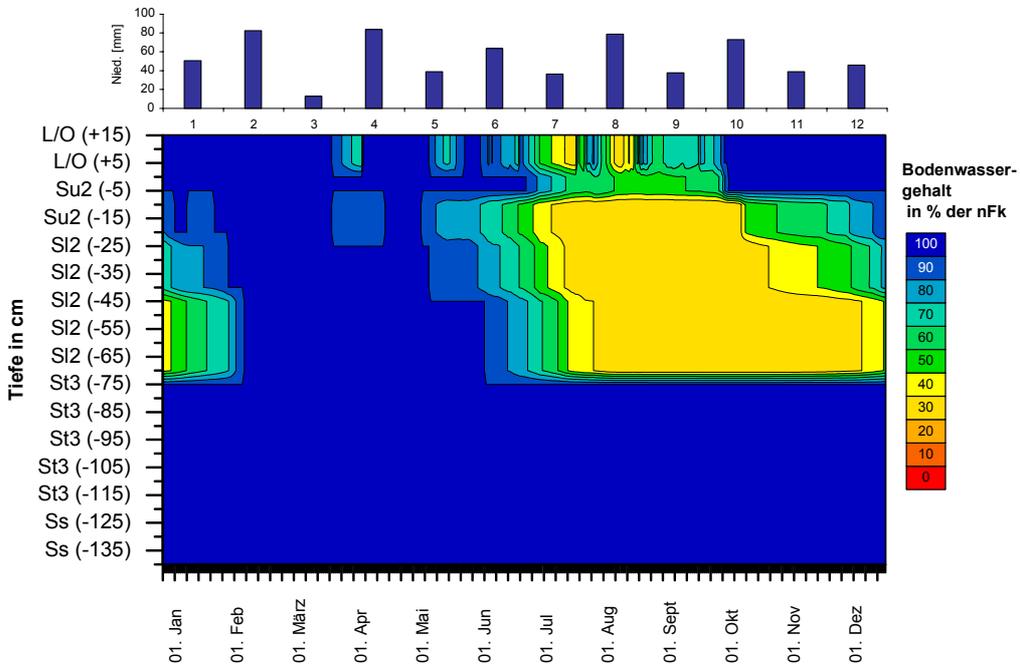


Anlage VII: Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Buche (oben) und Kiefer (unten) im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario A1B (feuchte Variante) unter Angabe des Niederschlages.

