



Abschlussbericht zum Projekt

Risiken und Anpassungsstrategien für Wälder als Folge der prognostizierten Klimaveränderung in Sachsen-Anhalt.

<u>Projektträger:</u> Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt Postfach: 3762 39012 Magdeburg

Projektnummer: 05/A03

Projektbearbeitung: Caroline Fiebiger¹⁾ Bernd Schultze²⁾ Jörg Scherzer²⁾ Johannes Sutmöller¹⁾ Swen Hentschel¹⁾ Udo Junghans¹⁾ Heidi Döbbeler¹⁾ Henning Meesenburg¹⁾

¹⁾Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Grätzelstraße 2 37079 Göttingen ²⁾ UDATA – Umweltschutz und Datenanalyse Hans-Geiger-Straße 18
67434 Neustadt/Wstr.

INHALT

1	Einleit	Einleitung und Zielstellung4				
2	Teilpr	ojekt I: Wasserverfügbarkeit für Waldbestände in Sachsen-Anhalt	7			
	2.1	Einleitung	7			
	2.2	Methodik und Ergebnisse zur Abschätzung der zukünftigen				
		Wasserverfügbarkeit für Wälder	7			
3	Teilpr	Teilprojekt II: Wachstumsverläufe ausgewählter Waldbestände				
-	3.1	Klimawandel und Jahrringforschung	12			
	3.2	Untersuchungsflächen	12			
	3.3	Methodik	12			
	3.4	Ergebnisse	15			
	3.4.1	Autokorrelation und Sensitivität	18			
4	Teilpr	oiekt III: Wasserhaushaltsbilanzen ausgewählter Waldbestände	21			
	4.1	Einleitung	21			
	4.2	Untersuchungsflächen	21			
	4.3	Datengrundlage	23			
	4.4	Grundlagen der Wasserhaushaltsmodellierung	24			
	4.4.1	Der Wassertransport im Boden	24			
	4.4.2	Ermittlung von Wasserhaushaltsbilanzen	25			
	4.4.3	Kalibrierung und Validierung	26			
	4.4.4	Beurteilung der Güte der Simulationsergebnisse	27			
	4.4.5	Modellbeschreibung und Parametrisierung	28			
	4.5	Plausibilitätsprüfung und Lückenersatz der Messdaten	39			
	4.5.1	Niederschlag	39			
	4.5.2	Globalstrahlung	39			
	4.5.3	Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Luftfeuchte	39			
4.5.4 Bodensaug		Bodensaugspannung	39			
	4.6	Niederschlagskorrektur nach RICHTER (1995)	40			
	4.7	Wasserverfügbarkeit und Wasserstress	41			
	4.8	Plausibilitätsprüfung der Klimaszenarien	42			
	4.8.1	Statistische Bewertung der Unterschiede	42			
	4.8.2	Graphische Darstellung	42			
	4.9	Zugeordnete Klimastationen	42			
	4.10	Plausibilitatsprufung und Luckenersatz der Messdaten	43			
	4.10.1	Niederschlage	43			
	4.10.2	2 Weitere meteorologische Parameter	45			
	4.11	Wassernausnaltssimulationen	40			
4.11.1 Standort Klotze		Standort Nodlitz	40			
	4.11.4 111.4	2 Standolt Incultz	۲C کک			
	4.11.3	1 Standort Auerberg	00 79			
	4.11.4 11 I	standort Brocken	70 Q1			
	<u> </u>	S Standort Colhitz	01 84			
	4.11.0		04			

	4.11.7	7 Standort Friedrichrode			
	4.11.8	8 Standort Hasselfelde			
	4.11.9	9 Standort Ochsenkopf			
	4.11.1	10 Standort Schierke	96		
5	Teilpro	ojekt IV: Risikoanalyse	100		
	5.1	Einleitung			
	5.2	Untersuchungsgebiet			
	5.3	Datengrundlage und Methoden			
	5.3.1	Klimamodell WETTREG			
	5.3.2	Buchdruckermodell PHENIPS			
	5.3.3	Modell Kiefernprachtkäfer			
	5.3.4	Verwendete Software			
	5.4	Ergebnisse			
	5.4.1	Buchdrucker			
	5.4.2	Kiefernprachtkäfer	109		
6	Zusammenfassung114				
7	Anpas	Anpassungstrategien118			
8	Literat	Literatur			
9	9 Anhang				
	9.1	Teil Risikoanalyse			

1 Einleitung und Zielstellung

Im Zusammenhang mit dem zu erwartenden Klimawandel stellt sich für die Wälder Sachsen-Anhalts die Frage nach der Anpassungsfähigkeit der Waldökosysteme an veränderte Umweltbedingungen. Aktuellen Studien zufolge ist zu erwarten, dass die Wälder zukünftig wärmeren und vor allem während der Vegetationsperiode trockeneren Bedingungen ausgesetzt sind (BERNHOFER et al. 2008). In klimatisch sensiblen Bereichen wie Mittelgebirgen (Harz) oder auch bereits heute sehr trockenen Gebieten (östliches Harzvorland) können diese Veränderungen erhebliche Auswirkungen auf die Wälder zeigen. Neben ökonomischen Fragen wie Sicherung von Zuwächsen und Holzqualität stehen vielerorts auch Probleme bezüglich der Bestandesstabilität bis zu naturschützerischen Aspekten wie der Erhaltung von Arten oder von Bestandesstrukturen im Mittelpunkt.

Das Land Sachsen-Anhalt hat mit 24,1% bewaldeter Fläche einen im Bundesvergleich geringen Waldanteil. Die Wälder Sachsen-Anhalts umfassen ein großes Spektrum möglicher Standort- und Klimabedingungen. Sie befinden sich in Höhenlagen zwischen unter 100 m und der Waldgrenze bei über 1000 m ü. NN. Mit Jahresniederschlägen von im Mittel z. T. < 500 mm im östlichen Harzvorland gehört ein bedeutender Teil des Landes zu den trockensten Regionen Deutschlands. Im Gegensatz dazu werden in den oberen Lagen des Harzes Jahresniederschläge von über 2000 mm erreicht.

Charakteristisch für die Wälder Sachsen-Anhalts ist der hohe Kiefernanteil, der mit $\approx 46\%$ deutlich über dem Bundesdurchschnitt liegt. Für die Kiefernreinbestände bestehen bereits heute erhöhte Waldschutzrisiken, etwa durch Waldbrand oder Massenvermehrungen von Kieferngroßschädlingen. Die Ausbreitung der Fichte, mit 17% Flächenanteil die zweithäufigste Baumart in Sachsen-Anhalt, beschränkt sich vorwiegend auf die mittleren und hohen Lagen des Harzes. Der Anteil der Laubbaumarten Eiche und Buche ist mit 11% bzw. 8,5% im Vergleich zur Kiefer deutlich geringer.

Ein erheblicher Anteil der Waldfläche befindet sich in privatem Eigentum, wobei kleine Forstbetriebe überwiegen. Lediglich 27% befinden sich in Landesbesitz, 10% der Wälder sind Bundeseigentum (alle Zahlenangaben aus RÜTHER et al., 2008).

Neben der Einkommensfunktion für die Waldeigentümer liefern die Wälder der Projektregion unverzichtbare Infrastrukturleistungen. Unter anderem haben sie eine ausgleichende Wirkung auf das Lokalklima und eine verzögernde, filternde bzw. speichernde Wirkung auf den Wasserhaushalt. Sie sind besonders in der Nähe des Ballungsraums Berlin / Magdeburg / Halle ein stark frequentierter Erholungsraum und erfüllen vielfältige Naturschutzfunktionen. Die nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder der Projektregion gewährleistet die Versorgung einer Reihe sehr bedeutender, leistungsfähiger Betriebe der holzbe- und verarbeitenden Industrie, die sich auch aufgrund der sehr guten Rohstoffbasis hier angesiedelt haben.

Ein Großteil der Waldflächen in Sachsen-Anhalt ist mit besonderen Schutzfunktionen belegt, die auch eine Vielzahl der nachfolgend genannten Funktionen erfüllen:

- Schutzfunktion: Luft, Klima, Wasser (Trinkwasserschutzgebiete), Boden, Biodiversität (NATURA 2000, Nationalpark Harz, Naturschutzgebiete, Landschaftsschutz)
- Erholungsfunktion: Lebensqualität

- Nutzfunktion (Rohstoff Holz, Arbeitsplätze, Einkommen)
- Kohlenstoffspeicherung: Fixierung von CO₂ in Biomasse und Humus.

In besonderer Weise sind die Wälder in Sachsen-Anhalt Belastungen und Risiken ausgesetzt, die die nachhaltige Erfüllung der Waldfunktionen gefährden. Der Wasserbedarf von Bevölkerung und Industrie wird zu erheblichem Anteil aus Grundwasservorkommen in Waldgebieten (z.B. Colbitz-Letzlinger Heide, Hoher Fläming, Harz) gedeckt. Langfristig führt dies zu Grundwasserabsenkungen und kann, besonders im Zusammenspiel mit niedrigen Niederschlägen, zur nachhaltigen Schädigung der Wälder führen. Waldbäume, die unter Wasserstress leiden, sind anfälliger gegen Schädlingsbefall. Ein weiteres Problem sind anhaltend hohe Stickstoffbelastungen, die vor allem bei Kiefer zu Vitalitätsverlusten, aber auch zu erhöhten Nitratausträgen führen.

Eine klimatische Verschiebung zu warm-trockener Witterung mit hohen Ozonwerten (phytotoxische Wirkung) und waldgefährdenden Insektengradationen ist bereits zu beobachten. Klimaszenarien lassen eine Verstärkung dieser Ausprägung erwarten und führen zu einer ungünstigen Prognose der weiteren Waldentwicklung. Vor allem ist mit der Zunahme von sommerlichen Trockenperioden zu rechnen. Stürme bis zur Orkanstärke können sich zukünftig häufen. Hierauf muss die Forstwirtschaft durch eine entsprechende Baumartenwahl und angepasste Waldbehandlung reagieren.

Eine zentrale Rolle in der Sicherung der Bestandesstabilität spielt der Schutz vor Schadinsekten. Grundsätzlich werden Insekten durch Änderungen im abiotischen Faktorengefüge in ihrem Massenwechsel direkt als auch indirekt beeinflusst. Stammbrütende Insekten sind auf physiologisch geschwächte Wirte angewiesen. Somit werden diese von den prognostizierten Klimaänderungen profitieren (Fichte: Buchdrucker, Kupferstecher; Kiefer: Kiefernprachtkäfer). Die Gradationshäufigkeit von blatt- und nadelfressenden Insekten, die positiv auf warme Sommerwitterung reagieren, wird ebenso zunehmen (Kiefernspinner, möglicherweise auch Nonne). Durch Sturmwurf geschädigte Fichtenbestände bieten gute Vorraussetzungen für die Massenvermehrung von Borkenkäferarten.

Durch höhere Sommertemperaturen können Arten mit einer variablen temperaturabhängigen Generationsabfolge mehrere Generationen pro Jahr ausbilden (Buchdrucker an Fichte mit 1 bis 3 Generationen). Mit mehreren Generationen pro Jahr steigt ebenfalls das Gradationsrisiko.

Die genannten Problemfelder wurden in das Projekt "Risiken und Anpassungsstrategien für Wälder als Folge der prognostizierten Klimaveränderung in Sachsen-Anhalt" aufgenommen und als zentrale Arbeitsschwerpunkte der Teilprojekte formuliert. Im Projekt werden fünf Fragestellungen bearbeitet.

- Abschätzung der Wasserverfügbarkeit für Waldbestände in Sachsen-Anhalt unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen mit dem Ziel der Erstellung von Risikokarten für die Baumartenwahl
- Retrospektive Analyse des Wachstumsverlaufs ausgewählter Bestände anhand von Jahrringanalysen
- Retrospektive Simulation des Wasserhaushaltes auf den Intensivmonitoringflächen Klötze und Nedlitz, des Großlysimeters Colbitz sowie ausgewählter Boden-Dauerbeobachtungsflächen mit dem Ziel, die Wasserverfügbarkeit und Trockenstresshäufigkeiten zu bestimmen

- Abschätzung der Veränderung der Wasserverfügbarkeit und Trockenstresshäufigkeit auf den Untersuchungsflächen unter Berücksichtigung der Klimaprojektionen für Sachsen-Anhalt bis zum Jahr 2050
- Risikoanalyse für die untersuchten Waldbestände in Bezug auf Insektenkalamitäten unter Verwendung von Ergebnissen des Waldmonitorings

2 Teilprojekt I: Wasserverfügbarkeit für Waldbestände in Sachsen-Anhalt

2.1 Einleitung

Der vierte Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2007) fasst die aktuellen Ergebnisse der Klimaforschung zusammen. Es bestehen kaum noch Zweifel, dass die globale Erwärmung bereits eingesetzt hat. Unsicherheit besteht allerdings noch über das Ausmaß der erwarteten Veränderungen und ihre regionale Ausprägung (BERNHOFER et al. 2008). Dies findet Ausdruck in den verschiedenen Klimaszenarien, die von den globalen Klimamodellen gerechnet werden. Die globalen Klimamodelle bilden das zukünftige Klima auf einem Raster von ca. 200 x 200 km ab. Das statistische Klimamodell WETTREG (SPEKAT et al. 2007) erstellt auf Basis der Modellrechnungen des ECHAM5/MPI-OM regionale Klimaprojektionen für ausgewählte Stationen des Deutschen Wetterdienstes. Auf Grundlage dieser Simulationsergebnisse wurden für das Land Sachsen-Anhalt auf einem Modellgitter mit einer räumlichen Auflösung von 200 x 200 m die WETTREG-Stationsdaten in die Fläche interpoliert.

Die Klimaprojektionen lassen für Deutschland einen deutlichen Temperaturanstieg bei gleichzeitig veränderter Niederschlagsverteilung erwarten. Im Vergleich zur Klimanormalperiode 1961 bis 1990 werden die Wintermonate feuchter und deutlich wärmer, während die Sommermonate trockner und moderat wärmer ausfallen sollen. Da in Sachsen-Anhalt mit Ausnahme des Harzes die Niederschläge während der Vegetationsperiode bereits unter heutigen Klimabedingungen sehr niedrig sind, ist zu erwarten, dass in Zukunft auf vielen Standorten mit einer weiteren Verschärfung in der Wasserversorgung der Bestände gerechnet werden muss.

2.2 Methodik und Ergebnisse zur Abschätzung der zukünftigen Wasserverfügbarkeit für Wälder

Der prognostizierte Klimawandel wird sich vielfältig auf die Wälder auswirken. Die klimatische Wasserbilanz (KWB) ist eine einfache Methode, um die Wasserversorgung der Pflanzen unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen abzuschätzen (SPELLMANN et al. 2007). Die KWB ist die Differenz aus dem gefallenen Niederschlag und der Wassermenge, die die Pflanze bei uneingeschränkter Wasserverfügbarkeit verdunsten kann (potenzielle Verdunstung). Dabei wir eine einheitliche Bedeckung der Landoberfläche mit einer Grasvegetation angenommen (Grasreferenzverdunstung). Um das pflanzenverfügbare Bodenwasser (nutzbare Feldkapazität, nFk) bei der Risikoabschätzung zu berücksichtigen, wurde die nFk aus der Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:50000 (BÜK50) in einem zweiten Arbeitsschritt mit der KWB verrechnet. Allerdings liegen für zwei Kartenblätter in Sachsen-Anhalt die berechneten nFk-Werte noch nicht vor, so dass diese Fläche in die Auswertung nicht einfließen konnte.

In den vorliegenden Klimaszenarien sind insbesondere die Prognosen für die Niederschlagsentwicklung mit großen Unsicherheiten behaftet. Bei der Abschätzung des Anbaurisikos flossen deshalb Schätzungen mit vergleichsweise hohen Niederschlägen und eher geringen Niederschlägen (trockene und feuchte Variante) gleichgewichtig in die Standortbewertung ein. Für die Risikoabschätzung wurde das A1B-Szenario als derzeit wahrscheinlicheres Klimaszenario verwendet. Weitere Szenarien, wie beispielsweise das optimistische B1-Szenario, wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt, da die aktuelle Emissionsentwicklung das Eintreten dieses moderaten Szenarios für unwahrscheinlich erachten lässt. Alle Auswertungen beziehen sich auf die Vegetationsperiode (Ende April bis Anfang Oktober), wobei die Verlängerung der Vegetationsperiode für die Dekade 2041-2050 nach der Methode von MENZEL und FABIAN (1999) berücksichtigt wurde.

Das Anbaurisiko wurde bisher nur für die Fichte abgeschätzt. Für weitere Baumarten wie Kiefer, Buche oder Eiche kann das Anbaurisiko noch nicht bestimmt werden. Auf der Grundlage bisheriger Anbauerfahrungen werden drei Hauptklassen ausgewiesen. Ein sehr geringes Risiko (Klasse 1) besteht demnach auf Standorten mit einem maximalen Wasserbilanzdefizit von 100 mm in der Vegetationszeit. Hier kann der Bodenwasservorrat das Wasserbilanzdefizit i.d.R. ausgleichen. Bei einem KWB-Defizit von bis zu 250 mm können nur wasserreiche Böden die Fichte während längerer Trockenphasen ausreichend mit Wasser versorgen. Diese Standorte erhielten deshalb eine mittlere Risikoeinstufung (Klasse 3) und sollten nur in Abhängigkeit von weiteren Standortfaktoren für den Fichtenanbau in Erwägung gezogen werden. Ein hohes Risikopotential (Klasse 5) wurde den Flächen mit einem KWB-Defizit von über 250 mm während der Vegetationsperiode zugewiesen. Ein erfolgreicher Fichtenanbau über einen vollen Produktionszyklus ist auf diesen Standorten mehr als fraglich. Betrachtet man das pflanzenverfügbare Wasserangebot (KWB + nFK), reduzieren sich die zuvor für die KWB genannten Grenzwerte um 100 mm. Die Unsicherheiten der klimatischen Entwicklung müssen in der Ausprägung der Risikoklassifizierung berücksichtigt werden. Belegt man beide Varianten (trocken und feucht) des Klimaszenarios A1B mit der vorgestellten Klassifizierung, so resultieren aus der Verschneidung der Karten zwei Übergangsklassen (Klasse 2 und 4). Die Klasse 2 wird auf Flächen ausgewiesen, die bei der feuchten Variante die Risikoklasse 1 und bei der trockenen Variante die Klasse 3 erhalten. Das Risiko wird hier insgesamt noch als gering für den Fichtenanbau eingestuft. Die Klasse 4 weist dagegen auf ein erhöhtes Anbaurisiko hin und wird an Standorten mit der Klasse 3 (feuchte Variante) und Klasse 5 (trockene Variante) vergeben.



Abbildung 1: Berechnete Klimatische Wasserbilanz

In Abbildung 1 ist die KWB bezogen auf die Vegetationsperiode für das Land Sachsen-Anhalt dargestellt. Bereits unter den Klimabedingungen der Referenzperiode 1961 bis 1990 wird fast flächendeckend ein Wasserdefizit von rund 100 mm ausgewiesen. Nur die mittleren und hohen Lagen des Harzes sind durch einen Wasserüberschuss gekennzeichnet. Für die Dekade 2041 bis 2050 wird auf Grundlage des A1B-Szenarios (trockene Variante) für die gesamte Landesfläche mit Ausnahme des Brockengebietes ein hohes Wasserbilanzdefizit berechnet. Im gesamten Tiefland liegt das Defizit bei 300 mm oder sogar etwas darüber. Entsprechend hohe Defizitraten können auch nicht mehr durch die Wasserspeicherkapazitäten der Böden ausgeglichen werden.

Auf Grundlage der vorgestellten Risikoklassifizierung werden bis zum Jahr 2050 die unkritischen Fichtenanbaugebiete auf die höheren Lagen des Harzes zurückgedrängt (s. Abbildung 2). Der gesamte Tieflandbereich ist mit einem erhöhten bzw. hohen Anbaurisiko behaftet. Aber auch unter den klimatischen Bedingungen der Referenzperiode ist bereits über die Hälfte der Landesfläche für die Fichte ungeeignet. Dies betrifft den Norden und Osten des Landes Sachsen-Anhalt. Das Harzvorland und die südlichen Landesteile erhalten überwiegend ein mittleres Anbaurisiko.



Abbildung 2: Abschätzung des Anbaurisikos für die Fichte auf Grundlage der KWB

In einem zweiten Arbeitsschritt wurde das pflanzenverfügbare Bodenwasser (nFk) der BÜK50 mit der KWB verrechnet. Dabei wird die Annahme getroffen, dass der Bodenwasserspeicher zu Beginn der Vegetationsperiode vollständig gefüllt ist und den Pflanzen als zusätzlicher Wasservorrat (zum Niederschlag) zur Verfügung steht. Das Ergebnis der Berechnung zeigt im Vergleich zur KWB ein deutlich differenzierteres Bild. In der Klimanormalperiode 1961 bis 1990 weisen nun auch in Abhängigkeit vom Bodenwasservorrat viele Gebiete im Flachland einen leichten Wasserüberschuss oder nur ein geringes Wasserdefizit auf (s. Abbildung 3). Auch in der Dekade 2041 bis 2050 fällt das Wasserbilanzdefizit vielfach deutlich moderater aus. Nur wenige Gebiete insbesondere im Osten des Landes Sachsen-Anhalt sind durch hohe Defizitraten bis 300 mm gekennzeichnet.