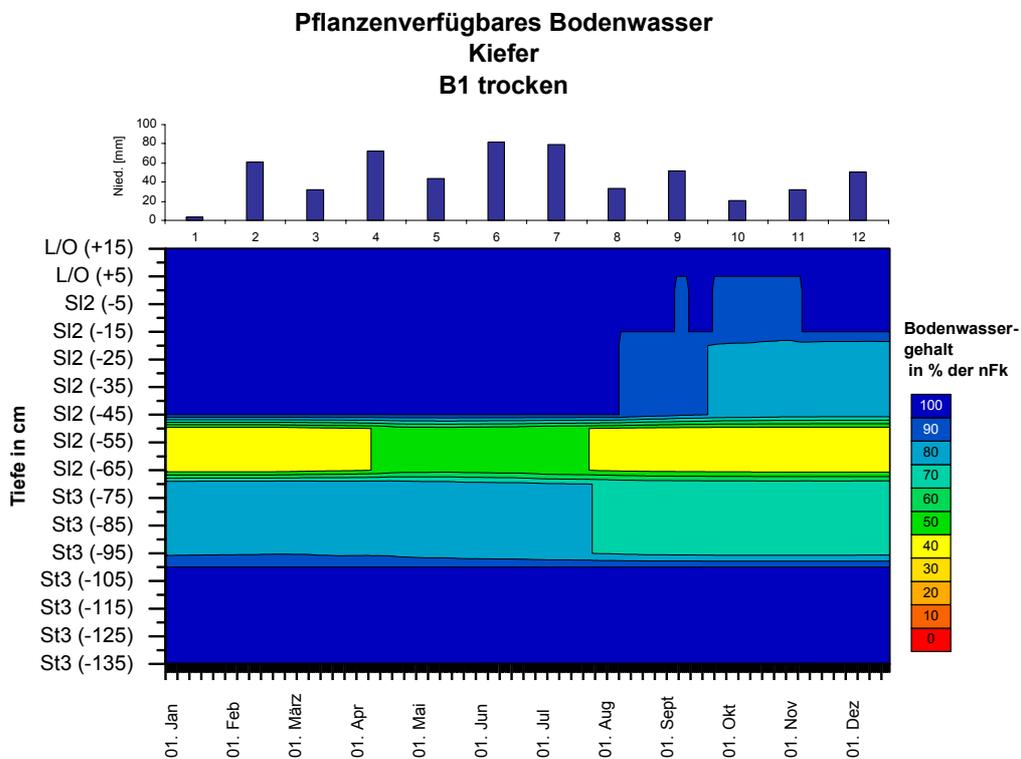
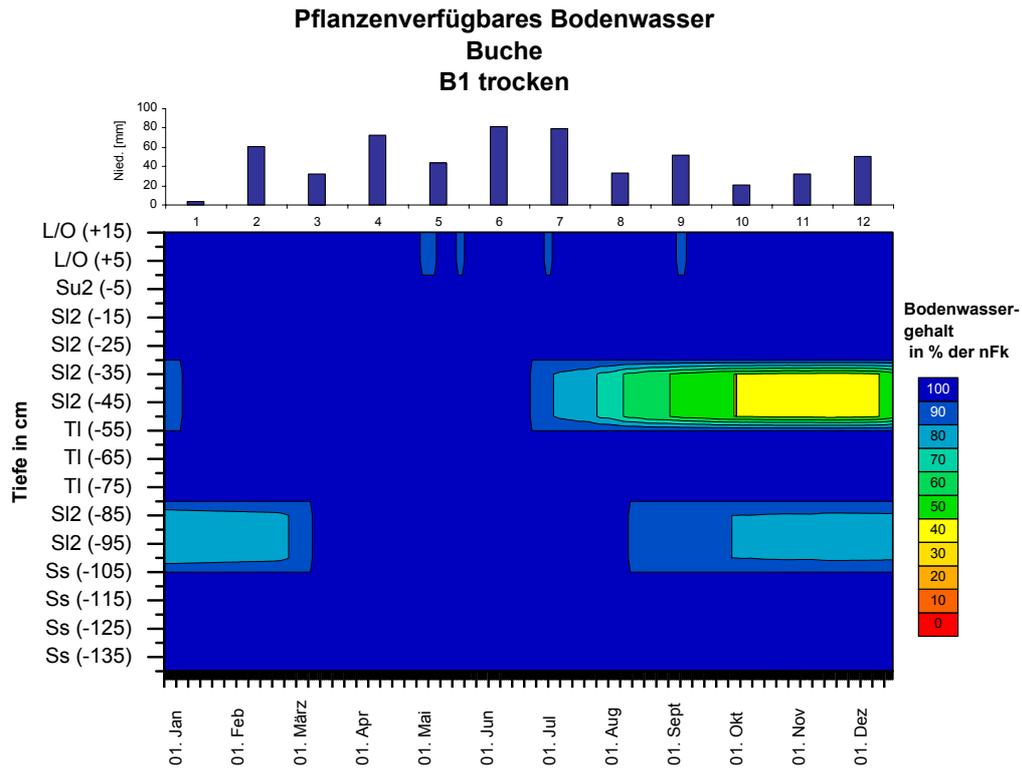
**Pflanzenverfügbares Bodenwasser  
Buche (ohne Eingriff)  
A1B feucht**