Daraus ergibt sich, dass das Anbaurisiko für die Fichte in Zukunft zwar deutlich zunehmen wird, aber unter Berücksichtung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers auch im Tiefland auf gut wasserversorgten Standorten möglich sein wird. Dies betrifft vornehmlich das Harzvorland und die westlichen Landesteile sowie einige größere Flusstäler (s. Abbildung 4).

In Sachsen-Anhalt stellt die Trockenheit ein wesentliches Risiko für die Waldbestände dar. Hohe Wasserbilanzdefizite während der Vegetationsperiode können nur bedingt durch das pflanzenverfügbare Bodenwasser ausgeglichen werden. Der Vergleich der Wasserbilanzen für die Vegetationsperioden 1961 bis 1990 und 2041 bis 2050 zeigt, dass in Zukunft mit einer deutlich verschärften Belastung der Bestände durch Wassermangelsituationen zu rechnen ist. Auf der Grundlage bisheriger Anbauerfahrungen kann bisher nur für die Fichte eine erste Annäherung bezüglich der Risikoabschätzung getroffen werden. Weitere Hauptbaumarten, wie Buche, Kiefer und Eiche werden in absehbarer Zeit einer vergleichbaren Risikoeinstufung unterzogen.



Abbildung 3: Berechnete Klimatische Wasserbilanz und pflanzenverfügbares Bodenwasser



Abbildung 4: Abschätzung des Anbaurisikos für die Fichte auf Grundlage der KWB und dem pflanzenverfügbaren Bodenwasser

3 Teilprojekt II: Wachstumsverläufe ausgewählter Waldbestände

3.1 Klimawandel und Jahrringforschung

Jahreszuwächse werden für die Modellierung des Zuwachses von Wäldern in Abhängigkeit der jährlichen Witterungsschwankungen benötigt. Sie gewinnen als Reaktion des Waldwachstums auf Klimaänderung zunehmend an Bedeutung, wobei zwischen Zuwachsreaktionen aufgrund kurzfristiger Witterungsschwankungen und solchen aufgrund langfristiger Klimaveränderungen zu unterscheiden ist (KINDERMANN, 2009).

Die Jahrringbreite ist ein unspezifisches, integratives Merkmal, ihre Schwankungen sind beeinflusst durch die Konkurrenzsituation eines Baumes, seine phytopathologische Situation, den Alterstrend und schließlich durch die aktuelle Witterungseinwirkung.

Unter den verschiedenen Stoffwechseltypen eines Baumes nimmt die Anlagerung von Holzsubstanz eine eher nachrangige Stellung ein. Sie stellt somit den Anteil der Allokation dar, welcher nicht von Lebensvorgängen mit höherer Priorität verbraucht wurde. Aus diesem Grund kann die Jahrringbreite als Indikator der Baumvitalität betrachtet werden (SCHWEINGRUBER, 1996; DOBBERTIN, 2005; DROBYSHEV et al., 2007).

3.2 Untersuchungsflächen

Für die Analyse von Wachstumsverläufen stehen die Intensivmessflächen des Level II – Netzes Klötze und Nedlitz zur Verfügung, die typische Kiefernbestände in Sachsen-Anhalt repräsentieren (vgl. Kap. 4.1, Tabelle 1). Im Rahmen der BMELV-Trockenheitsstudie 2004 – 2008 (BECK und MÜLLER, 2007) fand 2005 eine Bohrkernentnahme statt.

3.3 Methodik

Die Bohrkernentnahmen fanden an Bäumen der Kraft'schen Klasse 1 und 2, die die von Konkurrenz kaum beeinflusste mittlere Entwicklung des herrschenden Bestandes wiedergeben, statt.

Die Analyse der Jahrringbreiten beginnt mit dem Aufbau von Jahrringchronologien. Um das Wachstumsverhalten aller beprobten Baumindividuen eines Bestandes oder Standortes im Laufe ihres Lebens zu überprüfen, wird zunächst jede einzelne Jahrringbreiten-Zeitreihe in die Zeitreihe des Durchmessers ohne Rinde überführt. Mit Hilfe von relativen Durchmesserverläufen können auffällige Abweichungen (Ausreißer) vom Durchschnitt erkannt und von der weiteren Auswertung ausgeschlossen werden. Auf der Grundlage des mittleren Durchmesser-Relativverlaufes (Abbildung 5) des herrschenden Bestandes kann das Wachstumsverhalten dargestellt und beurteilt werden (BECK, 2007).



Abbildung 5: Level II Klötze, Relativverlauf der Durchmesserentwicklung von 18 Probebäumen

Über Differenzbildung erhält man die mittlere Jahrringbreiten-Zeitreihe. Ziel ist es nun, zu einer Zeitreihe zu gelangen, die bezüglich Witterungssignalen aussagekräftig ist. Die Jahrringbreite ist von Alterstrend, Klimasignal, endo- und exogenen Störimpulsen sowie einer unerklärten Restvarianz abhängig. Die Zeitreihe ist also vom Alterstrend zu bereinigen. Weiterhin müssen auch autokorrelative Strukturen gebrochen werden. Unter *Autokorrelation* versteht man die Relation zwischen der Jahrringbreite (JRB) in einem Jahr *t* zu in der Zeitreihe vorausgegangenen Jahrringbreiten:

 $JRB_t \sim (JRB_{t-1}; JRB_{t-2}; JRB_{t-3}; JRB_{t-j}).$

Sie drückt die innere Zusammenhangstruktur einer Zeitreihe aus und gibt an, wie stark die zurückliegenden Jahrringbreiten auf die jeweils aktuellen Jahrringbreiten Einfluss haben. Die Autokorrelation zu den jeweils um ein Jahr zurückliegenden Jahrringbreiten wird Autokorrelation erster Ordnung oder AR(1) genannt. Im ökologischen Sinn kann sie als Ausdruck der Pufferfähigkeit oder Regelungsvermögen gegen äußere positive und negative Einwirkungen verstanden werden.

Als Mittel zur Unterbrechung der autokorrelativen Strukturen dient die AR(1)-Modellierung (Abbildung 6).



Abbildung 6: Level II Chronologie Klötze, Verlauf des mittleren Radialzuwachses (links) und AR(1)-Beziehung in der Zeitreihe des mittleren Radialzuwachses (rechts)

Nach der Operation 1: JRI [1] = $\frac{JRB_t}{(a+b \cdot JRB_{t-1})}$ erhält man die Jahrring-Index-Zeitreihe, die aber noch den Alterstrend enthält (Abbildung 7).



Abbildung 7: Level II Chronologie Klötze, Jahrring-Index-Zeitreihe nach AR(1)-Modellierung (Trendlinie: y = 5,878380x³-7,286273x²+2,433666x+0,815978; R² = 0,112454)

Mit Operation 2 wird auch der Alterstrend eliminiert: JRI $[2] = \frac{JRI[1]}{Trendfkt_t}$. Somit erhält man die Jahrring-Index-Zeitreihe ohne Autokorrelation und Trend (Abbildung 8).



Abbildung 8: Jahrring-Index-Zeitreihe nach AR(1)-Modellierung und Trendbereinigung

Als *Sensitivität* wird der jährliche Wechsel der Jahrringbreite bezeichnet:

$$S_{t} = \left| \frac{2 \cdot (JRB_{t} - JRB_{t-1})}{JRB_{t} + JRB_{t-1}} \right|$$

Mit diesem Parameter kann auf stark schwankende oder mehr ausgeglichene Wachstumsbedingungen geschlossen werden. Phasenweise erhöhte Sensitivität innerhalb einer Zeitreihe ist als Stressreaktion zu werten. Sowohl Autokorrelation als auch Sensitivität können für die gesamte Zeitreihe oder Abschnitte derselben berechnet werden.

3.4 Ergebnisse

3.4.1 Wachstumsverläufe und Weiserjahre

Die Wachstumsverläufe der Kiefern in Klötze und Nedlitz, hier dargestellt anhand der mittleren einzelbaumbezogenen Kreisflächenzuwächse (Abbildung 9), zeigen eine stetige Zunahme des Wachstums von Beginn der Zeitreihe im Jahr 1953 bzw. 1966 bis zum Zeitpunkt der Probenahme 2005. Die Beeinflussung des Zuwachsganges durch den Witterungsverlauf ist gut an den positiven oder negativen Weiserjahren erkennbar ("Standort-Weiserjahr": mindestens 70% aller untersuchten Bäume weisen einheitliche Zuwachsreaktionen im Vergleich zu denen des Vorjahres auf; "Regionales Weiserjahr": dasselbe Standort-Weiserjahr tritt in der Mehrheit der untersuchten Chronologien einer Baumart in einer größeren Region gleichläufig auf (SCHWEINGRUBER (1983)).



Abbildung 9: Verlauf des mittleren, einzelbaumbezogenen Kreisflächenzuwachses auf den Level II – Flächen Klötze (oben) und Nedlitz (unten)

Beide Bestände zeigen in den Jahren 1976 und 2003 übereinstimmend Wachstumseinbrüche. Das Jahr 1976 gilt wegen seiner negativen Wirkung auf alle Baumarten in weiten Regionen Europas als überregionales negatives Weiserjahr. Die Witterungsausprägung in festgestellten überregionalen Weiserjahren wurde bis in die 70iger Jahre vorwiegend durch kalte Spätwinter, danach zunehmend durch heiße Sommer mit längeren Trockenphasen ausgelöst.

Abbildung 10 zeigt die mittlere relative Jahrringbreitenänderung als Indikator für Weiserjahre. Für den Klötzer Kiefernbestand lassen sich fünf negative Weiserjahre berechnen (1969, 1976, 1989, 1996 und 2003). In Nedlitz sind ebenfalls fünf negative Weiserjahre erkennbar (1975, 1976, 1982, 1998 und 2003), und drei positive Weiserjahre (1972, 1977 und 1995).



Abbildung 10: Mittlere relative Jahrringbreitenänderung als Indikator für Weiserjahre (oben: Klötze; unten: Nedlitz)

Das Jahr 2003 war durch einen trocken-heißen Sommer gekennzeichnet. Abbildung 11 verdeutlicht die Wachstumsreaktion der Kiefer der folgenden Jahre im Vergleich zu den vorhergehenden. Nach der negativen Reaktion im Jahr 2003 deutet sich im Jahr 2004 bereits wieder eine Erholung an. In Nedlitz wird sogar das Niveau von 2002 wieder erreicht.



Abbildung 11: Mittlerer relativer Radialzuwachs der Jahre ab 2003 (Mittelwerte +/- Standardabweichung) mit den Werten des Vergleichzeitraums 1998 bis 2002 in Klötze (oben) und Nedlitz (unten)

3.4.1 Autokorrelation und Sensitivität

Wie in Kap. 3.3 erläutert enthält der Parameter der Autokorrelation ein Maß für das Puffervermögen und damit für die Stabilität eines Bestandes. Abbildung 12 macht deutlich, dass nicht nur das vorhergehende Jahr, sondern auch weiter zurückliegende Jahre Einfluss auf das Wachstum im betrachteten Jahr haben können.



Abbildung 12: Autokorrelationsfunktion (ACF) der Zeitreihe mittlerer Radialzuwachs für Klötze (oben) und Nedlitz (unten)

Die Relation von Autokorrelation (Puffervermögen) und Sensitivität (Empfindlichkeit) und ihre mögliche zeitliche Veränderung bieten einen Ansatzpunkt zur Untersuchung ökologischer Fragestellungen. Zwischen den beiden Parametern besteht eine signifikante Beziehung. Bäume mit niedriger Sensitivität weisen in der Regel eine hohe Autokorrelation auf, solche mit hoher Empfindlichkeit sind eher schwächer autokorreliert. Differenziertheit innerhalb einer Population bedeutet auch differenzierte Widerstandskraft gegenüber Stresseinwirkung (BECK, 2007).

Betrachtet man die Verläufe von Autokorrelation und Sensitivität während der gesamten Lebensspanne, so lässt sich in der Zeitreihe des mittleren Radialzuwachses (Abbildung 13) erkennen, dass die Kiefern in Klötze bis ca. 1970 eine geringe Sensitivität und große Autokorrelation aufweisen. In den 70iger Jahren hat die Sensitivität einen vorläufigen Höhepunkt, die Autokorrelation einen entsprechenden Tiefpunkt. Im Verlauf der 80iger Jahre steigt die Autokorrelation wieder an, liegt auch über der Sensitivität, die aber ebenfalls ansteigt. Mit Beginn der 90iger Jahre fallen die beiden Parameter stark auseinander. Die Sensitivität erreicht einen deutlich höheren Bereich und pendelt sich dort ein, so wie auch die Autokorrelation sich auf einem bisher nicht bekannten niedrigen Niveau ansiedelt. In Nedlitz (Abbildung 14) zeigt sich ein sehr ähnliches Bild.



Abbildung 13: Level II Klötze. Autokorrelation AR(1) und Sensitivität in der Zeitreihe des mittleren Radialzuwachses (gleitendes Zeitfenster, 11 Jahre)



Abbildung 14: Level II Nedlitz. Autokorrelation AR(1) und Sensitivität in der Zeitreihe des mittleren Radialzuwachses (gleitendes Zeitfenster, 11 Jahre)

4 Teilprojekt III: Wasserhaushaltsbilanzen ausgewählter Waldbestände

4.1 Einleitung

Wäldern kommt bei der Betrachtung von Wasserkreisläufen eine Schlüsselrolle zu. Einerseits bieten Wälder durch ihre natürlichen Filtereigenschaften beste Voraussetzungen für die Gewinnung qualitativ hochwertigen Trinkwassers, andererseits wirken sie regulierend auf die Abflussbildung und können Hochwasserspitzen effektiv ausgleichen. Diese Eigenschaften sind vor allem im Hinblick auf die Erfüllung der Wasserrahmenrichtlinie (EG 2000), zu der sich das Land Sachsen-Anhalt mit der Verordnung vom 24. August 2005 verpflichtete (GVBl. Nr. 52 vom 29.08.2005 S. 564), von höchstem Interesse, da hier auf Einzugsgebietsebene die Bewahrung bzw. Schaffung eines mengenmäßig und qualitativ guten ökologischen Zustandes der Gewässer gefordert wird. Veränderungen der Waldstruktur oder der Nutzungsintensität haben einen direkten Einfluss auf die Menge und Dynamik der Abfluss- bzw. Grundwasserneubildung. Beispielsweise kann ein Baumartenwechsel die Erhöhung der Verdunstung und damit die Reduktion der Abflussbildung zur Folgen haben, Auflichtungen der Bestände reduziert die dämpfende Wirkung auf Hochwasserereignisse und fördert oberflächennahe Abflüsse. Vor diesem Hintergrund bekommt die Waldbewirtschaftung eine neue Dimension als sensitives und effektives Instrument zur Erfüllung wasserwirtschaftlicher Auflagen.

Um die Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Wasserbilanz von Wäldern beurteilen zu können, müssen als Grundlage die Wasserhaushaltsgrößen der Standorte zum aktuellen Zeitpunkt, aber auch retrospektiv für einen repräsentativen Zeitraum (Klimanormalperiode 1961 – 1990) bekannt sein. Das Ziel des Teilprojektes III ist einerseits die retrospektive Modellierung des Wasserhaushaltes ausgewählter Waldstandorte Sachsen-Anhalts (vgl. Kap. 4.2 und 4.11), andererseits die Modellierung der zukünftigen Entwicklung an diesen Standorten unter Verwendung von Klimaszenarien (vgl. Kap. 4.11.1.3).

4.2 Untersuchungsflächen

Die Modellierung des Wasserhaushaltes wurde an ausgewählten Messflächen des Landes Sachsen-Anhalt durchgeführt (vgl. Abbildung 15).

Bei der Auswahl repräsentativer Standorte und Waldtypen konnte auf das Netz der Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) zurückgegriffen werden. Die Daten wurden vom Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt zur Verfügung gestellt. Die Auswahl erfolgte nach folgenden Kriterien:

- 1. Flächen sind Waldstandorte
- 2. Repräsentanz der wichtigsten Waldgesellschaften bzw. Landschaftsräume
- 3. Vorhandensein der für die Modellierung notwendigen Daten

Anhand dieser Kriterien wurden insgesamt 7 Bodendauerbeobachtungsflächen ausgewählt. Die Flächen unterscheiden sich infolge der Verschiedenartigkeit der Standort- und Klimabedingungen teilweise gravierend.



Abbildung 15: Lage der Untersuchungsflächen

Neben den Bodendauerbeobachtungsflächen wurde umfangreiches Datenmaterial zweier Intensivmessflächen des europaweiten Level II – Netzes ausgewertet. Beide Flächen repräsentieren einen für die planaren Gebiete Sachsen-Anhalts typischen Kiefernforst. Ebenfalls in die Untersuchungen einbezogen wurde das Großlysimeter Colbitz, das sich unmittelbar neben der gleichnamigen BDF befindet und gleichfalls mit Kiefer bestockt ist. Eine Auflistung der wichtigsten Standorteigenschaften der Flächen zeigt Tabelle 1.

Fläche	Höhe	Baumart	Bodenform	Niederschlag	Temperatur
	[m ü. NN]		(KA4, andere Angaben)	[mm/a]	[Jahresmittel, °C]
BDF Auer-	485	Buche,	Norm-Braunerde aus grus-	885	6,6
berg		Hainbu-	führendem Löss über Lehmgrus		
		che	aus Tonschieferverwitterung		
BDF Brocken	1040	Fichte	Hochmoor aus Torf über tiefem	1100 - 1500	2,5 - 5,0
			Kryolehmgeröll über sehr tiefer		
			schuttführender Löss-Fließerde		
BDF Colbitz	66	Kiefer	schwach podsolige Braunerde	594	8,8
			über tiefem glazialem Sand		
BDF Fried-	302	Buche,	(Pseudogley-) Parabraunerde aus	630	8,0
richrode		Fichte	Löss-Fließerde über tiefem grus-		
			führendem Lehm (aus Ton-		
			schiefer-Verwitterung)		
BDF Hassel-	535	Buche	Podsol-Pseudogley-Braunerde aus	929	6,4
felde			grusführendem Löss über sehr		
			tiefem Lehmgrus (Löss-Fließ-		
			erden über Tonschiefer-Ver-		
			witterungsgrus mit Lössanteil)		
BDF Och-	142	Buche,	Fahlerde-Pseudogley aus kiesfüh-	666	8,9
senkopf		Hainbu-	rendem Geschiebedecksand über		
		che,	Geschiebelehm über tiefem glazi-		
		Eiche	ärem Ton		
BDF Schierke	835	Fichte	(Podsol)	1100 - 1500	2,5 – 5,0
Level II Ned-	114	Kiefer	Podsolige Braunerde bis Podsol-	646	8,7
litz			Braunerde aus Geschiebedeck-		
			sand über Schmelzwassersand		
Level II Klöt-	88	Kiefer	mittel podsolige Braunerde aus	667	8,4
ze			Geschiebedecksand über		
			Schmelzwassersand		
Großlysime-	66	Kiefer	obersten 80cm Aushubboden der	594	8,8
ter Colbitz			obersten Bodenschicht, bis in 2m		
			Tiefe mit Mittelsand gefüllt, dar-		
			unter Grobsande und Kiese		

Tabelle 1:Standorteigenschaften der Untersuchungsflächen. Angaben für BDF nach LAGB
Sachsen-Anhalt, Dezernat Angewandte Bodenkunde

4.3 Datengrundlage

Der Datenbedarf wird durch die Erfordernisse des hydrologischen Modells vorgeschrieben. Die Daten dienen der Standortcharakteristik im Modell und gewährleisten die Modellkalibrierung sowie –validierung unter realen zeitabhängigen meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen.

Im Modell dienen Tagesmittelwerte von Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und Temperatur (zusätzlich Tagesmaxima und –minima) sowie tägliche Niederschlagssummen als meteorologischer Antrieb. Die Datenreihen stammen von Niederschlags- und Klimastationen des DWD.

Für die Kalibrierung konnte auf Sickerwasserdaten des Großlysimeters Colbitz (Zeitraum 1974 – 2005), Bodenfeuchte- und saugspannungsdaten der Flächen Nedlitz und Klötze (Zeitraum 1998 – 2008) sowie Interzeptionsdaten der drei oben genannten Flächen zu-

rückgegriffen werden (vgl. Kap. 4.4.3 und 4.4.4). Für die Fläche Klötze konnten Daten des Luftüberwachungssystems Sachsen-Anhalt (LÜSA) genutzt werden.

Die Modellrechnung zukünftiger Entwicklung der Wasserbilanzen an ausgewählten Standorten erfolgte anhand der WETTREG-Simulationsdaten für 2021 – 2050 (A1B trockene und feuchte Varianten, B1 trockene und feuchte Varianten) in täglicher Auflösung. Zur bodenkundlichen Beschreibung der Standorte wurden Angaben der Profildatenbank des DBF-Programmes des Landes Sachsen-Anhalt (LAGB), Bodeninformationen aus dem Level II-Programm des Landes Sachsen-Anhalt und aus der Literatur (Großlysimeter Colbitz: DEUTSCHMANN ET AL., 2001) verwendet.