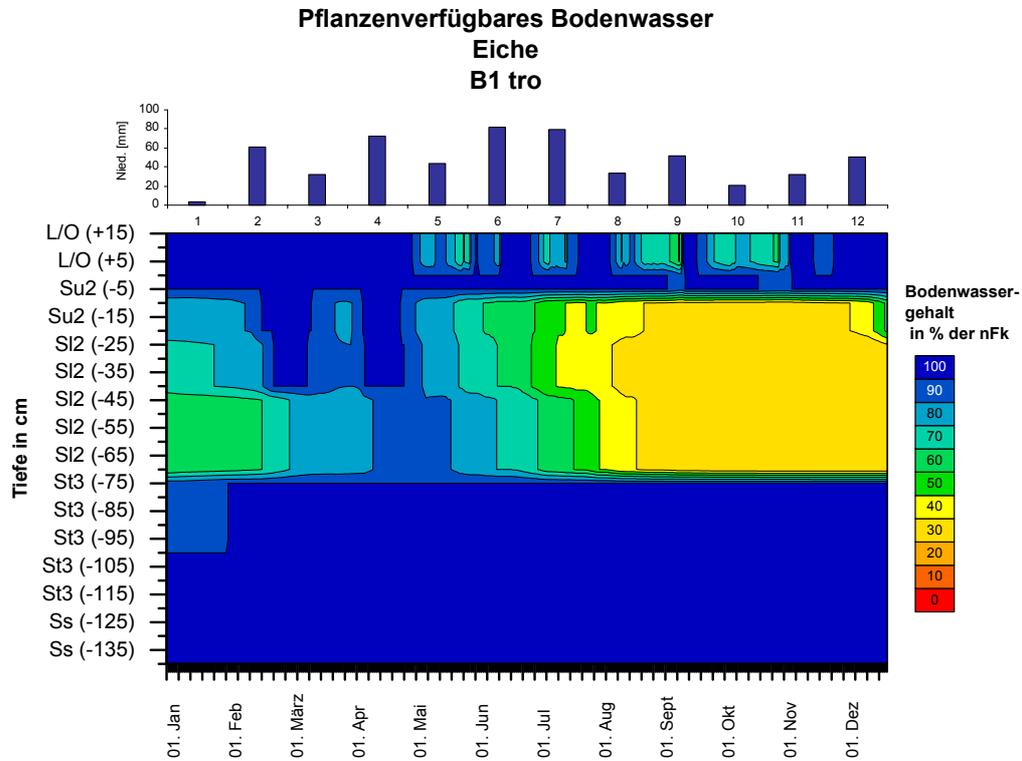
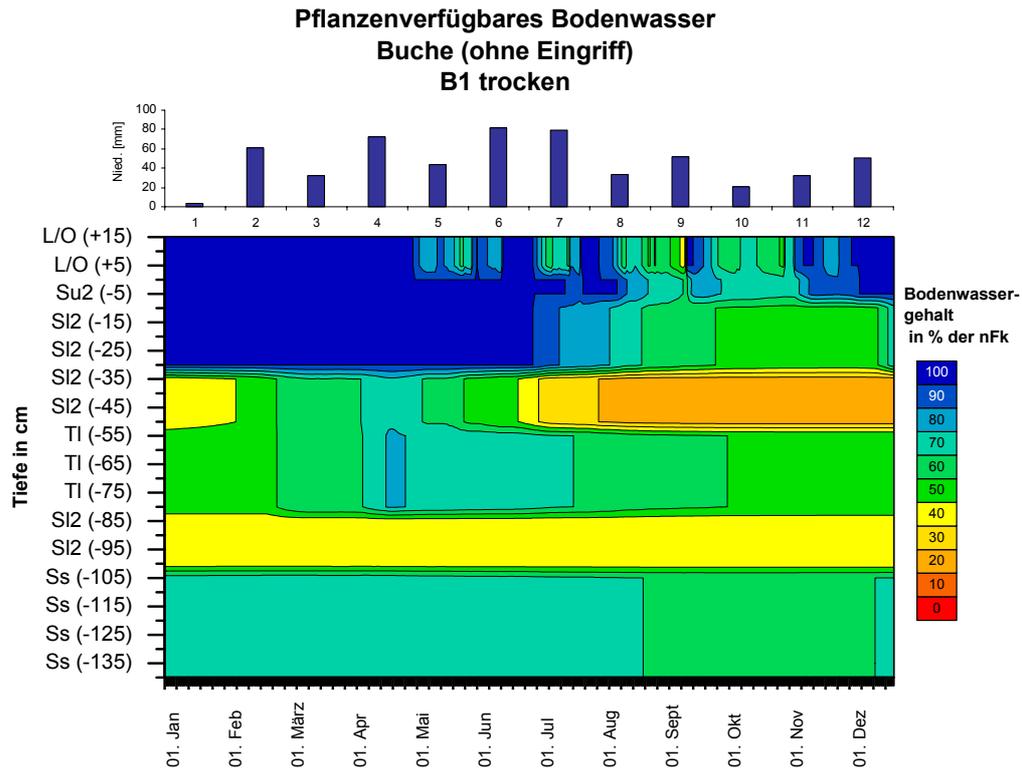
**Pflanzenverfügbares Bodenwasser  
Eiche  
A1B feucht**



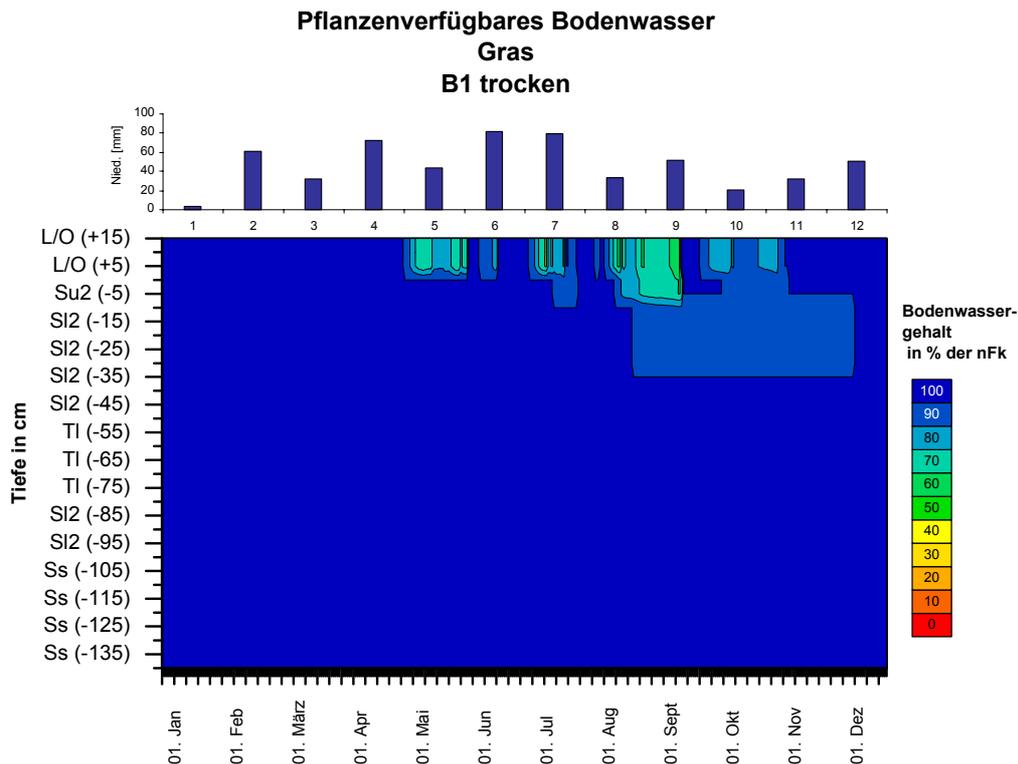
**Anlage VIII:** Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Buche ohne waldbauliche Eingriffe (oben) und Eiche (unten) im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario A1B (feuchte Variante) unter Angabe des Niederschlages.