Die Parametrisierung der Waldbestände erfolgte auf Grundlage ertragskundlicher Aufnahmen im Rahmen der BDF- und Level II-Programme und aus Literaturquellen (Großlysimeter Colbitz: DEUTSCHMANN ET AL., 2001). Aus diesen Angaben wurden mit Hilfe des WaldPlaners – einem auf BWINPro bzw. TreeGrOSS1 aufbauenden Einzelbaumsimulator – die für das hydrologische Modell benötigten Größen abgeleitet (vgl. Kap. 4.4.5.9).

4.4 Grundlagen der Wasserhaushaltsmodellierung

4.4.1 Der Wassertransport im Boden

Zur prozessorientierten Beschreibung des Wassertransports im Boden ist das sogenannte Potenzialkonzept allgemein anerkannt (HILLEL 1980, FEDDES ET AL. 1988, HARTGE und HORN 1999). Die grundlegende Gleichung hierfür fand bereits im Jahr 1856 der französische Ingenieur Darcy. Er drückte einen auf eine definierte Querschnittsfläche bezogenen laminaren und stationären Wasserfluss als Folge eines hydraulischen Potenzialgradienten aus:

$$J = -K \cdot \operatorname{grad} \psi_h$$

Gleichung 1

mit:	<i>J</i> :	Flussdichte [LZ ⁻¹]
	${oldsymbol{arphi}}_h$:	hydraulisches Potenzial, $\psi_h = \psi_m + \psi_g$
	ψ_m :	Matrixpotenzial [L]
	ψ_g :	Gravitationspotenzial [L]
	grad ψ_h :	Gradient des hydraulischen Potenzials in allen drei Raumrichtungen
		[-]
	<i>K</i> :	hydraulische Leitfähigkeit [LZ-1]

Unter Einbeziehung der Kontinuitätsgleichung (Gleichung 2), welche besagt, dass die zeitliche Änderung des volumetrischen Wassergehalts (θ) gleich der räumlichen Änderung der volumetrischen Wasserflussdichte (J) über einen infinitesimal kleinen Zeit- und Volumenabschnitt ist, und eines Quellen- und Senkenterms erweiterte RICHARDS (1931) das Darcy - Gesetz auf instationäre Verhältnisse:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \operatorname{div} J$$
 Gleich

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \operatorname{div} \left(K_{(\theta)} \cdot \operatorname{grad} \psi_h \right) - S_{(x,y,z,t)}$$

 θ : Wassergehalt [L³L⁻³] mit: Senkenterm in den drei Raumrichtungen [Z⁻¹] $S_{(x,y,z,t)}$:

Für Standorte mit hohen hydraulischen Leitfähigkeiten, an denen gesättigte Wasserverhältnisse kaum auftreten, wird Gleichung 3 in der Regel auf die eindimensionale Form

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{(\theta)} \frac{\partial \psi_m}{\partial z} + 1 \right] - S_{(z,t)}$$
Gleichung 4

 $S_{(z,t)}$: Senkenterm eindimensional [Z⁻¹] mit:

reduziert, da hier der Sickerwasserfluss in der Regel vertikal erfolgt (BRAHMER 1990).

4.4.2 Ermittlung von Wasserhaushaltsbilanzen

Grundlage für die Berechnung ist die so genannte Wasserbilanzgleichung (Gleichung 5, BAUMGARTNER und LIEBSCHER 1990, verändert), in welcher sich die Speicheränderung aus der Differenz zwischen Niederschlag einerseits und Evapotranspiration und Abflüssen andererseits ergibt.

$$P = E_I + E_E + E_T + R_O + R_U + \Delta S$$

mit: P: Niederschlag [LZ⁻¹]

> Evapotranspiration $[LZ^{-1}]$, Indices: I = Interzeption, E = Evaporation, E:

- T = Transpiration
- *R*: Abfluss [LZ⁻¹], Indices: O = Oberflächenabfluss, U = Tiefensickerung
- ΔS : Speicheränderung [LZ⁻¹]

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zur Berechnung der Wasserhaushaltsbilanzen Messwerte des Niederschlags eingesetzt. Die Interzeption konnte sowohl über den Vergleich von Freiland- und Bestandesniederschlägen (Messwerte Nedlitz, Klötze) als auch durch Modellsimulationen ermittelt werden. Die Berechnung der Evaporation und der Transpiration erfolgte mit Hilfe der Penman-Monteith-Gleichung (Gleichung 8). Bodenwasserflüsse

ung 2

Gleichung 3

Gleichung 5

und als Resultat davon die Tiefensickerung wurden auf Grundlage der Richards-Gleichung (Gleichung 4) simuliert. Oberflächenabflüsse können sich im Modell in geringem Ausmaß durch eine verringerte Infiltrationskapazität während Frostphasen ergeben. Speicheränderung und Tiefensickerung wurden jeweils für 0 – 300 cm bzw. in 300 cm berechnet. In dieser Tiefe traten an keinem Standort mehr Wurzelwasserentzug oder kapillarer Aufstieg auf. Die mit Gleichung 5 ermittelte Speicheränderung wurde durch einen Vergleich der Bodenwasservorräte zu Beginn und Ende eines Bilanzierungszeitraums überprüft.

4.4.3 Kalibrierung und Validierung

Die Notwendigkeit einer Kalibrierung von Modellen ergibt sich aus dem Umstand, dass zwischen dem realen System und dem Modell sowohl ein zeitlicher als auch räumlicher Skalenunterschied besteht (BEVEN 1993, ZIMMERMANN 1995), und der Tatsache, dass ein Modell niemals alle in der Natur ablaufenden Prozesse in ihrer vollen Komplexität widerspiegeln kann.

Der zeitliche Skalenübergang beruht auf den Limitationen bei der Aufzeichnung von Messdaten im Gelände, welche nicht in Echtzeit erfolgen, sondern stets Mittel- oder Summenwerte für diskrete Zeitabschnitte sind, und auf den Grenzen der Rechenleistung von Computern. Der räumliche Skalenübergang ist darauf zurückzuführen, dass ein in einer diskreten Messtiefe erfasster Parameter im Modell stets als repräsentativ für ein definiertes Kompartiment erscheint. BEVEN (1993) verwirft in diesem Zusammenhang den Begriff eines definierten numerischen Wertes für ein Parameteroptimum und schlägt stattdessen einen "optimalen Parameterbereich" vor. Dies impliziert die Annahme, dass es möglicherweise keine eindeutige, sondern mehrere äquivalente Lösungen gibt.

Fragestellungen in der Bodenhydrologie stehen vielfach vor dem Dilemma, dass die entscheidende unabhängige Messgröße, die Tiefensickerung (BOUTEN 1995), im Freiland kaum bestimmt werden kann, ohne das System zu stören. Eine Überprüfung von Tiefensickerungen ist lediglich auf der Ebene von Einzugsgebieten in Form von Quellschüttungen oder Gewässerpegeln möglich. Selbst dabei können Unsicherheiten aufgrund mangelnder Abgrenzbarkeit von Einzugsgebieten verbleiben.

In der Praxis wird daher meist auf die Saugspannung zurückgegriffen (z. B. BOUTEN 1992, SCHAAF 1992, LISCHEID 1995, ZIMMERMANN 1995). Diese Größe lässt sich durch Tensiometer relativ einfach *in-situ* bestimmen. Gegenüber dem Bodenwassergehalt hat dies den Vorteil einer theoretischen Untermauerung durch das Darcy-Gesetz bzw. die Richards-Gleichung, in welchen Bodenwasserflüsse als Folge von Potenzialgradienten und nicht von Wassergehalten entstehen. Darüber hinaus gibt es bei der Wassergehaltsmessung nach wie vor ungelöste methodische Probleme. Der Bodenwassergehalt als Vergleichsgröße bietet demgegenüber den Vorteil, dass relative Veränderungen des Messwerts unmittelbare Informationen über das sich bewegende Wasservolumen liefern.

Der Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Tensionen oder Wassergehalten ist allerdings insofern kein unabhängiges Ergebnis, als die Messwerte in der Regel bereits zur Anpassung von Modellparametern benutzt wurden. Er zeigt aber, inwieweit ein Modell in der Lage ist, nach bestmöglicher Anpassung die Kurvenverläufe abzubilden. Für eine Bilanzierung des Wasserhaushalts von Ökosystemen insgesamt ist eine möglichst gute Übereinstimmung in der größten Untersuchungstiefe am wichtigsten, da die hier beobachteten Tensions- oder Wassergehaltsverläufe Resultat der oberhalb stattfindenden Prozesse sind. Tensionsverläufe in der durchwurzelten Zone liefern Informationen darüber, ob transpirationsbedingte Wurzelwasseraufnahme, Bodenwasserfluss und Speicheränderung gleichzeitig richtig nachvollzogen werden.

Es kann versucht werden, dieses Dilemma zu umgehen, indem nur ein Teil des Zeitraums, für den Messungen vorliegen, zur Kalibrierung von Modellparametern herangezogen wird. Für den restlichen Untersuchungszeitraum liegen dann unabhängige Messungen vor.

Als Kalibrierparameter werden vielfach die hydraulische Leitfähigkeitsfunktion (z. B. BLOMBÄCK ET AL. 1995) und der Wasserentzug durch Pflanzenwurzeln in verschiedenen Bodentiefen herangezogen (z. B. ZIMMERMANN 1995). Der tiefenabhängige Wurzelwasserentzug stellt in der Richards-Gleichung (Gleichung 4) den Quellen- und Senkenterm dar und ist auf der rechten Gleichungsseite nach Bestimmung der Materialeigenschaften die letzte Unbekannte. Da eine experimentelle Bestimmung des Wurzelwasserentzugs in einzelnen Bodenkompartimenten in der Regel nicht durchgeführt werden kann und vorliegende Daten über Wurzelverteilungen nur erste Anhaltspunkte über den tatsächlichen Wasserentzug liefern können, bietet sich diese Variable als weiterer Kalibrierparameter an.

An den im Rahmen des vorliegenden Berichtes untersuchten Standorten Klötze und Nedlitz liegen langjährige Messwerte des Bestandesniederschlages und der Bodensaugspannung vor. Für das Großlysimeter Colbitz liegen gemessene Sickerwasserausträge vor. An den weiteren Dauerbeobachtungsflächen wurden unkalibrierte Modelläufe durchgeführt.

4.4.4 Beurteilung der Güte der Simulationsergebnisse

Nach erfolgter Auswahl der Vergleichsgrößen stellt sich die Frage eines geeigneten Gütekriteriums zur Beurteilung der Übereinstimmung zwischen Simulation und Messgröße. Statistische Verfahren, wie die Bestimmung des *root-mean-square*-Wertes (RMS), also der Wurzel der quadratischen Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Tensionen oder die Ermittlung von Korrelationskoeffizienten, werden häufig verwendet (ABA-BOU ET AL. 1992, JANSSEN und HEUBERGER 1995, BIEMELT 2001), besitzen jedoch ein nur limitiertes Aussagevermögen, da sie Prozesse im Boden ignorieren (LISCHEID 1995): Kleine Abweichungen von Matrixpotenzialen im feuchten Bereich beispielsweise haben immense Auswirkungen auf Wasserflüsse, große Abweichungen im trockenen Bereich wirken sich hingegen kaum aus.

Wichtig für die Anpassung eines Modells ist neben einer rein statistischen Betrachtung vor allem, dass das zeitliche Muster des Messwertverlaufes möglichst exakt wiedergegeben wird (SOROOSHIAN und GUPTA 1993). Insbesondere bei Matrixpotenzialen sind Abweichungen in der Steigung der Saugspannungskurve kritischer zu bewerten als Abweichungen der Absolutwerte innerhalb gewisser Grenzen (LISCHEID 1995). WHITMORE (1991) sowie JANSSEN und HEUBERGER (1995) weisen außerdem daraufhin, dass auch die Art, Menge und Qualität der gemessenen Daten entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der Simulation haben.

Bisher ist es noch nicht gelungen, objektive Kriterien für die Berücksichtigung des hier aufgezeigten Faktorenkomplexes festzulegen (BEVEN 1993, BOUTEN 1995). Der Erfolg einer Kalibrierung ist daher nach wie vor entscheidend abhängig von einem möglichst optimalen Zusammenspiel von Fachkenntnissen des Anwenders (BOTTERWEG 1995), seinen zeitlichen und finanziellen Ressourcen sowie der Rechenleistung seines Computers (JANSSEN und HEUBERGER 1995).

Aus den dargelegten Gründen wurde in der vorliegenden Arbeit auf eine Heranziehung statistischer Kriterien zur Beurteilung der Simulationsgüte verzichtet.

4.4.5 Modellbeschreibung und Parametrisierung

4.4.5.1 Modellauswahl

Es existieren zahlreiche Modelle zur Simulation des ökosystemaren Wasserhaushalts. In recherchierbaren Datenbanken den über Internet der Universität Kassel (http://www.dino.wiz.uni-kassel.de/ecobas.html), ETH Zürich der (http://www.baum.ethz.ch/ihw/soft/welcome.html) oder der US-amerikanischen Umweltbehörde EPA (http://www.epa.gov/ada/mdb_form.html) werden beispielsweise mehrere hundert Ökosystemmodelle aufgelistet, hierunter eine große Anzahl von Wasserhaushaltsmodellen. Eine Übersicht über häufig verwendete Wasserhaushaltsmodelle in der Forsthydrologie geben z. B die Zusammenstellung von HÖRMANN und SCHMIDT (1995) oder die Modellvergleiche von TIKTAK und VAN GRINSVEN (1995) sowie HÖRMANN und MEESENBURG (2000).

Vorliegende Modelle unterscheiden sich zunächst grundsätzlich in der Implementierung des Bodenwasserhaushalts: Bei der einfachsten Variante, den so genannten Speichermodellen, besteht der Boden aus einer oder mehreren linear gekoppelten Speicherzellen. Diesen Ansatz verfolgen z. B. FOREST-BCG (RUNNING und COUGHLAN 1988, RUNNING und GOWER 1991) oder SIMPEL (HÖRMANN 1997). Stärker prozessorientierte Modelle beschreiben die Wasserbewegung im Boden in der Regel durch die Richards-Gleichung (Gleichung 3). Zu dieser Gruppe gehören z. B. BROOK90 (FEDERER und LASH 1978, FEDE-RER 1995), HYDRUS (VOGEL ET AL. 1996), COUPMODEL (JANSSON und HALLDIN 1979, JANSSON 1996) und WHNSIM (HUWE und VAN DER PLOEG 1988, HUWE 1990). Die Lösung des numerischen Gleichungssystems erfolgt hier meist durch ein Finite-Differenzen-Verfahren. Die z. B. bei HYDRUS verwendete Finite-Elemente-Lösung zeichnet sich demgegenüber durch höhere Rechengeschwindigkeiten aus, die Massenbilanztreue ist allerdings nicht vollständig gewährleistet und die Gefahr numerischer Instabilität ist wesentlich größer. Unterschiede bestehen auch bei der Berechnung der Evapotranspiration: So erfordert HYDRUS eine externe Ermittlung der potenziellen Evapotranspiration, während die anderen hier aufgelisteten Modelle unterschiedlich formulierte Ansätze nach Penman-Monteith (Gleichung 8) verwenden.

Die Interzeptionsberechnung erfolgt vielfach mit Hilfe eines physikalisch basierten Speichermodells (z. B. BROOK90, SIMPEL, COUPMODEL). WHNSIM verwendet dagegen eine empirische Beziehung nach Hoyningen-Huene (1983), und HYDRUS verfügt über kein eigenes Interzeptionsmodul. HYDRUS, WHNSIM und COUPMODEL ermöglichen darüber hinaus auch eine simultane Simulation des Wasser- und Wärmehaushalts von Böden. Für die Fragestellung des im vorliegenden Arbeitsbericht dokumentierten Projektes wurde schließlich das Modell LWF-BROOK90 bevorzugt. Dieses verfügt über Module für alle relevanten Teilprozesse. So kann wie gefordert die dynamische Bestandesentwicklung simuliert werden (5-jährliche bzw. in Initialphase auch höhere zeitliche Dynamik). Ebenfalls ist die Simualtion dynamischer Vegetationsperioden mit dem Ansatz nach MENZEL und V. WILPERT (????) möglich. Die Bestände/Vegetation sind einschichtig parametrisiert. BROOK90 benötigt als zusätzliche treibende Variable tägliche Maxima und Minina der Lufttemperatur (Tmin, Tmax).

Zum besseren Verständnis der weiteren Ausführungen soll in den folgenden Abschnitten kurz auf die Implementierung der wichtigsten Teilprozesse im Modell LWF-Brook90 eingegangen werden. Eine ausführlichere Beschreibung der gesamten Modellstruktur findet sich unter "http://home.roadrunner.com/~stfederer/brook/compassb.htm".

4.4.5.2 Interzeption

In BROOK90 wird zur Berechnung der Interzeption eine vereinfachte Version des Modells von RUTTER ET AL. (1972) verwendet. Dazu wird ein Interzeptionsspeicher für Regen und Schnee, jeweils für Krone und Stamm, eingeführt. Der Input für diesen Speicher ist ein bestimmter Anteil des Niederschlags, der als proportional zum Blattflächen- (LAI) und Stammflächenindex (SAI) angenommen wird. Die entsprechenden 4 Proportionalitätsfaktoren für LAI und SAI jeweils für Regen und Schnee sind empirisch (Gleichung 6, Gleichung 7).

$$R_{Int} = (FRL_{Int} \cdot LAI + FRS_{Int} \cdot SAI)R$$
 Gleichung 6

$$S_{Int} = \left(FSL_{Int} \cdot LAI + FSS_{Int} \cdot SAI\right)S$$

Gleichung 7

- mit: *R*_{Int}: Interzeptionsspeicher für Regen [L]
 - Sint: Interzeptionsspeicher für Schnee [L]
 - R Regen [L]
 - *S* Schnee [L]
 - LAI Blattflächenindex
 - SAI Stammflächenindex
 - *FRLInt*: catch fraction
 - *FSL*_{Int}: Nettostrahlung [MZ⁻¹]
 - *FRS*_{Int}: Nettostrahlung [MZ⁻¹]
 - *FSS*_{*int*}: Nettostrahlung [MZ⁻¹]

Aus dem Interzeptionsspeicher wird Wasser durch die Evaporation entnommen. Der Wert für die Interzeptionsevaporation entspricht dabei der potenziellen Transpiration des Bestandes ohne Berücksichtigung eines Bestandeswiderstands, rc=0. Führt ein Nettoinput,

d.h. aufgefangener Niederschlag minus Interzeptionsevaporation, zum Überschreiten des maximalen Interzeptionsspeichers, infiltriert der Überschuss in den Boden. Der BROOK90 Standardwert für den maximalen Interzeptionsspeicher pro Einheit LAI und SAI ist 0,25 mm für Regen und 1,0 mm für Schnee. Die Standardwerte für den Anteil des Niederschlags, der zunächst auf Krone und Stamm fällt, sind, wieder pro Einheit LAI oder SAI, 0,12 für Regen und 0,08 für Schnee.