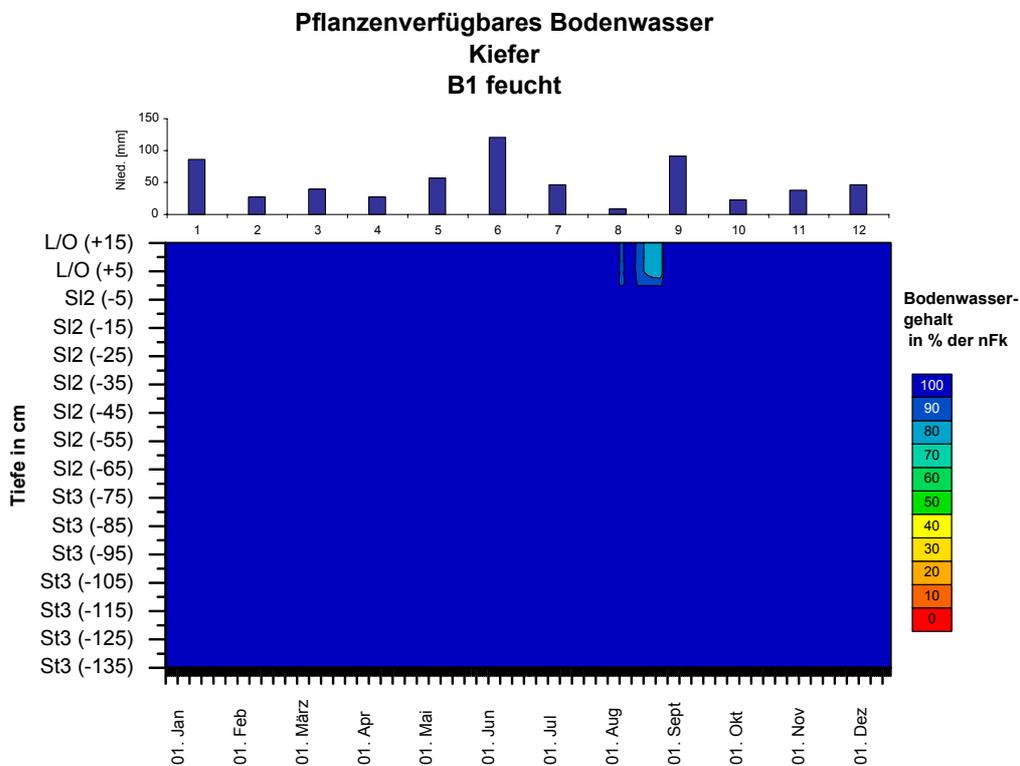
Anlage IX: Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Buche (oben) und Kiefer (unten) im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario B1 (trockene Variante) unter Angabe des Niederschlages.



Anlage X: Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Buche ohne waldbauliche Eingriffe (oben) und Eiche (unten) im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario B1 (trockene Variante) unter Angabe des Niederschlages.

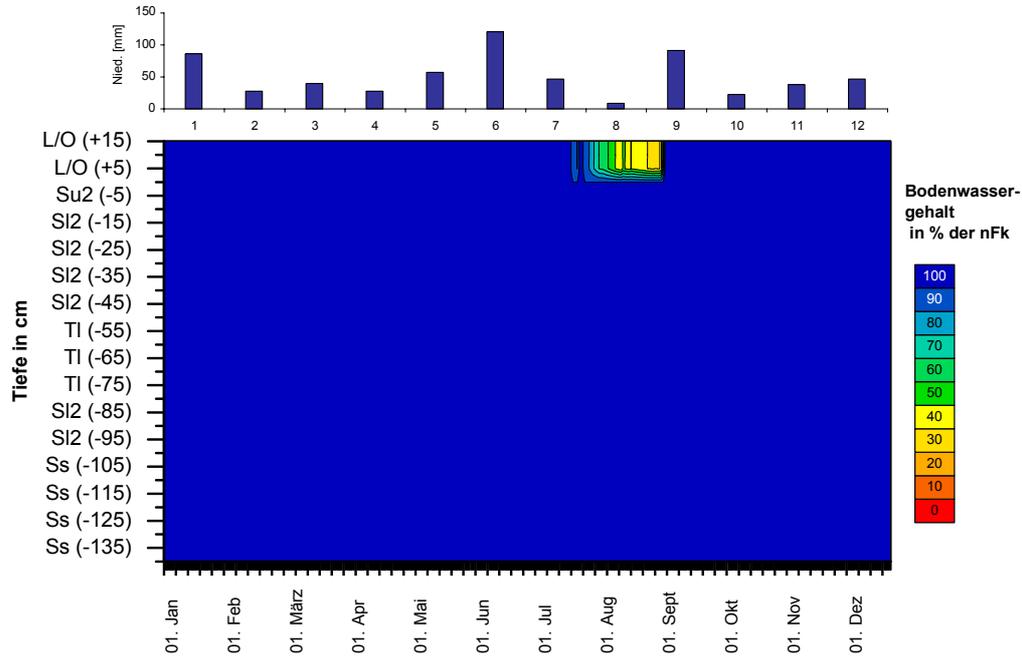


**Anlage XI:** Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Gras im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario B1 (trockene Variante) unter Angabe des Niederschlages.