4.4.5.3 Potenzielle Evapotranspiration

In BROOK90 wird die Verdunstung vom Boden (Evaporation) und von einem einschichtigen, homogenen Pflanzenbestand (Transpiration) separat betrachtet. Um die potenzielle, d.h. allein klimatisch bedingte, Evaporation E_p und Transpiration T_p zu berechnen, wird das Modell von SHUTTLEWORTH und WALLACE (1985) benutzt, welches für beliebige Kombinationen aus E_p und T_p gilt. Dieses Modell basiert auf den Ansätzen von PENMAN (1948) für einen brachen Boden und Penman-Monteith (Gleichung 8, MONTEITH 1965) für einen dichten Bestand.

$$\lambda E_{E} = \frac{\Delta (R_{n} - B) + \rho_{i} c_{p} (e_{s} - e) / r_{a}}{\Delta + \gamma (r_{s} + r_{a}) / r_{a}}$$
Gleichung 8

mit: λ : spezifische Verdampfungswärme von Wasser [LZ⁻²] (= 2,45*10⁶ J kg⁻¹ bei 20°C)

- *EE*: verdunstendes Wasservolumen pro Fläche $[LZ^{-1}]$
- *R*_n: Nettostrahlung [MZ⁻¹]
- *B*: Boden-Wärmeflussdichte [MZ⁻¹]
- Δ : Steigung der Kurve des Sättigungsdampfdrucks [ML⁻¹Z⁻²T⁻¹]
- ρ *r*. Dichte der Luft [ML⁻³]
- γ : Psychrometer-Konstante [ML⁻¹Z⁻²T⁻¹]
- $\begin{array}{ll} {\it C_{P}}: & \mbox{Wärmekapazität von Luft bei konstantem Druck } [L^2Z^{-2}T^{-1}] \\ & (= 1010 \mbox{ J kg}^{-1} \mbox{ K}^{-1} \mbox{ für Standardbedingungen}), \end{array}$
- *e*: Dampfdruck der Luft [ML⁻¹Z⁻²]
- es: Sättigungsdampfdruck der Luft bei der jeweiligen Temperatur [ML⁻¹Z⁻²]
- *r*_a: aerodynamischer Widerstand [L⁻¹Z], Funktion des Windprofils
- *rs*: Bestandes-, Oberflächen- oder stomatärer Widerstand [L⁻¹Z]

4.4.5.4 Potenzielle Evaporation

Von der Bodenoberfläche bis zur mittleren Bestandeshöhe gilt der aerodynamische Widerstand ras, von dort bis zur Referenzhöhe in der Atmosphäre der Widerstand raa. Letzter ist bereits in der Penman-Gleichung enthalten. Wesentliche Parameter, um raa zu berechnen, sind neben der Windgeschwindigkeit die Rauhigkeitslänge der Oberfläche und die Verschiebungslänge für das (angenommene) logarithmische Windprofil. Die letzten beiden Parameter werden aus der mittleren Höhe der Hindernisse (hier die Bestandesoberhöhe) abgeschätzt. Die in BROOK90 dazu verwendeten empirischen Beziehungen folgen im wesentlichen BRUTSAERT (1982). Der Widerstand ras wird ähnlich, mit entsprechenden Parametern für die Bodenoberfläche, berechnet. In der Regel liegt keine Messung der Windgeschwindigkeit im Bestand vor. Der Extinktionskoeffizient für die Eddy Diffusivität (BRUTSAERT 1982), der die Form des Windprofiles bestimmt, wird deshalb meist nur geschätzt. Für die Reduktion der Evaporation, wenn der Boden austrocknet, verwendet BROOK90 einen Bodenwiderstand rss. Dabei wir angenommen, dass Wasser an einer Grenzschicht im Boden in die Gasphase übergeht und von dort zur Bodenoberfläche diffundiert. Theoretisch müsste diese Grenzschicht mit zunehmender Austrocknung des Bodens in die Tiefe wandern und rss mit dem Diffusionsweg ansteigen. Bei der Simulation mit BROOK90 entspricht der Diffusionsweg konstant der halben Dicke der obersten Schicht, denn von der zweitobersten bis zur obersten Schicht wird der Wassertransport bereits mit der Richards-Gleichung (Gleichung 12) beschrieben. Die Reduktion von rss erfolgt in BROOK90 über das Matrixpotential ψ_m nach:

$$r_{ss} = r_{ss}^* \cdot \frac{\psi_m}{\psi_m^*}$$
 Gleichung 9

wobei ψ_m^* das Matrixpotential bei Feldkapazität ist und rss* der Bodenwiderstand bei ψ_m^* , rss*=rss*(ψ_m^*). Die Feldkapazität wird in BROOK90 über die hydraulische Leitfähigkeit K definiert (üblicherweise bei K=2 mm d⁻¹). Ist die oberste Schicht relativ dünn, trocknet sie auch schnell aus. Für die Evaporation wird dann der Bodenwassertransport zur obersten Schicht limitierend. In diesem Fall ist die empirische, schlecht definierte Beziehung (Gleichung 9) von geringerer Bedeutung.

4.4.5.4.1 Potenzielle Transpiration

Der Wasserdampf entsteht in den Interzellularen und hat als ersten Widerstand rs die Stomata zu überwinden. Dieser Widerstand wird als Funktion der Strahlungsintensität, der Temperatur und des Dampfdruckdefizits (VPD) definiert und beschreibt indirekt, wie weit die Stomata geöffnet sind. Generell wird rc klein, wenn die Strahlungsenergie hoch ist, die Temperaturen sich in einem Optimalbereich befinden und das Dampfdruckdefizit der Luft klein ist. Der stomatäre Widerstand schwankt je nach Umgebungsbedingungen zwischen einem minimalen und einem maximalen Wert. Da die Strahlung mit jeder passierten Blätterschicht (durch Absorption) abnimmt, nimmt rc entsprechend zu. Um einen Bestandeswiderstand re zu erhalten, muss deshalb der stomatäre Widerstand über alle Blattschichten integriert werden. Dazu muss der Verlauf der Strahlungsextinktion beim Passieren der Kronen bekannt sein. Geht man von einer zufälligen Verteilung der Blattelemente aus, folgt die Strahlungsextinktion dem Beer'schen Gesetz, wonach die durchgelassene Strahlung mit steigenden Blattflächenindex exponentiell abfällt. Die Intensität dieses Abfalls wird durch einen Ratenparameter, den Lichtextinktionskoeffizienten, beschrieben. Werte für diesen Koeffizienten liegen zwischen 0,4 und 0,7. Über die Lichtextinktion wird auch berechnet, welche Anteile der Strahlungsenergie für die potenzielle Evaporation und welche für die potenzielle Transpiration zur Verfügung stehen. Nach den Stomata passiert der Transpirationsstrom die laminare Grenzschicht der Blätter. Der entsprechende Widerstand rac hängt wie ras von den Windverhältnissen im Bestand ab, zusätzlich aber noch vom Blattflächenindex und der mittleren Blattbreite. Hat der Transpirationsstrom die laminare Grenzschicht der Blätter hinter sich gelassen, erfährt er auf dem Weg zur Referenzhöhe in der Atmosphäre über dem Bestand denselben Widerstand raa wie der Evaporationsstrom.

Wesentliche Vegetationsparameter sind der Blattflächenindex, der minimale stomatäre Widerstand (oder dessen Kehrwert), die maximale stomatäre Leitfähigkeit, der Lichtextinktionskoeffizient und die Bestandeshöhe. Für geneigte Standorte passt BROOK90 automatisch die Globalstrahlung nach der Methode von SWIFT (1976) an.

Die Shuttleworth-Wallace und Penman-Monteith Modelle sind wegen ihrer physikalischen Grundlage prinzipiell unbeschränkt übertragbar und können durchaus als internationaler Standard angesehen werden (LAFLEUR und ROUSE 1990, STEINER ET AL. 1991, STANNARD 1993, WIGMOSTA ET AL. 1994, FARAHANI und BAUSCH 1995, FEDERER ET AL. 1996).

4.4.5.5 Wurzelwasseraufnahme

Die Aufnahme von Bodenwasser durch Pflanzenwurzeln ist ein wichtiger Prozess, um zu beurteilen, ob ein Standort eine Pflanze gut mit Wasser versorgen kann und so ihr Wachstum nicht einschränkt. Offensichtlich sind verschiedene Spezies unterschiedlich effektiv, was die Nutzung der Bodenwasservorräte angeht. Ähnlich wie bei der Bodenwasserbewegung, wird der Wasserfluss durch die Pflanze mithilfe von Potentialen und Potentialgradienten als antreibende Kräfte beschrieben. Da BROOK90 ein 1dimensionales Modell ist, müssen in der Realität 3-dimensionale Prozesse durch einfachere, 1-dimensionale Beschreibungen abgebildet werden. Der Wasserfluss aus dem Boden zu einer einzelnen Wurzel hin wird in BROOK90 mit dem Single Root Modell (COWAN 1965, HILLEL 1998) beschrieben. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die Wurzeln in der Wurzelzone gleich verteilt sind. Für eine bestimmte Wurzellängendichte (Länge der Wurzeln pro Volumen Boden) ergibt sich damit der Radius des Einzugsgebiets einer einzelnen Wurzel. Unter der weiteren Annahme eines konstanten Wasserflusses zur Wurzel hin kann man die mikroskopische Verteilung der Matrixpotentiale um die Wurzel berechnen. Aus dieser Verteilung, der Wurzellängendichte und der aktuellen, mittleren hydraulischen Leitfähigkeit lässt sich ein Rhizosphärenwiderstand berechnen. Dieser Widerstand wächst mit abnehmender Leitfähigkeit wegen der geringeren Flüsse und mit abnehmender Wurzellängendichte wegen des längeren Transportwegs zur Wurzel. Daneben wird ein Pflanzenwiderstand einbezogen, der sich aus einem unterirdischen (proportional zur Wurzellänge) und einem oberirdischen Widerstand zusammensetzt. Alle unterirdischen Widerstände werden parallel geschaltet und der unterirdische Gesamtwiderstand berechnet. Ober- und unterirdischer Widerstand ergeben zusammen den Gesamtwiderstand. Die maximale Wassernachlieferungsrate wird schließlich aus der maximalem Potentialdifferenz, dem mittleren Potential im Wurzelraum minus dem minimalen Blattpotential minus dem Gravitationspotential in Kronenhöhe, und dem Gesamtwiderstand berechnet. Die aktuelle Transpiration ist der geringere Wert von der potenziellen Transpiration und der maximalen Wassernachlieferungsrate. Das minimale Blattpotential definiert gleichzeitig das minimale Potential im Boden, bis zu welchem die Pflanze Wasser aufnehmen kann. Die Wasserentnahme für die Transpiration aus einer einzelnen Schicht wird im Wesentlichen durch den Anteil des lokalen Widerstands am unterirdischen Gesamtwiderstand bestimmt. Diese Beschreibung der Wurzelwasseraufnahme ermöglicht eine potenziell vollständige Kompensation, wenn einzelne Bereiche des Wurzelraums kein pflanzenverfügbares Wasser mehr enthalten. Der gesamte Transpirationsbedarf könnte so von einigen wenigen Wurzeln gedeckt werden, solange diese ausreichend mit Wasser versorgt sind. Dies ist bei anderen, weit verbreiteten Ansätzen nicht der Fall (FEDDES ET AL.1974).

Ausschlaggebend für den Wasserentzug in verschiedenen Bodentiefen ist die Wurzelverteilung. Bei den hier untersuchten Standorten gibt die Profilaufnahme Hinweise zur Durchwurzelung Die Durchwurzelungsintensitäten nach AG Boden (1994) wurden direkt in LWF-Brook90 übernommen. Als maximale Wurzellänge wurden 3000 m/m² angenommen. Durch eine Normierung des Ergebnisses (Summe der Feinwurzeln = 1) wird der Wurzelanteil für jedes Kompartiment durch LWF-Brook90 ermittelt.

4.4.5.6 Bodenwassermodell

Der Wassertransport wird in LWF-Brook90 mit einer eindimensionalen Richards-Gleichung (Gleichung 4) berechnet, welche mit Hilfe eines expliziten Finite-Differenzen-Näherungsverfahrens gelöst wird. Zur Lösung des Gleichungssystems müssen insbesondere die Beziehungen zwischen Wassergehalt und Saugspannung (pF-Kurve) sowie die hydraulische Leitfähigkeitsfunktion (K_(Θ)), die so genannten Materialfunktionen, bestimmt werden.

4.4.5.6.1 pF-Kurven

Die Parametrisierung der pF-Kurve folgt in LWF-Brook90 wahlweise einem modifizierten Ansatz von BROOKS und COREY (1964) oder dem Konzept von VAN GENUCHTEN (1980). BROOKS und COREY (1964) schlugen für den intermediären Bereich der Retentionskurve eine einparametrige exponentielle Beziehung zwischen Saugspannung und Wassergehalt des Bodens vor:

$$S_e = \left(\frac{\psi}{\psi_a}\right)^{-\lambda}$$

Gleichung 10

mit: S_e : effektive Sättigung [-]

 ψ : Saugspannung [L]

 ψ_a : Lufteintrittspunkt [L]

 λ : Porengrößenverteilung [-]

Die effektive Sättigung $S_{\scriptscriptstyle e}$ wird hierbei definiert als

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$
 Gleichung 11

mit: θ : Wassergehalt

 θ_r : residualer Wassergehalt

 θ_s : Porosität

Außerhalb dieses Bereichs, also bei Wassergehalten, die höher sind als der so genannte Lufteintrittspunkt (ψ_a), wird ein linearer Zusammenhang zwischen Saugspannung und Wassergehalt angenommen. Unterhalb des residualen Wassergehalts, bei dem die Kontinuität wassergefüllter Poren bereits weitgehend verloren ist, gilt eine logarithmischlineare Beziehung.

Bei der Parametrisierung nach VAN-GENUCHTEN (1980) wird der gesamte Saugspannungsbereich durch eine einzige dreiparametrige Funktion abgedeckt:

$$S_e = \frac{1}{\left(1 + \left(\alpha\psi\right)^n\right)^m}$$
 Gleichung 12

mit α , *n* und *m* als empirischen Parametern. Mit diesem Modell kann erfahrungsgemäß eine größere Bandbreite von Retentionskurven angepasst werden. Die simultane Optimierung der drei Parameter ist allerdings nicht mehr trivial, sodass zur Parametrisierung der Retentionsfunktion eine spezielle Software (RETC, VAN GENUCHTEN ET AL. 1991) entwickelt wurde. Der van-Genuchten-Parameter α entspricht in etwa dem Kehrwert des Lufteintrittspunkts (ψ_a) in der Gleichung nach BROOKS und COREY (1964). Für die Bestimmung der Parameter *n* und *m* wurde die übliche Restriktion *m* = 1 - 1/*n* verwendet.

Für die Wasserhaushaltssimulationen der hier untersuchten Standorte wurde die Parametrisierung nach VAN-GENUCHTEN (1980) (Gleichung 12) angewandt. Für die untersuchten Standorte lagen Labor-pF-Kurven aus den jeweiligen Bodenhorizonten vor, die durch das Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt – Dez. 21 Angewandte Bodenkunde bestimmt und zur Verfügung gestellt wurden. Die Wassergehalte wurden jeweils bei pF 0, 1,8, 2,5, 3 und 4,2 bestimmt. Die simultane Optimierung der drei Parameter ist allerdings nicht mehr trivial, sodass zur Parametrisierung der Retentionsfunktion eine spezielle Software (RETC, VAN GENUCHTEN ET AL. 1991) entwickelt wurde.

Da für die Humushorizonte, bis auf den Standort Schierke, keine Labor-pF-Kurven vorliegen, wurde für alle Standorte für die Parametrisierung des Humushorizontes die Parametrisierung nach WÖSTEN ET .AL. (1999) für organische Bodenhorizonte verwendet. Für den Standort Schierke wurden zunächst die aus den Labor-pF-Kurven abgeleiteten van-Genuchten Parameter bei der Simulation eingesetzt. Da alle Simulationen für den Standort Schierke allerdings jeweils nach unterschiedlichen Zeitspannen aufgrund numerischer Probleme vor dem Simulationsende abbrachen, wurde auch für den Standort Schierke für den Humushorizont die Parametrisierung nach WÖSTEN ET AL. (1999) verwendet.

4.4.5.6.2 Hydraulische Leitfähigkeiten

Die hydraulische Leitfähigkeitsfunktion, $K_{(\theta)}$, folgt dem Kapillarbündelansatz nach MUA-LEM (1976). Dieser lässt sich unter Verwendung der Beziehungen von VAN GENUCHTEN (1980) (Gleichung 12) formulieren als

$$K(\Theta) = K_{sat} \left(\Theta^{r} \left(1 - \left(1 - \Theta^{1/m} \right)^{m} \right)^{2} \right)$$
 Gleichung 13

mit: $K_{(\theta)}$: hydraulische Leitfähigkeit als Funktion des Wassergehalts [LZ⁻¹]

*K*_{sat}: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [LZ⁻¹]

τ: Tortuositätsfaktor (empirisch) [-]

m = 1 - 1/n van Genuchten-Parameter (-)

Zur Bestimmung der $K_{(\theta)}$ - Funktion von Böden wurde bereits eine Reihe von Methoden dokumentiert. Einen Überblick gibt z. B. KLUTE (1986). Neben *in-situ-* (z. B. GREEN ET AL. 1986) und Standard-Labormethoden (HARTGE und HORN 1992) gibt es auch Modelle zur Vorhersage der Leitfähigkeitsfunktion aus der pF-Kurve (z. B. VAN GENUCHTEN ET AL. 1991, DURNER 1991), aus der Korngrößenverteilung (z. B. RAWLS und BRAKENSIEK 1989) oder aus inverser Simulation von Laborsäulenversuchen (SCHULTZE 1998).

In zahlreichen Untersuchungen (z. B. JÄSCHE und SCHEIBKE 1993, SCHÄFER ET AL. 1994, LISCHEID 1995) konnte bereits nachgewiesen werden, dass zwischen hydraulischen Leitfähigkeiten, welche im Labor bzw. im Freiland ermittelt wurden, erhebliche Differenzen bestehen. Ein wesentliches ungeklärtes Problem der Leitfähigkeitsmessung im Labor ist das Auftreten von Randeffekten bei der üblichen Probenahme in Stechzylindern. Da die Probenahme unter erheblicher Krafteinwirkung geschehen muss, werden häufig Risse ("Makroporen") am Rand oder innerhalb der Probe erzeugt, welche zu einer starken Überschätzung der hydraulischen Leitfähigkeit führen können. Messungen unter Laborbedingungen sind außerdem grundsätzlich destruktiver Natur und sollten aufgrund der räumlichen Variabilität von Transportparametern (WARRICK ET AL. 1986, WILSON ET AL. 1989) kritisch hinterfragt werden.

Für alle hier untersuchten Standorte lagen Labormesswerte der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit für die jeweiligen Bodenhorizonte vor. Aufgrund der weiter oben in diesem Unterkapitel beschriebenen methodischen Unsicherheiten bei der Leitfähigkeitsmessung wurde bei einer nicht idealen Übereinstimmung zwischen simulierten Zustandsfunktionen (Bodensaugspannung, Bodenwassergehalt) und Erwartungen insbesondere auch geprüft, ob eine Variation der hydraulischen Leitfähigkeit zu einer Verbesserung der Simulationsergebnisse beitragen würde.

4.4.5.7 Anfangs- und Randbedingungen, treibende Variablen

Zur eindeutigen Lösung der Richards-Gleichung ist die Definition von Anfangs- und Randbedingungen erforderlich. Als Anfangsbedingungen sind insbesondere Tiefenprofile der Bodensaugspannung und der Bodentemperatur erforderlich. Die obere Randbedingung wird durch die Tagessummen der Niederschläge sowie die Evapotranspiration gebildet.

Die untere Randbedingung für den Wasserhaushalt wurde als Randbedingung 2. Art ("Neumann-Randbedingung") in Form eines Einheitsgradienten spezifiziert. Dies bedeutet, dass am unteren Rand der Gradient des hydraulischen Potenzials gleich Null ist und der Wasserfluss lediglich über Gravitationskräfte bestimmt wird. Der Einheitsgradient bietet gegenüber der festen Vorgabe einer Zustandsvariablen (Randbedingung 1. Art, "Dirichlet-Randbedingung") den Vorteil, systemunabhängig zu sein. Dadurch sind auch Simulationen für Zeiträume möglich, für die keine Daten im Boden erhoben werden, sondern lediglich meteorologische Daten vorliegen. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die räumliche Diskretisierung des Bodenprofils ausreichend tief in den Boden reicht, um eine Beeinflussung des unteren Rands durch Wurzelwasseraufnahme oder kapillaren Aufstieg auszuschließen.

Als Startzeitpunkt der Simulationen wurde der 1.11.1960 für den Mess- und Istzeitraum bzw. 1.11.2000 für die Szenarien gewählt. Die Equilibrierungsphase für das Modell beträgt somit 2 Monate vor dem Beginn des ersten Bilanzierungszeitraums (1.1.1961 bzw. 1.1.2001). Da für den Zeitraum vom 1.11.1960 bis 31.12.1960 keine Daten vorliegen wurde für diesen die Daten des gleichen Zeitraums des Jahres 1961 verwendet. Für den Equilibrierungszeitraum der Szenarienzeiträume vom 1.11.2000 bis 31.12.2000 wurden die Daten des jeweiligen Istzeitraumes gewählt.

Als Anfangsbedingungen wurden für die Bodensaugspannung im gesamten Profil 62 hPa (= pF 1,8, "Feldkapazität") angenommen

Als treibende Variablen dienten die an den Wetterstationen erfassten Klimaparameter: relative Luftfeuchte, Lufttemperatur (Min, Max), Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und die mit den Totalisatoren abgeglichenen täglichen Niederschlagsmengen. Auf Freiflächen gemessene Niederschläge wurden mit dem Verfahren nach RICHTER (1995). Korrigiert. Bestandesniederschläge wurden nicht weiter korrigiert, da hier in guter Näherung Windstille angenommen werden kann.

4.4.5.8 Räumliche und zeitliche Diskretisierung

Zur Realisierung des zu Beginn des vorherigen Abschnitts diskutierten Skalenübergangs ist die Vereinbarung einer räumlichen und zeitlichen Diskretisierung erforderlich. Die Mächtigkeit der räumlichen Kompartimente sollte insbesondere in Bereichen, in denen eine hohe zeitliche Dynamik der Wasserflüsse herrscht, d.h. nahe der Bodenoberfläche, möglichst gering sein. Eine gleichzeitige Berücksichtigung der Horizontierung des Bodenprofils ist wichtig, da den einzelnen numerischen Kompartimenten definierte hydraulische Eigenschaften zugewiesen werden, die in der Regel horizontweise ermittelt werden. Darüber hinaus sollte gewährleistet werden, dass die Sensorik, mit Hilfe derer die Kalibrierung und Validierung des Modells erfolgen soll, jeweils möglichst repräsentative Messwerte für ein bestimmtes Kompartiment liefert. Die Messtiefe sollte sich also möglichst nicht mit einer Kompartimentgrenze überschneiden.

Der Zeitschritt für die Ein- und Ausgabe der Modellvariablen betrug 1 Tag. Die Anzahl der Iterationen pro Tag ergibt sich durch eine Zeitschrittsteuerung, die den Zeitschritt automatisch der jeweiligen Situation zur Lösung der partiellen Differentialgleichungen für den Wassertransport im Boden anpasst.

4.4.5.9 Vegetationsparameter

Um die Auswirkungen forstwirtschaftlichen Handelns auf den Wasserhaushalt eines Standortes zu analysieren, bedarf es eines Instrumentes, das in der Lage ist, dieses Handeln modellhaft abzubilden. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde das Waldwachstum
mit dem *WaldPlaner* – einem auf *BWINPro* bzw. *TreeGrOSS*¹ aufbauenden Einzelbaumsimulator – modelliert.

Als Prognose-Tool konzipiert, können mit dem WaldPlaner sowohl detaillierte Informationen zum Zustand des Waldes, als auch zu dessen mittelfristiger Entwicklung unter variablen Rahmenbedingungen bereitgestellt werden. Für die Simulation der unterschiedlichen Szenarien wurde das Softwaresystem "WaldPlaner" in Verbindung mit einem die virtuellen Waldbestände parallel verarbeitendem Serversystem eingesetzt. Beide Programme basieren auf dem Einzelbaumwachstumsmodell BWINPro (NAGEL, 2005) und wurden zur Simulation und Auswertung einer großen Anzahl von einzelnen Beständen weiterentwickelt. Der WaldPlaner unterstützt das Generieren virtueller Modellbestände aus Forsteinrichtungsdaten oder Einzelbauminventuren und die Datenhaltung in einer beliebigen Datenbank. Die virtuellen Bestände werden einzelbaumweise aufgebaut und deren Wachstum und Behandlung simuliert. Das System besteht aus mehreren Komponenten:

- Datenbankschnittstelle,
- Datenergänzungsroutinen,
- Einzelbaumwachstumssimulator,
- Sortierroutine,
- Szenariomanager und Auswertungstool.

Die Komponenten Datenergänzungsroutinen, Einzelbaumwachstumsmodell und die Sortierroutine sind dem Softwarepaket TreeGrOSS entnommen. Der Szenariomanager greift auf eine ebenfalls in JAVA realisierte Komponente (DUDA, 2006) zurück, die über eine Vielzahl waldbaulicher Handlungsalternativen (Z-Baumauswahl, Durchforstung, Endnutzung, Pflanzung usw.) gesteuert wird. Diese Einzelelemente wurden im Szenariomanagement zu einem Gesamtkonzept vereinigt, das Szenariosimulationen ermöglicht, die über die Einsteuerung unterschiedlicher Waldbauvarianten flexibel gestaltet werden können.

Für die Untersuchungsflächen wurden, aufbauend auf den ertragskundlichen Aufnahmen, mit Hilfe des Waldwachstumssimulators BWINpro die für die Wasserhaushaltsmodellierung nötigen bestandesbeschreibenden Kenndaten berechnet. Diese Bestandesbeschreibung wurde als statische Größe in die Wasserhaushaltsmodellierung übernommen, um die Auswirkungen des Klimawandels losgelöst von der Vegetationsentwicklung betrachten zu können.

Auf den Level II-Flächen und dem Großlysimeter wurde parallel dazu eine dynamische Waldentwicklung gerechnet. Regelmäßig durchgeführte Forstinventuren seit 1961 bildeten die Datengrundlage für diese Simulationen. Die Berücksichtigung der Dynamik in der Bestandesentwicklung bietet den Vorteil, die realen Bedingungen eines Waldbestandes sehr exakt im Modell beschreiben zu können und die Auswirkungen von forstlichen Maßnahmen auf den Standortwasserhaushalt ableiten zu können. Zudem können Szenarien für die Zukunft unter Berücksichtigung unterschiedlicher Schwerpunkte der Waldbehandlung einbezogen werden. Im vorliegenden Projekt wurde eine zukünftige waldbauliche Behandlung gemäß dem niedersächsischen LÖWE-Programm zugrunde gelegt.

¹TreeGrOSS: Tree Growth Open Source Software, (früher BWINPro), frei verfügbares JAVA- Softwarepaket zur einzelbaumbasierten Simulation von Bestandsentwicklungen. (NAGEL et al., 2006)

Standort	Bestand	Begründung	Alter in 2009 (a)	Höhe ü. NN (m)
Auerberg	Rotbuche/Hainbuche 8/2	1886/1982	123/27	485
Brocken	Fichte	1846	163	1045
Colbitz	Kiefer	1955	54	70
Lysim. Colb.	Kiefer	1971	38	70
Friedrichrode	Rotbuche/Fichte 9/1	1917/1937	92/72	280
Hasselfelde	Rotbuche	1828	201	535
Klötze	Kiefer	1918	91	88
Nedlitz	Kiefer	1947	62	114
Ochsenkopf	Rotbuche/Hainbuche 4/6	1864/1882	145/127	135
Schierke	Fichte	1910	99	835

Tabelle 2:Begründung und Alter der untersuchten Standorte im Jahr 2009

Da für die Bestände der jährliche maximale Blattflächenindex (*LAIMax*) nicht bekannt ist, wird dieser nach Burger (1929 - 1953) aus den Stammzahlen und dem Brusthöhendurchmesser nach folgender Gleichung berechnet:

$$LAI = S_l(D) n_s f_p$$
 Gleichung 14

Sl(D) gibt die Blattoberfläche als Funktion des Brusthöhendurchmessers D an, n_s ist die mittlere Stammzahl pro Fläche bei einem bestimmten Brusthöhendurchmesser D und der Faktor f_p beschreibt das Verhältnis zwischen projizierter Blattfläche und Blattoberfläche. Für die Laubbaumarten wird $f_p = 0,5$, für die Nadelbaumarten fp = 0,4 gewählt. Zusätzlich zu dem berechneten *LAI* für die Hauptbaumart wird der *LAI* für den Unterwuchs abgeschätzt und diesem hinzugerechnet. Hieraus ergibt sich der gesamte maximale *LAI* (Tabelle 3).

Standort hg (m) dg (cm) Bäume/ha LAI max Auerberg 24.1/24.7 30/26.8 204/52 3.6 Brocken 12.7 25.1 200 1.3 Colbitz 2.0 17.1 14.5 628 Lysim. Colb. 2276 4.2 16.2 15.1 Friedrichrode 21.6/20.4 25.6/21.3 596/84 7.0 Hasselfelde 30.6 92 47.6 3.6 21 Klötze 23.3 688 3.1 Nedlitz 19.7 4.2 21.9 1044 Ochsenkopf 34.7/23.9 59.4/28.6 64/76 4.9 Schierke 20.1 31.3 1108 10.4

Tabelle 3: Bestandesparameter der untersuchten Standorte

4.5 Plausibilitätsprüfung und Lückenersatz der Messdaten

Bei den Klimadaten Freilandniederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung handelt es sich um treibende Modellvariablen. Hier mussten Datenlücken zunächst mit Hilfe von Referenzdaten anderer Stationen geschlossen werden. Hierzu wird das Simulationsmodell für den Lückenersatz von Klimadaten "METEODATA" (RANG 2003) verwendet.

4.5.1 Niederschlag

Die Daten des Freiland- und Bestandesniederschlags wurden bezüglich der Tageswerte (nur Freilandniederschlag), der wöchentlichen Probenahmen und der Jahressummen auf Plausibilität geprüft. Wichtige Hinweise ergaben sich hierbei auch aus der Berechnung von Interzeptionsverlusten auf Tages- bis Jahresbasis mit Hilfe des Simulationsmodells LWF-Brook90 und einem Vergleich der Niederschlagsdaten mit den Tensionsverläufen in der obersten Untersuchungstiefe.

Bis zum Messbeginn der Kippwaagen dienten die Niederschlagssummen der Bulksampler als Grundlage für den Abgleich und die Tageswerte der Kippwaage wurden entsprechend korrigiert. Diese Vorgehensweise ist dadurch begründet, dass die Daten von mehreren Bulksamplern eine größere Repräsentativität aufweisen als die Werte einer einzelnen Kippwaage, welche zudem insbesondere im Winter fehleranfällig ist. Bei den Rohdaten mit den wöchentlichen Niederschlägen der Bulksampler war der Tag der Probenahme jeweils zwei Probenahme-Intervallen zugeordnet. Dies ist sachlich richtig, da die Probenahme in der Regel nicht um 0:00 Uhr erfolgt. Um einen Abgleich mit den täglichen Daten, welche jeweils als Summe von 0:00 bis 24:00 Uhr eines Tages vorlagen, durchführen zu können, war es allerdings erforderlich, Beginn und Ende eines Probenahmeintervalls ebenfalls auf 0:00 Uhr zu setzen. Hierzu wurde der "Stichtag" jeweils der "alten" Probe zugeordnet. Falls, bedingt durch diese Vorgehensweise, stark abweichende Korrekturfaktoren auftraten, wurde die Zuordnung des Probenahmetags manuell korrigiert.

4.5.2 Globalstrahlung

Für die Simulationsrechnungen muss die Globalstrahlung als tägliche "Bestrahlung" ("Bestrahlungsstärke * Zeit"; Größe: Arbeit/Fläche, Dimension: $WL^{-1} = ML^2T^{-2}L^{-1}$) (VDI 1986) in der Einheit MJ*m⁻² vorliegen. Hierzu werden die einzelnen Momentanwerte der "Bestrahlungsstärke" (Größe: Leistung/Fläche, Dimension: $PL^{-1} = ML^2T^{-2}L^{-1}$), Einheit z.B. $W^*m^{-2} = J^*s^{-1*}m^{-2}$, eines Tages gemittelt. Anschließend kann durch Multiplikation mit dem entsprechenden Zeitintervall die tägliche "Bestrahlung" ermittelt werden.

4.5.3 Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Luftfeuchte

Die Daten wurden auf Plausibilität und Vollständigkeit überprüft. Es wurde ein Lückenersatz auf Grundlage von Referenzreihen durchgeführt.

4.5.4 Bodensaugspannung

Die Daten der Tensiometer wurden nach folgenden Plausibilitätskriterien untersucht:

- Messbereich: maximal möglicher Überstau in cm WS (negativ) bis +850 hPa.
- Kontakt zur Bodenmatrix: Vergleich des Trends der Messwerte untereinander und Korrelation mit Niederschlagsereignissen.
- Lufteintritt ("Tensiometer ausgelaufen"): Anzeichen ist ein charakteristischer Verlauf über einen längeren Zeitraum, z. T. mehrere Monate: Trotz offensichtlichen Austrocknens des Bodens (z. B. Frühjahr, Frühsommer) liegen die maximal erreichten Saugspannungen sukzessive immer niedriger.

Die Berechnung arithmetischer Mittelwerte der Bodensaugspannung für einzelne Tiefenstufen ist problematisch, da einzelne Sensoren zeitweise ausfallen und sich die Grundgesamtheit somit ändert und andererseits die Sickerungsprozesse im Boden stark nichtlinear verlaufen und eine Mittelwertbildung damit streng genommen unzulässig ist.

4.6 Niederschlagskorrektur nach RICHTER (1995)

Da die wirkliche Niederschlagshöhe durch das Messsystem verfälscht wird, ist es notwendig, die gemessenen Niederschlagswerte zu korrigieren. Die korrigierten Werte geben den tatsächlich am Erdboden ankommenden Niederschlag an und erfolgt nach der von RICH-TER (1995) angegebenen Gleichung:

$$N_{korr} = N + b \cdot N^{\varepsilon}$$
 Gleichung 15

N ist dabei die tägliche gemessene und N_{korr} die korrigierte Niederschlagshöhe. Die Koeffizienten b und ε sind abhängig von der Niederschlagsart und der Stationslage. Sie können Tabelle 5 entnommen werden. Die Niederschlagsart N4 (flüssig) wird bei einer Temperatur von über 3 °C (Tagesmittel) angenommen, dabei muss nach Sommer (Mai – Oktober) und Winter (November – April) unterschieden werden. Die Niederschlagsart N8 = Mischung aus flüssigem und festem (Schnee-) Niederschlag ergibt sich in einem Temperaturbereich zwischen –0.7 und 3.0 °C. Liegt das Tagesmittel der Temperatur unter –0.7 °C, liegt fester Niederschlag N7 vor. Da nicht immer für alle Stationen Angaben zur Stationslage vorliegen, können diese ggf. nach der mittleren langjährigen Windgeschwindigkeit eingestuft (Tabelle 4). Wenn auch diese nicht vorliegt, wird die Station als "mäßig geschützt" bewertet.

Tabelle 4: Einteilung der Stationslage nach der mittleren langjährigen Windgeschwindigkeit

Windgeschwindigkeit (m/s)	Stationslage
0-2	stark geschützt
2-5	mäßig geschützt
5-8	leicht geschützt
>8	frei

		Stationslage / b					
Niederschlagsart	3	frei	leicht geschützt	mäßig geschützt	stark geschützt		
N4 (Sommer)	0,38	0,345	0,310	0,280	0,245		
N4 (Winter)	0,46	0,340	0,280	0,240	0,190		
N8	0,55	0,535	0,390	0,305	0,185		
N7	0,82	0,720	0,510	0,330	0,210		

Tabelle 5:Abhängigkeit von ε und b von der Niederschlagsart und der Stationslage (RICHTER,
1995)

N4: flüssig, N8: Misch, N7: Schnee

Da bei reinen Niederschlagsstationen zum einen keine Angaben zur Niederschlagsart vorliegen bzw. für die Auswahl der Niederschlagsart in der Regel auch keine Angaben über die Temperatur vorliegen, kann für diese Stationen für begrenzte Gebiete, das Mittel der Temperatur der in diesem Gebiet liegenden Klimastationen verwendet werden.

4.7 Wasserverfügbarkeit und Wasserstress

Untersuchungen von ANDERS ET AL. (2002) in unterschiedlichen Vegetationsformen der Kiefer, Buche und Eiche ergaben, dass unterhalb einer pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge (= nutzbare Feldkapazität) im Oberboden von 60% sich die Durchmesserzunahme verlangsamt, unter 40% kommt es zum Erliegen des Wachstums und bei fortdauerndem Wassermangel zur Durchmesserabnahme. Eine Wasserverfügbarkeit von ca. 40% stellt bei Sandböden einen physiologischen Schwellenwert dar, unterhalb dessen eine deutliche Reduktion der Wachstumsaktivität eintritt. Einen Überblick über die nutzbare Feldkapazität der Böden, von der Oberkante der organischen Auflage bis ein Meter Tiefe, an den untersuchten Standorten gibt Tabelle 6.

	ł	Feinboden	Mit Skelett			
Standort	nFK (1 m)	60% nFK	40% nFK	nFK (1 m)	60% nFK	40% nFK
Klötze	169.7	101.8	67.9	169.7	101.8	67.9
Nedlitz	82.8	49.7	33.1	81.7	49.0	32.7
Lys_Colbitz	241.4	144.8	96.6	237.1	142.3	94.9
Auerberg	248.1	147.5	98.3	203.9	122.3	81.6
Brocken	175.7	105.4	70.3	175.7	105.4	70.3
Colbitz	132.5	79.5	53.0	123.1	73.9	49.3
Friedrichrode	193.4	116.1	77.4	193.2	115.9	77.3
Hasselfelde	175.5	105.3	70.2	169.7	101.8	67.9
Ochsenkopf	117.2	70.3	46.9	116.0	69.6	46.4
Schierke	197.0	118.2	78.8	182.7	109.6	73.1

Tabelle 6: Nutzbare Feldkapazität bis ein Meter Tiefe der Böden an den untersuchten Standorten

Zur Beschreibung der Wasserverfügbarkeit und des Wasserstresses werden beide Kenngrößen zum Vergleich der unterschiedlichen Klimaszenarien verwendet. Dabei werden jeweils für die beiden Szenarienzeiträume 1961 – 1990 und 2021 – 2050 folgende Werte bestimmt: Anzahl der Jahre in denen die beiden Kenngrößen unterschritten werden, die mittlere Anzahl der zusammenhängenden Perioden die pro Jahr auftreten, die mittlere Länge einer Periode und die mittlere Gesamtlänge der Unterschreitung pro Jahr.

4.8 Plausibilitätsprüfung der Klimaszenarien

Um die Plausibilität der Klimaszenarien zu bewerten, wurden zunächst die Monats- und Jahresniederschläge des IST-Zustandes der WETTREG-Projektionen mit den Monats- und Jahresniederschläge des Mess-Zustandes verglichen. Je kleiner der Unterschied zwischen dem Mess-Zustand und einer Klimaprojektion ist, desto eher ist die Plausibilität in Hinblick auf die Betrachtung der Zukunftsklimate gegeben. Anschließend wurden die Unterschiede der Monats- und Jahresniederschläge für das IST- und das jeweils zugehörige Zukunftsklima ausgewertet.

4.8.1 Statistische Bewertung der Unterschiede

Aufgrund der unterschiedlichen natürlichen Variabilität der Niederschläge werden die Abweichungen bei einer ausschließlichen Betrachtung der relativen Unterschiede nicht ausreichend quantifiziert. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen für Niederschläge mit einer kleineren Variabilität sind bedeutsamer als für Niederschläge mit einer größeren Variabilität. Dieser Effekt wurde durch Konfidenzbetrachtungen der statistischen Größen und den darauf aufsetzenden Tests berücksichtigt. Sind die Konfidenzgrenzen zweier zu vergleichender Zustände bekannt, erfolgt eine Überprüfung, ob sich diese überlappen. Nur für den Fall, dass sich die Konfidenzgrenzen von der betrachteten Größe Z und der Referenz R nicht überlappen, ist der Unterschied signifikant. Sämtliche Tests wurden mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% durchgeführt.

4.8.2 Graphische Darstellung

Zur Visualisierung von Einzelergebnissen werden Stabdiagramme genutzt, in die die errechneten Konfidenzgrenzen in Form schmaler Linien dargestellt sind. Diese Linien sind dann grün, wenn der Unterschied, bezogen auf die jeweilige Referenz, nicht signifikant ist; im anderen Fall sind die Linien rot. Die Einfärbung kann visuell unmittelbar nachvollzogen werden, da rote Linien keinen Überlappungsbereich mit denen der Referenz haben.

4.9 Zugeordnete Klimastationen

Da für die einzelnen Standorte keine standortbezogene Klimamessdaten und Klimaszenarien vorliegen, wurden den Standorten jeweils nahe gelegene Klimastationen zugeordnet (Tabelle 7). Bei der Interpretation der Ergebnisse muss daher berücksichtigt werden, dass am Standort eventuell davon abeichende klimatische Verhältnisse herrschen, vor allem kann der tatsächliche Niederschlag von dem der nahe gelegen Station größere Abweichungen aufweisen.

Standort	zugeord. Klimastation
Level II - Klötze	Gardelegen
Level II - Nedlitz	Magdeburg
Lysim Colbitz	Gardelegen
BDF Auerberg	Bad Sachsa
BDF Brocken	Brocken
BDF Colbitz	Gardelegen
BDF Friedrichrode	Eisleben-Helfta
BDF Hasselfelde	Schierke
BDF Ochsenkopf	Wittenberg
BDF Schierke	Schierke

 Tabelle 7:
 Zuordnung der Klimastationen zu den Standorten

4.10 Plausibilitätsprüfung und Lückenersatz der Messdaten

4.10.1 Niederschläge

4.10.1.1 Klötze

Der Vergleich der Ergebnisse der beiden Messverfahren (Abbildung 16) zeigt im Zeitraum Januar 1998 bis Dezember 2005 zunächst eine systematische Unterschätzung des Niederschlags durch die Kippwaage. Seit Januar 2006 liefern demgegenüber Kippwaage und Bulksampler weitgehend einheitliche Daten. Die Abweichung der Kippwaage im Zeitraum 1/1998 – 12/2005 entspricht 16,9% des Absolutwertes der Bulksampler.



Abbildung 16: Vergleich der NS-Messergebnisse am Standort Klötze. Oben: kumulierte Werte, unten: kumulierte Differenzen. Tendiert der Graph der kumulierten Differenzen nach unten, bedeutet dies eine systematische Unterschätzung des Niederschlags durch die Kippwaage gegenüber Bulksampler (grün). Dargestellt sind die lückenersetzten unkorrigierten, nicht abgeglichenen Werte.

4.10.1.2 Nedlitz

Am Standort Nedlitz wird der Niederschlag zunächst bis Dezember 1999 durch die Kippwaage um 12,7% überschätzt (Abbildung 17). Im weiteren Zeitraum werden die Werte durch die Kippwaage bis Ende 2003 um etwa 6,2% unterschätzt. In den Jahren 2004 und 2005 ergeben sich nur geringe Abweichungen zwischen den Bulksamplern und der Kippwaage. In den folgenden zwei Jahren werden die Niederschläge durch die Kippwaage wieder deutlich unterschätzt (ca. 18,5%). Ab Januar 2008 liefern Kippwaage und Bulksampler weitgehend einheitliche Daten.