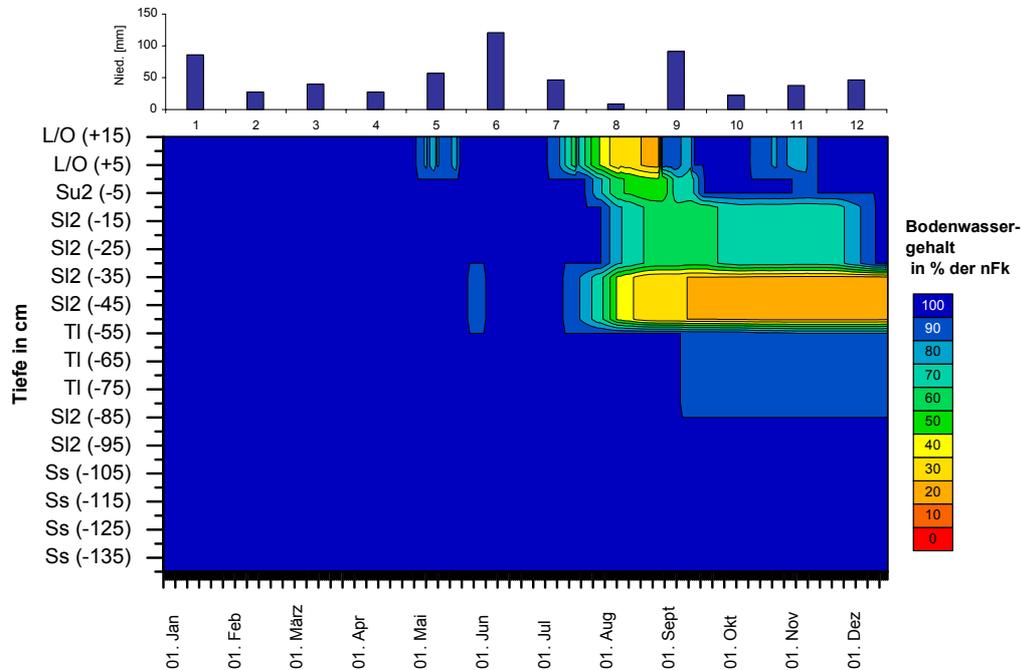


**Anlage XII:** Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Kiefer im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario B1 (feuchte Variante) unter Angabe des Niederschlages.