Abbildung 17: Vergleich der NS-Messergebnisse am Standort Klötze. Oben: kumulierte Werte, unten: kumulierte Differenzen. Tendiert der Graph der kumulierten Differenzen nach unten, bedeutet dies eine systematische Unterschätzung des Niederschlags durch die Kippwaage gegenüber Bulksampler (grün). Dargestellt sind die lückenersetzten unkorrigierten, nicht abgeglichenen Werte.

4.10.2 Weitere meteorologische Parameter

Die Plausibilitätsprüfung und der Ersatz von Lücken bei den meteorologischen Parametern Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und Luftfeuchte erfolgte analog zur Vorgehensweise bei den Niederschlagsdaten. Wichtige Einzelkorrekturen bei Klimadaten sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Standort	Messgröße	Erläuterung	Korrektur
Nedlitz	Globalstrahlung	2004 Werte unplausible Werte	gelöscht und lückenersetzt
Nedlitz	LT Mittel	1.1.2005 – 6.2.2006 Werte un- plausibel	gelöscht und lückenersetzt
Nedlitz	LT Min	1.1.2005 – 6.2.2006 Werte un- plausibel	gelöscht und lückenersetzt
Nedlitz	LT Max	1.1.2005 – 6.2.2006 u Werte nplausibel	gelöscht und lückenersetzt
Nedlitz	Globalstrahlung	1.1.2005 – 6.2.2006 Werte un- plausibel	gelöscht und lückenersetzt

Tabelle 8: Korrekturen von Klimadaten.

4.11 Wasserhaushaltssimulationen

Das Wasserhaushaltmodell wurde mit Hilfe vorhandener Messdaten an den Standorten Klötze, Nedlitz und dem Großlysimeter Colbitz kalibriert (vgl. Kap. 4.11.1.2, 4.11.2.2 und 4.11.3.2). Für die weiteren Monitoring-Standorte ohne bodenhydrologische Messausstattung wurden unkalibrierte Modellläufe durchgeführt.

4.11.1 Standort Klötze

4.11.1.1 Modellparameter

pF-Kurven

Am Standort Klötze liegt eine mittel podsolige Braunerde aus Geschiebedecksand über Schmelzwassersand vor. Die Bestimmung der Retentionsfunktion mit dem Optimierungsprogramm RETC ergibt den in Abbildung 18 angegebene Verlauf und die in der Tabelle 9 aufgelisteten Parameter. Da die Messwerte bei pF 2,5 deutlich von den anderen Messwerten abweichen, wurden diese bei der Bestimmung der Parameter nur zu 10% gewichtet.

ligung, o _r . Residualwassergenali, d, ff, fff. van Genuchten-Parameter [-])									
Horizont	$ heta_s$	θ_r	α	п	m	Ks	FK	nFK	PWP
(cm)	(Vol- %)	(Vol-%)	(m ⁻¹)			(cm d ⁻¹)	(Vol-%)	(Vol-%)	(Vol-%)
+7 - 0	76.6	1.00	1.2880	1.2039	0.169	8	69.6	43.0	26.6
0 - 5	48.0	5.72	3.4160	1.7220	0.419	2160	27.7	21.5	6.2
5 – 13.5	47.2	3.15	3.5310	1.6228	0.384	622	27.5	23.5	4.0
13.5 – 52.5	46.5	4.00	3.6950	1.6835	0.406	486	25.8	21.3	4.5
52.5 - 270	41.3	1.32	11.3320	1.9259	0.481	562	7.7	6.4	1.4

Tabelle 9:Van Genuchten-Parameter, gesättigte Leitfähigkeit, FK, nFK und PWP für die mittel
podsolige Braunerde am Standort Klötze für den Feinboden. (θ_s: Wassergehalt bei Sät-
tigung. θ_r: Residualwassergehalt. α. n. m: van Genuchten-Parameter I-1)



Abbildung 18:pF-WG- Kurven mittel podaolige Braunerde, Standort Klötze., Messwerte und parametrisiert nach van Genuchten (1980) für den Feinboden

Bestandesentwicklung

Die langfristige dynamische Bestandesentwicklung während des Simulationszeitraumes von 1960 – 2050 (Tabelle 10) wurde mit dem Waldplaner berechnet (vgl. Kap. 4.4.5.9). Aus der Stammzahl N und dem Stammdurchmesser dg wurde mit dem Modell nach BUR-GER (1926- 1953) der jeweilige LAI des Bestandes bestimmt. Für die Bodenbedeckung wurde pauschal ein LAI von 0,5 angenommen und zum Bestandes – LAI addiert.

Jahr	dg (cm)	hg (m)	N (ha⁻¹)	Alter (a)	LAI
1960	14.2	13.7	1849	42	3.3
1965	16.0	15.0	1500	47	3.2
1970	17.6	16.3	1257	52	3.1
1975	19.2	17.4	1073	57	3.0
1980	20.8	18.5	930	62	3.0
1985	22.3	19.5	819	67	2.9
1990	23.8	20.3	730	72	2.9
1995	25.1	21.1	657	77	2.8
1998	23.7	20.9	688	80	2.9
2003	26.0	21.0	680	85	3.0
2005	26.2	21.1	676	87	3.1
2010	27.1	21.6	676	92	3.2
2015	27.3	21.8	588	97	2.9
2020	28.2	22.2	588	102	3.0
2025	28.9	22.5	484	107	2.6
2030	29.8	22.9	484	112	2.7
2035	30.9	23.3	416	117	2.5
2040	31.7	23.6	416	122	2.6
2045	32.6	23.9	368	127	2.5
2050	33.4	24.2	368	132	2.5

Tabelle 10: Vergangene und zukünftige Entwicklung des Bestandes der Level II – Fläche Klötze

4.11.1.2 Simulationsergebnisse der Kalibrierung

Kalibrierung des Bestandesniederschlages

Die Kalibrierung des Bestandesniederschlages erfolgte durch Anpassung der Faktoren des Anteils des Niederschlages, der sich auf den Blättern niederschlägt (0,12 für Regen bzw. 0,08 für Schnee), sowie der bestandesspezifische Interzeptionsspeicherkapazität, wobei zunächst mit Standardwerten von 0,25 mm für Regen und 1,0 mm für Schnee gestartet wurde. Durch Erhöhung der Niederschlagsfaktoren auf 0,2 bzw. 0,15 und der Speicherkapazität für Regen auf 0,35 mm konnte eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und simuliertem Bestandesniederschlag erreicht werden. Die Abweichung zwischen dem kumulierten gemessenen und simulierten Bestandesniederschlag liegt in der Regel unter \pm 20 mm (Abbildung 19).



Abbildung 19: Vergleich des gemessenen und simulierten Bestandesniederschlages am Standort Klötze, oben: kumulierter Bestandesniederschlag gemessen (blau) und simuliert (rot), unten Differenz zwischen simuliert und gemessen

Kalibrierung der Saugspannungen

Die Kalibrierung der Saugspannung erfolgte durch Anpassung der ursprünglich gewählten Wurzeltiefe, die entsprechend der Profilaufnahme bis zu 2,70 m reicht. Um eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung zu erreichen musste die Wurzeltiefe auf 1,00 m reduziert werden. In 30 und 60 cm Tiefe können die sommerliche Austrocknungsphase sowie die Wiederbefeuchtung des Bodens durch die simulierten Saugspannungen gut nachvollzogen werden (Abbildung 20). In 100 cm Tiefe dagegen kann die Simulation die Messung nicht befriedigend nachvollziehen, lediglich die Sättigungsphase im Winter stimmt meistens gut überein.



Abbildung 20: Gemessene (blau) und simulierte (rot) Saugspannungen in 30, 60 und 100 cm Tiefe am Standort Klötze

Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts

Am Standort Klötze bildet die Transpiration die bedeutendsten Bilanzkomponente (50,6% des Niederschlags), gefolgt von Interzeption (31%), Evaporation (12%) und Tiefensickerung (8,4%) (Tabelle 11, Abbildung 21). Oberflächenabfluss hat keine Bedeutung. Die simulierte Tiefensickerung bezieht sich auf 300 cm, die Speicheränderung auf 0 – 300 cm Bodentiefe. Die Speicheränderung im Zeitraum 1998 – 2008 ist noch negativ, da Ende 2008 der Boden noch nicht wieder vollständig aufgefüllt ist, wie die simulierten Saugspannungen (Abbildung 20) zeigen.

Zeitraum	Freiland- nieder- schlag ¹)	Inter- zeption	Ober- flä- chen- abfluss	Evapo- ration (real)	Transpi- ration (real)	Tiefen- sicke- rung	Tiefen- Sickerung (300 cm)	Speicher- änderung (0-300 cm)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	% des FNS	[mm]
1998	759.0	229.6	0.0	91.2	316.9	161.4	21.3%	-40.0
1999	545.7	182.8	0.0	71.7	288.9	135.6	24.8%	-133.4
2000	510.8	178.6	0.0	64.7	323.3	17.9	3.5%	-73.7
2001	724.5	224.0	0.1	68.9	312.0	0.0	0.0%	119.6
2002	816.8	216.1	0.1	111.4	367.1	17.9	2.2%	104.2
2003	480.8	156.4	0.0	58.0	267.3	119.4	24.8%	-120.3
2004	664.5	202.2	0.0	81.9	362.4	36.6	5.5%	-18.5
2005	572.0	185.6	0.0	64.0	325.0	17.3	3.0%	-19.9
2006	502.4	190.8	0.0	62.0	287.8	0.0	0.0%	-38.1
2007	894.0	239.7	0.0	109.0	410.6	0.0	0.0%	134.6
2008	674.0	193.6	0.0	73.5	350.5	95.2	14.1%	-38.8
Summe	7144.5	2199.4	0.2	856.2	3611.7	601.3	-	-124.3
Mittel	649.5	199.9	0.0	77.8	328.3	54.7	8.4%	-11.3

Tabelle 11: Modellierte Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts für den Standort Klötze.

¹) Messwert mit Richterkorrektur (Kapitel 4.6)



Abbildung 21: Standort Klötze, mittlere relative Anteile der Bilanzkomponenten am Freilandniederschlag im Zeitraum 1998 - 2008.

4.11.1.3 Wasserhaushaltssimulationen auf Grundlage von Klimaszenarien

4.11.1.3.1 Statische Bestandesentwicklung

Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts

Die Auswertung der Bilanzkomponenten des Wasserhaushaltes auf Grundlage der Klimaszenarien ergibt am Standort Klötze für die Niederschläge des feuchten IST-Szenarios eine gute Übereinstimmung mit dem Messzustand. Die Niederschläge des trockenen IST-Szenarios sind dagegen signifikant niedriger als der Messzustand (Abbildung 22). Die weitere Betrachtung der feuchten Szenarien A1B und B2 ergibt für beide eine signifikante Abnahme der Jahresniederschläge in der nahen Zukunft (Abbildung 23), wobei die Abnahme vor allem auf einer, allerdings nicht signifikanten, Abnahme der Sommerniederschläge beruht. Die Abnahme der Niederschläge führt zu einer Abnahme der Tiefensickerung um etwa 25 mma⁻¹ (Tabelle 12). Beim Szenario B2 geht die Transpiration geringfügig um etwa 8 mma⁻¹ zurück. Die nicht plausiblen trockenen Szenarien (Abbildung 24) werden hier nicht weiter betrachtet.

Tabelle 12:	Modellierte Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts (Mittel 1961-1990 bzw. 2021-
	2050) für die Klimaszenarien am Standort Klötze (Statische Bestandesentwicklung)

Szenario	Freiland- nieder- schlag ¹)	Inter- zeption	Ober- flä- chen- abfluss	Evapo- ration (real)	Transpi- ration (real)	Tiefen- sicke- rung	Tiefen- Sickerung (300 cm)	Speicher- änderung (0-300 cm)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	% des FNS	[mm]
MESS	630.9	239.8	0.0	71.5	289.3	35.4	5.6%	-5.1
IST_feucht	605.1	213.7	0.0	69.7	293.3	29.0	4.8%	-0.7
IST_trocken	517.6	190.5	0.0	57.2	267.5	6.8	1.3%	-4.3
A1B_feucht	568.0	203.4	0.0	65.0	293.3	4.0	0.7%	2.4
A1B_trocken	476.4	177.8	0.0	47.4	250.4	0.0	0.0%	0.8
B2_feucht	556.9	204.4	0.0	63.1	281.3	5.4	1.0%	2.7
B2_trocken	531.0	186.9	0.0	57.5	276.2	5.7	1.1%	4.7

¹) Messwert mit Richterkorrektur (Kapitel 4.6)



Abbildung 22: Standort Klötze, Szenarioplausibilität: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien MESS, IST_feucht und IST_trocken



Abbildung 23: Standort Klötze, Szenariovergleich: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien IST_feucht, A1B_feucht und B2_feucht



Abbildung 24: Standort Klötze, Szenariovergleich: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien IST_trocken, A1B_trocken und B2_trocken

Wasserverfügbarkeit und Wasserstress

Am Standort Klötze ergeben die Simulationen der statischen Bestandesentwicklung insgesamt eine sehr angespannte Situation der Wasserverfügbarkeit (Tabelle 13,

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	29	2.7	85.0	226.2
IST_feucht	30	2.4	101.8	248.3
IST_trocken	30	2.2	125.5	276.9
A1B_feucht	30	2.5	106.6	270.9
A1B_trocken	30	1.9	178.6	340.2
B2_feucht	30	2.5	107.6	266.1
B2_trocken	30	2.2	139.9	303.9

Bei der 40% nFK-Grenze gibt es in der Häufigkeit der Unterschreitung ebenfalls kaum Unterschiede. Bei den Klimaszenarien für die nahe Zukunft tritt in allen Jahren sowohl eine Unterschreitung der 60% und 40% nFK auf. Bei den trockenen Szenarien ist eine drastische Zunahme der mittleren Gesamtlänge der Unterschreitung zu beobachten.

Tabelle 14). So tritt im Simulationszeitraum 1961-1990 des Beobachtungszustandes in 29 von 30 Jahren eine Unterschreitung der 60% nFK an im Mittel 226 Tagen des Jahres auf. Die 40% nFK wird in 27 von 30 Jahren mit einer mittleren Länge von 158 Tagen unterschritten. Die Kontrollläufe der Klimaszenarien unterscheiden sich bei der 60% nFK Unterschreitung in der Häufigkeit nur gering vom Beobachtungszustand, allerdings werden diese im Mittel deutlich länger unterschritten, am längsten bei den trockenen Szenarien.

Tabelle 13:Angaben zur Unterschreitung der 60% nFK am Standort Klötze: Anzahl der Jahre mit
Unterschreitung der 60% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der
60% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Statische Bestan-
desentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	29	2.7	85.0	226.2
IST_feucht	30	2.4	101.8	248.3
IST_trocken	30	2.2	125.5	276.9
A1B_feucht	30	2.5	106.6	270.9
A1B_trocken	30	1.9	178.6	340.2
B2_feucht	30	2.5	107.6	266.1
B2_trocken	30	2.2	139.9	303.9

Bei der 40% nFK-Grenze gibt es in der Häufigkeit der Unterschreitung ebenfalls kaum Unterschiede. Bei den Klimaszenarien für die nahe Zukunft tritt in allen Jahren sowohl eine Unterschreitung der 60% und 40% nFK auf. Bei den trockenen Szenarien ist eine drastische Zunahme der mittleren Gesamtlänge der Unterschreitung zu beobachten.

Tabelle 14: Angaben zur Unterschreitung der 40% nFK am Standort Klötze: Anzahl der Jahre mit Unterschreitung der 40% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der 40% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Statische Bestandesentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	27	2.7	57.5	157.8
IST_feucht	30	2.5	73.0	180.3
IST_trocken	30	2.1	101.2	216.4
A1B_feucht	30	2.6	77.7	202.6
A1B_trocken	30	2.1	132.8	279.7
B2_feucht	30	2.4	81.5	198.6
B2_trocken	30	2.5	95.3	238.9

4.11.1.3.2 Dynamische Bestandesentwicklung Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts

Die Wasserhaushaltskomponenten der Simulationen mit der dynamischen Bestandesentwicklung unterscheiden sich, bis auf die Interzeption, nur unwesentlich von denen der statischen Bestandesentwicklung, weil beide untersuchte Bestandesvarianten annähernd das gesamte verfügbare Wasser verbrauchen. Die Interzeption ist aufgrund des abnehmenden LAI bei der dynamischen Bestandesentwicklung in der nahen Zukunft bei allen Szenarien um etwa 20 mma⁻¹ geringer als bei der statischen.

Szenario	Freiland- nieder- schlag ¹)	Inter- zeption	Ober- flä- chen- abfluss	Evapo- ration (real)	Transpi- ration (real)	Tiefen- sicke- rung	Tiefen- Sickerung (300 cm)	Speicher- änderung (0-300 cm)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	% des FNS	[mm]
MESS	630.9	232.1	0.0	74.0	289.9	40.2	6.4%	-5.4
IST_feucht	605.1	206.8	0.0	72.2	294.6	31.7	5.2%	-0.2
IST_trocken	517.6	184.2	0.0	59.7	269.9	7.5	1.5%	-3.7
A1B_feucht	568.0	179.9	0.0	81.5	292.5	10.4	1.8%	3.7
A1B_trocken	476.4	156.8	0.0	60.7	257.6	0.0	0.0%	1.2
B2_feucht	556.9	180.0	0.0	79.4	277.9	16.8	3.0%	2.9
B2_trocken	531.0	164.8	0.0	73.4	276.1	8.8	1.7%	7.8

Tabelle 15:Modellierte Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts (Mittel 1961-1990 bzw. 2021-
2050) für die Klimaszenarien am Standort Klötze (Dynamische Bestandesentwicklung)

¹) Messwert mit Richterkorrektur (Kapitel 4.6)

Wasserverfügbarkeit und Wasserstress

Die Ergebnisse der Simulationen mit dynamischer Bestandesentwicklung (Tabelle 16, Tabelle 17) zeigen für den Beobachtungszustand und die Kontrollläufe keine größeren Unterschiede zu den Ergebnissen der statischen Bestandesentwicklung. Mäßige Unterschiede zeigen sich bei den Klimaszenarien der nahen Zukunft. Hier ist der Wasserstress beim statischen Bestand etwas stärker ausgeprägt. In der dynamischen Simulation treten ca. 10% weniger Wasserstresstage auf als in der statischen Simulation.

Unter der Annahme, dass am Standort Klötze das feuchte Szenario eine höhere Plausibilität aufweist, ist zumindest mit keiner weiteren Abnahme der schon deutlich reduzierten Wasserverfügbarkeit in der nahen Zukunft zu rechnen.

Tabelle 16:Angaben zur Unterschreitung der 60% nFK am Standort Klötze: Anzahl der Jahre mit
Unterschreitung der 60% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der
60% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Dynamische Be-
standesentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	29	2.4	88.8	217.8
IST_feucht	30	2.7	89.1	244.1
IST_trocken	30	2.1	128.7	270.9
A1B_feucht	30	2.7	88.0	241.2
A1B_trocken	30	2.1	151.1	318.3
B2_feucht	30	2.3	100.7	235.5
B2_trocken	30	2.2	129.0	280.4

Tabelle 17: Angaben zur Unterschreitung der 40% nFK am Standort Klötze: Anzahl der Jahre mit Unterschreitung der 40% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der 40% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Dynamische Bestandesentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	27	2.6	59.2	151.6
IST_feucht	30	2.5	68.1	170.6
IST_trocken	30	2.1	101.1	209.3
A1B_feucht	30	2.0	87.8	175.9
A1B_trocken	30	2.3	108.8	254.5
B2_feucht	29	2.3	75.7	175.0
B2_trocken	30	2.7	75.3	203.8

4.11.2 Standort Nedlitz

4.11.2.1 Modellparameter

pF-Kurven

Der Standort Nedlitz weist eine podsolige Braunerde bis Podsol – Braunerde aus Geschiebedecksand über Schmelzwassersand auf. Die Retentionsfunktion wurde mit dem Optimierungsprogramm RETC bestimmt (Tabelle 18, Abbildung 25).

Tabelle 18: Van Genuchten-Parameter, gesättigte Leitfähigkeit, FK, nFK und PWP für die podsolige Braunerde am Standort Nedlitz für den Feinboden. (θs: Wassergehalt bei Sättigung, θr: Residualwassergehalt, α, n, m: van Genuchten-Parameter [-])

Horizont (cm)	θs (Vol- %)	θr (Vol-%)	α (m ⁻¹)	п	т	<i>Ks</i> (cm d ⁻¹)	FK (Vol-%)	nFK (Vol-%)	PWP (Vol-%)
+8-0	76.6	1.00	1.2880	1.2039	0.169	8	69.6	43.0	26.6
0-12	52.2	7.74	13.7140	2.4768	0.596	1970	9.6	1.8	7.7
12-42.5	47.3	4.32	15.7100	1.5870	0.370	1304	15.4	10.6	4.8
42.5-60	39.0	1.11	20.1290	1.9752	0.494	1450	4.3	3.2	1.1
60-280	38.5	0.99	19.7580	2.0641	0.516	3853	3.5	2.5	1.0



Abbildung 25: pF-WG- Kurven podsolige Braunerde, Standort Nedlitz., Messwerte und parametrisiert nach van Genuchten (1980) für den Feinboden

Bestandesentwicklung

Die langfristige dynamische Bestandesentwicklung während des Simulationszeitraumes von 1960 – 2050 (Tabelle 19) wurde vom AG mit dem Waldplaner (<u>http://www.nw-fva.de/index.php?id=216</u>) berechnet (vgl. Kap. 4.4.5.9). Aus der Stammzahl N und dem Stammdurchmesser dg wurde mit dem Modell nach Burger (1926- 1953) der jeweilige LAI des Bestandes bestimmt. Für die Bodenbedeckung wurde pauschal ein LAI von 0,5 angenommen und zum Bestandes – LAI addiert.