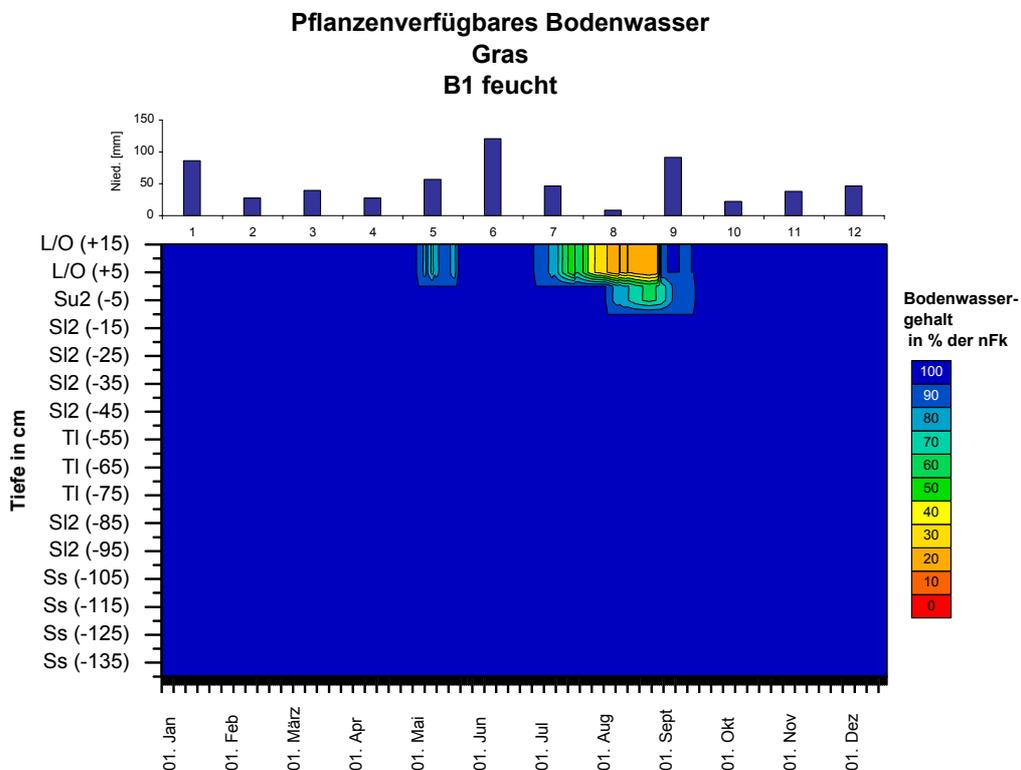
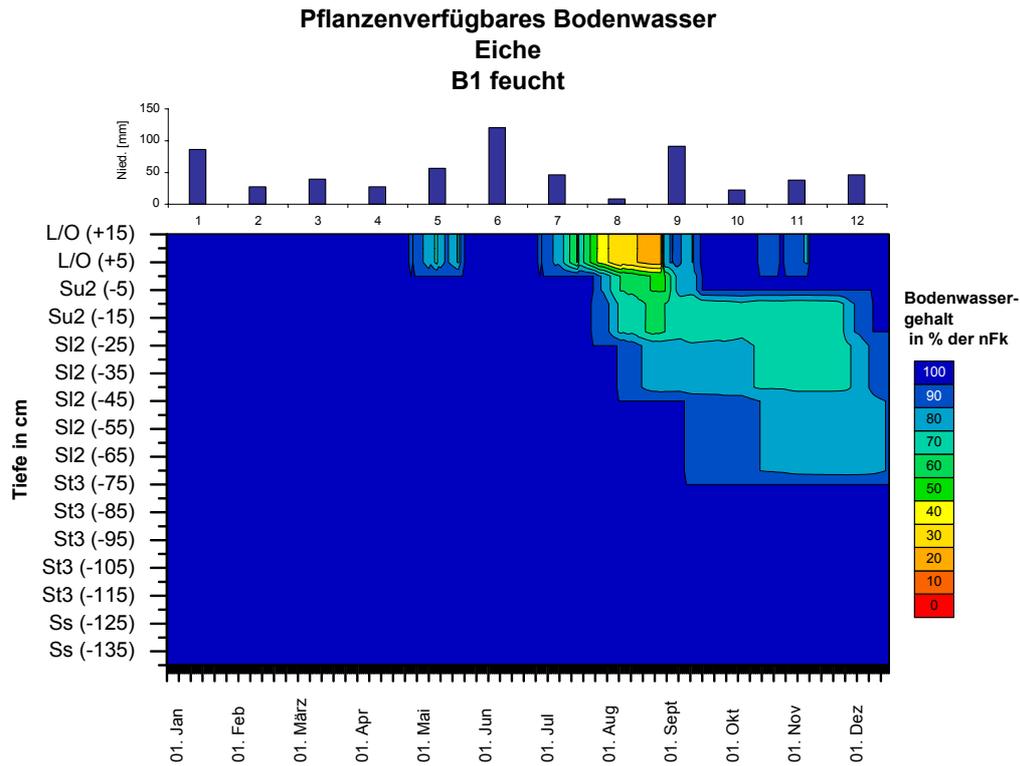
**Pflanzenverfügbares Bodenwasser  
Buche  
B1 feucht**



**Pflanzenverfügbares Bodenwasser  
Buche (ohne Eingriff)  
B1 feucht**



**Anlage XIII:** Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Buche mit (oben) und ohne (unten) waldbauliche Eingriffe im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario B1 (feuchte Variante) unter Angabe des Niederschlages.



**Anlage XIV:** Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Boden unter Eiche (oben) und Gras (unten) im trockensten Jahr der Dekade 2041-2050 im Klimaszenario B1 (feuchte Variante) unter Angabe des Niederschlages.