Jahr	dg (cm)	hg (m)	N (ha⁻¹)	Alter (a)	LAI
1960	1.0	1.1	7039	13	1.0
1965	2.7	2.8	6081	18	1.6
1970	6.8	7.6	5254	23	3.0
1975	11.7	12.4	4061	28	4.7
1980	14.1	14.4	2934	33	4.8
1985	16.4	16.3	2237	38	4.6
1990	18.7	18.0	1768	43	4.4
1995	20.9	19.8	1446	48	4.3
1998	18.3	18.8	1276	51	3.6
2002	19.3	18.9	1220	55	3.9
2003	20.8	19.3	1036	56	3.8
2005	21.0	19.9	1020	58	4.2
2010	22.1	20.7	1020	63	5.0
2015	22.8	21.3	880	68	4.2
2020	23.9	21.9	880	73	3.7
2025	24.7	22.5	744	78	3.0
2030	25.8	23.1	744	83	3.2
2035	27.0	23.6	608	88	2.9
2040	28.0	24.1	608	93	3.0
2045	29.3	24.6	540	98	2.9
2050	30.2	25.0	540	103	3.0

Tabelle 19: Vergangene und zukünftige Entwicklung des Bestandes der Level II – Fläche Nedlitz

4.11.2.2 Simulationsergebnisse der Kalibrierung

Kalibrierung des Bestandesniederschlages

Am Standort Nedlitz erfolgte die Kalibrierung des Bestandesniederschlages zum einen durch Anpassung der Faktoren des Anteils des Niederschlages der sich auf den Blättern niederschlägt (0,12 für Regen bzw. 0,08 für Schnee) sowie der bestandesspezifische Interzeptionsspeicherkapazität, wobei zunächst mit Standardwerten von 0,25 mm für Regen und 1,0 mm für Schnee gestartet wurde. Weiterhin wurde der jährliche maximale LAI des Bestandes angepasst. Durch Erhöhung der Niederschlagsfaktoren auf 0,25 bzw. 0,2 und der Speicherkapazität für Regen auf 0,40 mm sowie des LAI um jeweils ca. 20% konnte in den meisten Jahren eine befriedigende Übereinstimmung zwischen gemessenem und simulierten Bestandesniederschlag erreicht werden. Lediglich im Jahre 2008 ergibt sich eine zunehmende Abweichung, die nur durch einen gegenüber den Vorjahren unplausibel hohen LAI von 6.0 hätte reduziert werden können. Die Abweichung zwischen dem kumulierten gemessenen und simulierten Bestandesniederschlag liegt in der Regel unter \pm 50 mm (Abbildung 26).



Abbildung 26: Vergleich des gemessenen und simulierten Bestandesniederschlages am Standort Nedlitz, oben: kummulierter Bestandesniederschlag gemessen (blau) und simuliert (rot), unten Differenz zwischen simuliert und gemessen

Kalibrierung der Saugspannungen

Die Kalibrierung der Saugspannung erfolgte wiederum durch Anpassung der ursprünglich gewählten Wurzeltiefe, die entsprechend der Profilaufnahme bis zu 2,70 m reicht. Um eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung zu erreichen wurde die Wurzeltiefe auf 1,00 m reduziert. In allen Tiefen können damit die sommerliche Austrocknungsphase sowie die Wiederbefeuchtung des Bodens durch die simulierten Saugspannungen gut nachvollzogen werden (Abbildung 27).



Abbildung 27. Gemessene (blau) und simulierte (rot) Saugspannungen in 30, 60 und 100 cm Tiefe am Standort Nedlitz

Wasserbilanz

Am Standort Nedlitz umfasst die Transpiration die bedeutendste Bilanzkomponente des Wasserhaushaltes (38% des Niederschlags), gefolgt von Interzeption (36%), Tiefensickerung (15%) und Evaporation (11%) (Tabelle 20, Abbildung 28). Oberflächenabfluss findet am Standort Nedlitz nur geringfügig statt. Die simulierte Tiefensickerung bezieht sich auf 300 cm, die Speicheränderung auf 0 – 300 cm Bodentiefe. Die Speicheränderung im Zeitraum 1998 – 2008 ist zum Ende des Simulationszeitraumes nahezu ausgeglichen.

Zeitraum	Freiland- nieder- schlag ¹)	Inter- zeption	Ober- flä- chen- abfluss	Evapo- ration (real)	Transpi- ration (real)	Tiefen- sicke- rung	Tiefen- Sickerung (300 cm)	Speicher- änderung (0-300 cm)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	% des FNS	[mm]
1998	588.8	238.6	0.0	76.8	212.1	75.3	12.8%	-13.9
1999	521.8	240.5	0.0	63.8	182.0	75.0	14.4%	-39.5
2000	627.0	232.1	2.9	76.1	246.7	61.1	9.7%	8.0
2001	763.9	261.1	1.5	75.1	241.9	85.4	11.2%	99.0
2002	869.5	232.2	8.3	91.2	341.0	215.6	24.8%	-18.8
2003	510.8	205.7	0.0	65.3	179.8	117.2	22.9%	-57.2
2004	674.2	257.1	0.0	77.6	250.5	78.1	11.6%	10.9
2005	736.9	238.6	0.2	79.5	306.8	56.3	7.6%	55.5
2006	603.0	247.8	0.0	64.8	238.7	125.0	20.7%	-73.3
2007	893.1	279.8	0.8	75.5	370.6	105.1	11.8%	61.3
2008	704.9	234.9	3.3	64.3	261.9	137.9	19.6%	2.6
Summe	7493.9	2668.4	17.0	810.0	2831.9	1132.0	-	34.6
Mittel	681.3	242.6	1.5	73.6	257.4	102.9	15.1%	3.1

Tabelle 20: Modellierte Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts für den Standort Nedlitz.

¹) Messwert mit Richterkorrektur (Kapitel 4.6)



Abbildung 28: Standort Nedlitz, mittlere relative Anteile der Bilanzkomponenten am Freilandniederschlag im Zeitraum 1998 - 2008.

4.11.2.3 Wasserhaushaltssimulationen auf Grundlage von Klimaszenarien

4.11.2.3.1 Statische Bestandesentwicklung

Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts

Am Standort Nedlitz zeigen die Niederschläge des feuchten IST-Szenarios eine gute Übereinstimmung mit dem Messzustand. Die Niederschläge des trockenen IST-Szenarios sind dagegen signifikant niedriger als der Messzustand (Abbildung 29).

Das feuchte Szenario A1B zeigt eine nicht signifikante und das feuchte Szenario B2 eine signifikante Abnahme der Jahresniederschläge in der nahen Zukunft (

Abbildung 30), wobei die Abnahme vor allem auf einer, allerdings nicht signifikanten, Abnahme der Sommerniederschläge beruht. Die Abnahme der Niederschläge führt zu einer Abnahme der Tiefensickerung um etwa 15 mma⁻¹ (Tabelle 12). Allerdings ist die Tiefensickerung des feuchten Kontrolllaufes um 15 mm höher als beim Beobachtungszustandes. Die Transpiration geht bei beiden Szenarien in der nahen Zukunft geringfügig um etwa 9 mma⁻¹ zurück.

Tabelle 21:	Modellierte	Bilanzkomponenten	des	Wasserhaushalts	(Mittel	1961-1990	bzw.	2021-
	2050) für di	e Klimaszenarien am	Stan	dort Nedlitz (Statis	che Bes	standesentw	icklun	g)

Szenario	Freiland- nieder- schlag ¹)	Inter- zeption	Ober- flä- chen- abfluss	Evapo- ration (real)	Transpi- ration (real)	Tiefen- sicke- rung	Tiefen- Sickerung (300 cm)	Speicher- änderung (0-300 cm)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	% des FNS	[mm]
MESS	558.0	305.5	2.2	58.5	183.8	8.8	1.6%	-0.7
IST_feucht	574.4	273.3	1.9	65.6	209.1	22.2	3.9%	2.3
IST_trocken	488.4	243.5	0.2	56.6	180.1	7.5	1.5%	0.6
A1B_feucht	538.1	259.9	1.8	64.1	200.1	9.1	1.7%	3.2
A1B_trocken	464.0	230.3	1.8	55.4	174.0	0.0	0.0%	2.4
B2_feucht	532.7	259.6	2.6	62.3	199.7	6.7	1.3%	1.9
B2_trocken	495.8	235.4	0.4	59.4	189.6	8.9	1.8%	2.2

¹) Messwert mit Richterkorrektur (Kapitel 4.6)



Abbildung 29: Standort Nedlitz, Szenarioplausibilität: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien MESS, IST_feucht und IST_trocken



Abbildung 30: Standort Nedlitz, Szenariovergleich: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien IST_feucht, A1B_feucht und B2_feucht.



Abbildung 31: Standort Nedlitz, Szenariovergleich: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien IST_trocken, A1B_trocken und B2_trocken

Wasserverfügbarkeit und Wasserstress

Auch am Standort Nedlitz wird in den Simulationen mit statischer Bestandesentwicklung insgesamt eine angespannte Situation der Wasserverfügbarkeit (Tabelle 22, Tabelle 23) projiziert: So tritt im Simulationszeitraum 1961-1990 des Beobachtungszustandes in allen Jahren eine Unterschreitung der 60% nFK an im Mittel an 275 Tagen des Jahres auf. Die 40% nFK wird ebenfalls in allen Jahren mit einer mittleren Länge von 212 Tagen unterschreitung in der Klimaszenarien unterscheiden sich bei der 60% nFK Unterschreitung in der Häufigkeit und der mittleren Länge nicht wesentlich vom Beobachtungszustand.

Tabelle 22:	Angaben zur Unterschreitung der 60% nFK am Standort Nedlitz: Anzahl der Jahre mit
	Unterschreitung der 60% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der
	60% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Statische Bestan-
	desentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	30	2.7	101.6	274.9
IST_feucht	30	3.3	75.0	245.5
IST_trocken	30	2.3	110.9	259.2
A1B_feucht	30	3.0	83.7	248.9
A1B_trocken	30	3.3	93.0	310.8
B2_feucht	30	2.8	92.6	259.9
B2_trocken	30	3.0	96.5	287.0

Bei der 40% nFK Unterschreitung unterscheiden sich die Häufigkeit von Beobachtungszustand und Kontrolllauf ebenfalls nicht, die mittlere Länge der Unterschreitungen sind bei den Kontrollläufen etwas niedriger als beim Beobachtungszustand. Bei den Klimaszenarien für die nahe Zukunft tritt ebenfalls in allen Jahren sowohl eine Unterschreitung der 60% und 40% nFK auf. Bei den trockenen Szenarien ist dabei auch eine Zunahme der mittleren Gesamtlänge der Unterschreitung zu beobachten.

Tabelle 23:Angaben zur Unterschreitung der 40% nFK am Standort Nedlitz: Anzahl der Jahre mit
Unterschreitung der 40% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der
40% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Stastische Be-
standesentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	30	4.8	44.2	212.4
IST_feucht	30	4.9	37.1	181.9
IST_trocken	30	3.9	52.8	206.3
A1B_feucht	30	4.2	46.5	197.1
A1B_trocken	30	5.2	47.7	250.3
B2_feucht	30	4.2	47.1	199.4
B2_trocken	30	4.8	46.6	224.2

4.11.2.3.2 Dynamische Bestandesentwicklung

Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts

Die Wasserhaushaltskomponenten unterscheiden sich bei der dynamischen Bestandesentwicklung vor allem bei der Interzeption, der Evaporation und der Tiefensickerung deutlich von der statischen Entwicklung (Tabelle 24).

Tabelle 24:Modellierte Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts (Mittel 1961-1990 bzw. 2021-
2050) für die Klimaszenarien am Standort Nedlitz (Dynamische Bestandesentwicklung)

Szenario	Freiland- nieder- schlag ¹)	Inter- zeption	Ober- flä- chen- abfluss	Evapo- ration (real)	Transpi- ration (real)	Tiefen- sicke- rung	Tiefen- Sickerung (300 cm)	Speicher- änderung (0-300 cm)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	% des FNS	[mm]
MESS	558.0	250.3	2.2	83.1	187.8	36.0	6.4%	-1.5
IST_feucht	574.4	226.5	2.0	90.5	210.4	44.0	7.7%	1.0
IST_trocken	488.4	203.8	0.1	79.1	186.9	18.3	3.7%	0.2
A1B_feucht	538.1	211.7	1.8	91.0	204.4	25.6	4.8%	3.6
A1B_trocken	464.0	187.3	1.8	81.4	187.3	1.6	0.3%	4.6
B2_feucht	532.7	211.9	2.5	88.9	206.8	19.7	3.7%	2.9
B2_trocken	495.8	192.0	0.3	85.4	197.1	16.4	3.3%	4.7

¹) Messwert mit Richterkorrektur (Kapitel 4.6)

Die Interzeption ist um etwa 40-50 mma⁻¹ niedriger, wodurch sich der Bestandesniederschlag entsprechend erhöht. Dadurch erhöht sich die Evaporation um 20-25 mm und die Tiefensickerung um 10- 25 mma⁻¹. Die Transpiration erhöht sich dagegen nur unwesentlich. Die Unterschiede zwischen der statischen und dynamischen Entwicklung machen deutlich, dass bei jungen Beständen die Verwendung einer statischen Bestandesentwicklung die Ergebnisse verfälschen können.

Wasserverfügbarkeit und Wasserstress

Mit dynamischer Bestandesentwicklung (Tabelle 25, Tabelle 26) ergeben sich für den Beobachtungszustand und die Kontrollläufe eine um ca. 10 - 20% geringere Anzahl von Wasserstresstagen im Vergleich zu der statischen Bestandesentwicklung, sowohl bei der 60% und 40% Unterschreitung.

Tabelle 25:	Angaben zur Unterschreitung der 60% nFK am Standort Nedlitz: Anzahl der Jahre mit
	Unterschreitung der 60% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der
	60% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Dynamische Be-
	standesentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	30	2.8	85.4	242.3
IST_feucht	29	2.8	75.1	212.7
IST_trocken	30	2.4	93.9	222.6
A1B_feucht	30	3.0	69.8	211.9
A1B_trocken	30	3.1	84.1	264.1
B2_feucht	30	2.7	80.3	214.5
B2_trocken	30	3.2	77.0	246.8

Tabelle 26:Angaben zur Unterschreitung der 40% nFK am Standort Nedlitz: Anzahl der Jahre mit
Unterschreitung der 40% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der
40% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Dynamische Be-
standesentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	29	4.3	43.2	186.3
IST_feucht	29	4.3	36.0	156.7
IST_trocken	30	4.0	42.2	168.9
A1B_feucht	30	4.0	40.8	162.0
A1B_trocken	30	4.7	42.9	202.1
B2_feucht	30	4.1	39.7	163.9
B2_trocken	30	4.8	37.5	180.3

Das gleiche gilt auch für die Klimaszenarien der nahen Zukunft. Hier ist der Wasserstress beim statischen Bestand ebenfalls stärker ausgeprägt. In der dynamischen Simulation treten auch hier ca. 10 - 20% weniger Wasserstresstage auf als in der statischen Simulation.

Unter der Annahme, dass am Standort Nedlitz das feuchte Szenario eine höhere Plausibilität aufweist, wäre zukünftig eher mit einem Rückgang des Wasserstresses zu rechnen, beim trockenen Szenario dagegen mit einer Zunahme von ca. 10%.

4.11.3 Lysimeter Colbitz

4.11.3.1 Modellparameter

pF Kurven

Das Lysimeter in Colbitz wurde 1972 mit drei Lagen gestörten Substrates befüllt: Die unterste Lage besteht aus einer Lage Filterkies (0.8-1.6 mm und 3.2-7.1 mm) von 50 cm Höhe. Auf den Filterkies folgt eine 2.5 m mächtige Lage aus Mittelsand. Als oberste Schicht schließt sich eine Lage aus feinsandigem Mittelsand von 1 m Mächtigkeit an. Die Humusauflage wird als geringmächtig angegeben, sie wurde mit 1 cm in die Parametrisierung mit aufgenommen. Die van Genuchten Parameter und die gesättigte Leitfähigkeiten wurden Anhand der Substratangabe nach der KA5 (2005) abgeschätzt (Tabelle 18, Abbildung 32).

Substratschichten des Lysimeter Colbitz für den Feinboden. (θ s: Wassergehalt bei Stigung, θ r: Residualwassergehalt, α , n, m: van Genuchten-Parameter [-])									
Horizont (cm)	θ _s (Vol- %)	θ _r (Vol-%)	α (m ⁻¹)	n	т	<i>K</i> ₅ (cm d⁻¹)	FK (Vol-%)	nFK (Vol-%)	PWP (Vol-%)
+1-0	76.6	1.0	1.2880	1.2039	0.169	8	69.6	43.0	26.6
0-100	53.0	7.0	1.9520	2.7730	0.639	490	30.9	23.9	7.0
100-350	42.0	4.0	6.8630	2.2450	0.555	675	10.0	6.0	4.0
350-400	42.0	4.0	6.8630	2.2450	0.555	675	10.0	6.0	4.0

Tabelle 27: Van Genuchten-Parameter, gesättigte Leitfähigkeit, FK, nFK und PWP für die gestörten



Abbildung 32:pF-WG- Kurven gestörtes Substrat, Lysimeter Colbitz., parametrisiert nach van Genuchten (1980) für den Feinboden

Bestandesentwicklung

Die langfristige dynamische Bestandesentwicklung während des Simulationszeitraumes von 1960 – 2050 (Tabelle 28) wurde vom AG mit dem Waldplaner (<u>http://www.nw-fva.de/index.php?id=216</u>) berechnet (vgl. Kap. 4.4.5.9). Aus der Stammzahl N und dem Stammdurchmesser dg wurde mit dem Modell nach Burger (1926- 1953) der jeweilige LAI des Bestandes bestimmt. Für die Bodenbedeckung wurde pauschal ein LAI von 0,5 angenommen und zum Bestandes – LAI addiert.

In den ersten 15 Jahren der Bestandesentwicklung wurde ein dynamisches Wurzelwachstum simuliert. Ausgehend von einer Anfangstiefe von 0,25 cm wuchsen die Wurzeln mit einer Wachstumsrate von 0,1 cm*a⁻¹ bis zur dann statischen Endtiefe von 1,75 m. Die Gesamtwurzellänge wurde in diesem Zeitraum von einem Anfangswert von 10 mm⁻² auf 3000 mm⁻² erhöht.

Jahr	dg (cm)	hg (m)	N (ha⁻¹)	Alter (a)	LAI
1973	0.0	0.2	8712	2	0.6
1974	0.0	0.4	8712	3	0.8
1975	0.0	0.6	8712	4	0.9
1976	0.0	0.8	8712	5	1.1
1977	0.0	1.3	8576	6	1.2
1978	1.0	1.6	8394	7	1.5
1979	1.5	2.3	8379	8	1.8
1980	2.0	2.8	8349	9	2.0
1981	2.5	3.0	8318	10	2.1
1982	3.0	3.2	6667	11	2.2
1983	3.5	3.9	6663	12	2.3
1984	4.0	4.6	6660	13	2.6
1985	4.5	5.2	6656	14	2.8
1986	4.9	5.9	6652	15	3.0
1987	5.4	6.4	6453	16	3.3
1988	5.9	7.0	6256	17	3.4
1989	6.4	7.5	6056	18	3.5
1990	6.9	8.1	5856	19	3.6
1991	7.4	8.6	5656	20	3.7
1992	7.9	9.2	5456	21	3.8
1993	8.4	9.7	5256	22	3.9
1994	9.0	10.5	5212	23	4.1
1995	9.7	10.7	4968	24	3.6
1996	11.0	11.8	2840	25	3.1
1997	11.9	12.5	2824	26	2.7
1998	12.9	13.2	2824	27	2.8
2003	14.5	15.5	2276	32	2.9
2008	16.1	17.3	1976	37	3.7
2013	17.5	18.9	1724	42	4.6
2018	18.7	20.3	1516	47	4.0
2023	20.0	21.6	1292	52	3.9
2028	21.3	22.7	1096	57	3.7
2033	22.7	23.7	952	62	3.5
2038	23.7	24.6	860	67	3.4
2043	24.6	25.3	800	72	3.3
2048	25.6	26.1	732	77	3.2
2053	26.9	26.8	628	82	3.1

Tabelle 28: Vergangene und zukünftige Entwicklung des Bestandes Lysimeter Colbitz

4.11.3.2 Kalibrierung des Sickerwasseranfalls

Der Vergleich von gemessenem und simuliertem Sickerwasseranfall zeigt v. a. in den ersten Jahren nach Befüllung und Neuanlage sowie gegen Ende des Messzeitraums u. a. im Frühjahr zu hohe simulierte Sickerwassermengen. Im restlichen Jahr sowie in der ersten Hälfte der 90er Jahre insgesamt ist dagegen eine meist gute Übereinstimmung zu beobachten (Abbildung 33, Abbildung 34). Mögliche Ursache für die in der Simulation im Mittel ca. 40 mm/a zu hohen Sickerwasserraten ist die Verwendung der Klimadaten der Station Gardelegen, welche sich in einiger Entfernung zum Lysimeter befindet. Darüber hinaus trägt möglicherweise auch der so genannte Inseleffekt des Lysimeters v. a. zu den Unterschieden im Frühjahr bei: Ein Lysimeter erwärmt sich im Frühjahr erfahrungsgemäß etwas schneller als die Umgebung, was zu einer erhöhten Evaporation führt. Dies kann durch die Anpassung der bodenspezifischen Verdunstungsparameter in der Simulation nicht nachvollzogen werden.



Abbildung 33: Vergleich des gemessenen und simulierten Sickerwasseranfalls des Lysimeters Colbitz, oben: täglicher Sickerwasseranfall gemessen (blau) und simuliert (rot), unten Differenz zwischen simuliert und gemessen (rot), sowie Verlauf des LAI (blau).



Abbildung 34: Vergleich des gemessenen und simulierten kumulierten Sickerwasseranfalls des Lysimeters Colbitz, oben: täglicher Sickerwasseranfall gemessen (blau) und simuliert (rot), unten Differenz zwischen simuliert und gemessen (rot), sowie Verlauf des LAI (blau).

4.11.3.3 Wasserhaushaltssimulationen auf Grundlage von Klimaszenarien

4.11.3.3.1 Statische Bestandesentwicklung

Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts

Hinsichtlich der Plausibilität des Niederschlags für den Projektionszeitraum gelten für das Lysimeter Colbitz analoge Aussagen wie für den Standort Klötze (vgl. Abschnitt 4.11.1.3.1), da hier die gleiche Klimastation verwendet wurde: Es ist nur für das jeweils feuchte Szenario die Plausibilität gegeben. Bei den feuchten Szenarien wirkt sich die signifikante Abnahme des Niederschlages in der nahen Zukunft im Wesentlichen nur auf die Tiefensickerung aus (Tabelle 29). Diese nimmt etwa um 35 mm*a⁻¹ ab.
Szenario	Freiland- nieder- schlag ¹)	Inter- zeption	Ober- flä- chen- abfluss	Evapo- ration (real)	Transpi- ration (real)	Tiefen- sicke- rung	Tiefen- Sickerung (300 cm)	Speicher- änderung (0-300 cm)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	% des FNS	[mm]
MESS ²	621.9	198.7	0.0	63.1	304.4	64.5	10.4%	-8.8
IST_feucht ²	583.8	177.3	0.0	60.2	297.6	55.7	9.5%	-7.0
IST_trocken ²	525.0	162.6	0.0	55.9	276.4	38.8	7.4%	-8.8
A1B_feucht	568.0	173.4	0.0	57.3	316.1	18.4	3.2%	2.8
A1B_trocken	476.4	150.7	0.0	52.0	271.7	0.0	0.0%	2.0
B2_feucht	556.9	174.3	0.0	55.6	304.3	20.9	3.8%	1.8
B2_trocken	531.0	158.9	0.0	54.7	298.2	13.5	2.5%	5.7

 Tabelle 29:
 Modellierte Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts f
 ür die Klimaszenarien am Lysimeter Colbitz (Statische Bestandesentwicklung)

¹) Messwert mit Richterkorrektur (Kapitel 4.6), ²) Zeitraum: 1974 - 1990



Abbildung 35: Lysimeter Colbitz, Szenarioplausibilität: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien MESS, IST_feucht und IST_trocken



Abbildung 36: Lysimeter Colbitz, Szenariovergleich: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien IST_feucht, A1B_feucht und B2_feucht



Abbildung 37: Lysimeter Colbitz, Szenariovergleich: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien IST_trocken, A1B_trocken und B2_trocken.

Wasserverfügbarkeit und Wasserstress

Am Lysimeter Colbitz ist die Wasserverfügbarkeit (Tabelle 30, Tabelle 31) mit simulierter statischer Bestandesentwicklung extrem eingeschränkt. Im Simulationszeitraum 1974-1990 des Beobachtungszustandes wird für jedes Jahr eine Unterschreitung der 60% nFK an im Mittel 344 Tagen des Jahres berechnet. Die 40% nFK wird in 17 Jahren mit einer mittleren Länge von 234 Tagen unterschritten. Mit den Kontrollläufen der Klimaszenarien wird die 60% nFK ebenfalls in jedem Jahr unterschritten, wobei die mittleren Längen in beiden Fällen nahezu gleich sind. Bei der 40% nFK Unterschreitung liegt die Häufigkeit der Unterschreitung ebenfalls bei 17 Jahren, die mittlere Länge erhöht sich um etwa 40 Tage. Bei den Klimaszenarien für die nahe Zukunft tritt in allen Jahren sowohl eine Unterschreitung der 60% und 40% nFK auf.. Dabei wird bei allen Szenarien der 60% Wert nahezu das ganze Jahr unterschritten, d.h. es kommt nicht mehr zu einer Auffüllung des Bodenspeichers während des ganzen Jahres. Bei der 40% Unterschreitung steigt die mittlere Länge bei den feuchten Szenarien um 40 – 50 Tage an, bei den trockenen Szenarien beträgt diese 80 – 100 Tage.

Tabelle 30:Angaben zur Unterschreitung der 60% nFK am Lysimeter Colbitz: Anzahl der Jahre mit
Unterschreitung der 60% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der
60% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Statische Bestan-
desentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	18	1.6	212.9	344.0
IST_feucht	18	1.8	185.0	340.0
IST_trocken	18	1.3	258.2	345.2
A1B_feucht	30	1.3	286.4	363.8
A1B_trocken	30	1.0	352.5	365.2
B2_feucht	30	1.2	294.6	364.3
B2_trocken	30	1.5	241.5	363.2

Tabelle 31: Angaben zur Unterschreitung der 40% nFK am Lysimeter Colbitz: Anzahl der Jahre mit Unterschreitung der 40% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der 40% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Statische Bestandesentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	17	2.8	85.9	237.9
IST_feucht	17	1.9	147.0	277.5
IST_trocken	17	2.5	108.4	274.9
A1B_feucht	30	2.5	117.2	289.8
A1B_trocken	30	2.2	153.2	337.9
B2_feucht	30	2.8	98.6	280.0
B2_trocken	30	2.1	145.4	311.1

4.11.3.3.2 Dynamische Bestandesentwicklung

Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts

Da es sich bei dem Bestand des Lysimeters Colbitz um eine Neubepflanzung handelt, unterscheiden sich die Wasserhaushaltskomponenten des Beobachtungszustandes und der Kontrollläufe der dynamischen Bestandesentwicklung erheblich von denen der statischen. Die Verdunstungskomponenten (Interzeption, Evaporation und Transpiration) sind bei der dynamischen Entwicklung erheblich niedriger als bei der statischen. Dagegen ist die Tiefensickerung deutlich höher (Tabelle 32).

Durch die weitere Zunahme des LAI in der nahen Zukunft erhöhen sich bei allen Szenarien die Interzeptionsverluste und die Transpiration, die Tiefensickerung geht dagegen entsprechend zurück. Auch hier wird deutlich, dass bei jungen Beständen die Verwendung einer statischen Bestandesentwicklung die Ergebnisse verfälschen können.

Tabelle 32:	Modellierte Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts für die Klimaszenarien am Lysi-
	meter Colbitz (Dynamische Bestandesentwicklung)

Szenario	Freiland- nieder- schlag ¹)	Inter- zeption	Ober- flä- chen- abfluss	Evapo- ration (real)	Transpi- ration (real)	Tiefen- sicke- rung	Tiefen- Sickerung (300 cm)	Speicher- änderung (0-300 cm)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	% des FNS	[mm]
MESS	621.9	118.9	0.0	95.8	260.2	156.2	25.1%	-9.1
IST_feucht	583.8	107.6	0.0	92.7	284.0	109.7	18.8%	-10.1
IST_trocken	525.0	95.9	0.0	86.1	259.9	92.6	17.6%	-9.5
A1B_feucht	568.0	152.6	0.0	70.3	312.4	30.3	5.3%	2.4
A1B_trocken	476.4	132.0	0.0	63.8	275.5	0.3	0.1%	4.7
B2_feucht	556.9	152.1	0.0	68.5	299.5	35.4	6.4%	1.4
B2_trocken	531.0	138.9	0.0	67.4	296.3	22.2	4.2%	6.0

¹) Messwert mit Richterkorrektur (Kapitel 4.6)

Wasserverfügbarkeit und Wasserstress

Bei den Simulationen mit dynamischer Bestandesentwicklung ist die Häufigkeit der nFK Unterschreitung beim Beobachtungszustand genauso hoch wie bei der statischen Entwicklung (Tabelle 33, Tabelle 34). Bei der 60% nFK Unterschreitung geht die mittlere Gesamtlänge der Unterschreitung geringfügig, bei 40% nFK deutlich zurück. Bei der dynamischen Entwicklung wird in der nahen Zukunft wie bei der statischen Entwicklung sowohl bei den feuchten als auch bei den trockenen Szenarien die mittlere Gesamtlänge die 60% nFK nahezu das gesamte Jahr unterschritten. Bei 40% nFK sind die Werte insgesamt etwas niedriger als bei der statischen Simulation. Am Lysimeter Colbitz ist die Wasserverfügbarkeit schon jetzt extrem eingeschränkt. In der nahen Zukunft ist mit einer weiteren Verschärfung der Situation zu rechnen. Weiterhin wird deutlich, dass speziell bei der Simulation junger Bestände die Verwendung einer statischen Bestandesentwicklung die Ergebnisse erheblich beeinflusst.

Tabelle 33:Angaben zur Unterschreitung der 60% nFK am Lysimeter Colbitz: Anzahl der Jahre mit
Unterschreitung der 60% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der
60% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Dynamische Be-
standesentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	18	2.9	112.8	333.0
IST_feucht	18	2.4	139.3	333.4
IST_trocken	18	1.8	191.7	341.7
A1B_feucht	30	1.4	258.6	363.0
A1B_trocken	30	1.1	331.0	365.1
B2_feucht	30	1.7	217.2	363.0
B2_trocken	30	1.5	235.5	362.0

Tabelle 34:Angaben zur Unterschreitung der 40% nFK am Lysimeter Colbitz: Anzahl der Jahre mit
Unterschreitung der 40% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der
40% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Dynamische Be-
standesentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	17	3.6	46.3	169.1
IST_feucht	17	3.1	72.2	225.2
IST_trocken	17	2.4	98.0	230.8
A1B_feucht	30	3.1	87.7	275.4
A1B_trocken	30	2.6	124.2	323.8
B2_feucht	30	2.6	100.7	262.3
B2_trocken	30	3.1	96.8	297.8

4.11.4 Standort Auerberg

Tabelle 35:Van Genuchten-Parameter, gesättigte Leitfähigkeit, FK, nFK und PWP für die Norm-
Braunerde am Standort Auerberg für den Feinboden, (θ s: Wassergehalt bei Sättigung,
 θ r: Residualwassergehalt, α , n, m: van Genuchten-Parameter [-])

Horizont (cm)	θ _s (Vol- %)	θ _r (Vol-%)	α (m ⁻¹)	n	т	<i>K</i> s (cm d⁻¹)	FK (Vol-%)	nFK (Vol-%)	PWP (Vol-%)
+1.5-0	76.6	1.00	1.2880	1.2039	0.169	8	69.6	43.0	26.6
0-4	71.2	16.91	3.3230	1.8617	0.463	2616	42.8	25.6	17.2
4-26.5	67.5	2.10	22.1640	1.2025	0.168	1937	40.2	25.5	14.6
26.5-48.5	67.5	1.12	23.0160	1.1910	0.160	1389	40.7	25.7	15.0
48.5-100	52.0	15.00	1.8360	2.2060	0.547	60	38.0	23.0	15.0



Abbildung 38: pF-WG- Kurven Norm-Braunerde, Standort Auerberg, Messwerte und parametrisiert nach van Genuchten (1980)

Szenario	Freiland- nieder- schlag ¹)	Inter- zeption	Ober- flä- chen- abfluss	Evapo- ration (real)	Transpi- ration (real)	Tiefen- sicke- rung	Tiefen- Sickerung (300 cm)	Speicher- änderung (0-300 cm)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	% des FNS	[mm]
MESS	1048.1	97.4	0.0	125.2	272.5	554.7	52.9%	-1.7
IST_feucht	1195.4	99.8	0.0	138.2	288.2	671.8	56.2%	-2.5
IST_trocken	992.7	92.5	0.0	130.3	284.2	489.2	49.3%	-3.5
A1B_feucht	1147.2	85.4	0.0	139.8	308.6	613.8	53.5%	-0.3
A1B_trocken	916.6	79.0	0.0	132.2	312.9	396.4	43.2%	-3.9
B2_feucht	1147.9	88.2	0.0	138.4	295.2	630.6	54.9%	-4.5
B2_trocken	984.4	81.6	0.0	131.9	291.4	481.5	48.9%	-1.9

 Tabelle 36:
 Modellierte Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts f
 ür die Klimaszenarien am Standort Auersberg
 Output
 Output



Abbildung 39: Standort Auerberg, Szenarioplausibilität: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien MESS, IST_feucht und IST_trocken



Abbildung 40: Standort Auerberg, Szenariovergleich: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien IST_feucht, A1B_feucht und B2_feucht



Abbildung 41: Standort Auerberg, Szenariovergleich: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien IST_trocken, A1B_trocken und B2_trocken

Tabelle 37:Angaben zur Unterschreitung der 60% nFK am Standort Auerberg: Anzahl der Jahre mit
Unterschreitung der 60% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der
60% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Statische Bestan-
desentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	23	1.9	45.0	89.1
IST_feucht	23	1.8	37.7	72.9
IST_trocken	24	2.2	45.2	105.5
A1B_feucht	29	1.8	54.0	98.7
A1B_trocken	29	2.2	59.4	132.6
B2_feucht	26	1.8	52.2	96.5
B2_trocken	28	1.8	61.8	108.8

Tabelle 38:Angaben zur Unterschreitung der 40% nFK am Standort Auerberg: Anzahl der Jahre mit
Unterschreitung der 40% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der
40% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Statische Bestan-
desentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	13	1.5	61.3	96.3
IST_feucht	13	1.8	29.0	58.5
IST_trocken	19	2.5	27.9	74.9
A1B_feucht	25	2.1	29.8	62.8
A1B_trocken	27	2.0	43.1	86.3
B2_feucht	19	2.1	32.3	70.1
B2_trocken	26	1.5	41.3	63.5

4.11.5 Standort Brocken

Tabelle 39:Van Genuchten-Parameter, gesättigte Leitfähigkeit, FK, nFK und PWP für die stark pod-
solige Braunerde am Standort Brocken für den Feinboden (θ s: Wassergehalt bei Sätti-
gung, θ r: Residualwassergehalt, α , n, m: van Genuchten-Parameter [-])

Horizont (cm)	θ _s (Vol-%)	θ _r (Vol-%)	α (m⁻¹)	n	т	<i>K</i> ₅ (cm d⁻¹)	FK (Vol-%)	nFK (Vol-%)	PWP (Vol-%)
+4-0	76.6	1.0	1.2880	1.2039	0.169	8	69.6	43.0	26.6
0-40	89.9	49.3	4.0680	1.2271	0.185	5889	80.5	21.8	58.7
40-90	96.0	59.2	30.2250	1.1484	0.129	758	82.8	13.2	69.6
90-100	76.5	60.9	3.8880	1.2538	0.202	6600	72.6	8.7	63.9
100-130	58.0	20.7	3.1060	1.5410	0.351	36	44.0	22.0	22.0
130-165	53.0	12.1	4.2530	1.2340	0.190	16	43.0	22.0	21.0



Abbildung 42: pF-WG- Kurven stark podsolige Braunerde, Standort Brocken, Messwerte und parametrisiert nach van Genuchten (1980)

 Tabelle 40:
 Modellierte Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts f
ür die Klimaszenarien am Standort Brocken

Szenario	Freiland- nieder- schlag ¹)	Inter- zeption	Ober- flä- chen- abfluss	Evapo- ration (real)	Transpi- ration (real)	Laterl. Abfluss	Tiefen- sicke- rung	Tiefen- Sickerung (300 cm)	Speicher- änderung (0-300 cm)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	% des FNS	[mm]
MESS	2007.8	174.7	0.1	84.0	75.1	179.8	1525.1	76.0%	-31.0
IST_feucht	2147.1	162.0	0.7	84.9	72.6	185.7	1675.3	78.0%	-34.1
IST_trocken	1833.0	151.2	0.1	88.7	76.8	165.9	1380.8	75.3%	-30.5
A1B_feucht	2129.0	170.9	2.6	97.6	89.1	180.1	1625.6	76.4%	-36.8
A1B_trocken	1750.9	155.8	0.0	104.1	93.8	153.1	1277.5	73.0%	-33.5
B2_feucht	2080.9	150.3	0.7	91.7	82.6	178.4	1615.3	77.6%	-38.0
B2_trocken	1848.6	140.0	0.1	94.8	83.4	164.3	1395.5	75.5%	-29.4

1) Messwert mit Richterkorrektur (Kapitel 4.6)



Abbildung 43: Standort Brocken, Szenarioplausibilität: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien MESS, IST_feucht und IST_trocken



Abbildung 44: Standort Brocken, Szenariovergleich: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien IST_feucht, A1B_feucht und B2_feucht



Abbildung 45: Standort Brocken, Szenariovergleich: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien IST_trocken, A1B_trocken und B2_trocken

Am Standort Brocken konnten aufgrund der sehr hohen Niederschläge bei gleichzeitig relativ geringer Verdunstung weder für den Messzeitraum noch für die Zukunftsszenarien Unterschreitungen der 60% bzw. 40% nFK-Grenze ermittelt werden.

4.11.6 Standort Colbitz

Tabelle 41:Van Genuchten-Parameter, gesättigte Leitfähigkeit, FK, nFK und PWP für die schwach
podsolige Braunerde am Standort Colbitz für den Feinboden. (θ s: Wassergehalt bei Sät-
tigung, θ r: Residualwassergehalt, α , n, m: van Genuchten-Parameter [-])

Horizont (cm)	θ _s (Vol- %)	θ _r (Vol-%)	α (m ⁻¹)	n	т	<i>K</i> s (cm d⁻¹)	FK (Vol-%)	nFK (Vol-%)	PWP (Vol-%)
+4.5-0	76.6	1.00	1.2880	1.2039	0.169	8	69.6	43.0	26.6
0-15	45.2	1.51	11.1740	1.4554	0.313	5996	19.2	16.2	3.0
15-25	43.8	2.28	13.7360	1.4641	0.317	2488	17.3	13.9	3.4
25-70	37.4	1.66	9.8580	1.4818	0.325	2920	16.2	13.5	2.7
70-300	41.4	0.00	48.7510	1.5716	0.364	7612	5.8	5.6	0.2



Abbildung 46: pF-WG- Kurven schwach podsolige Braunerde, Standort Colbitz., Messwerte und parametrisiert nach van Genuchten (1980)

Tabelle 42:	Modellierte Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts für die Klimaszenarien am Stand-
	ort Colbitz.

Szenario	Freiland- nieder- schlag ¹)	Inter- zeption	Ober- flä- chen- abfluss	Evapo- ration (real)	Transpi- ration (real)	Tiefen- sicke- rung	Tiefen- Sickerung (300 cm)	Speicher- änderung (0-300 cm)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	% des FNS	[mm]
MESS	630.9	112.9	0.0	127.8	248.8	145.8	23.1%	-4.4
IST_feucht	605.1	102.3	0.0	129.1	256.8	117.6	19.4%	-0.8
IST_trocken	517.6	91.0	0.0	112.6	258.5	58.5	11.3%	-2.9
A1B_feucht	568.0	97.7	0.0	122.1	287.5	60.0	10.6%	0.6
A1B_trocken	476.4	84.6	0.0	106.3	276.5	7.9	1.7%	1.1
B2_feucht	556.9	96.8	0.0	118.4	272.8	69.7	12.5%	-0.8
B2_trocken	531.0	89.3	0.0	116.8	274.7	42.8	8.1%	7.4

Die für den Standort Colbitz verwendeten Niederschläge sind identisch mit den Werten für den Standort Klötze und werden daher nur einmal dargestellt (siehe Kap. 4.11.1.3).

Tabelle 43:Angaben zur Unterschreitung der 60% nFK am Standort Colbitz: Anzahl der Jahre mit
Unterschreitung der 60% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der
60% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Statische Bestan-
desentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	22	2.2	43.2	96.3
IST_feucht	28	1.9	54.1	100.5
IST_trocken	30	2.1	60.8	127.9
A1B_feucht	30	2.4	58.6	140.9
A1B_trocken	30	2.5	80.4	204.1
B2_feucht	29	2.4	60.2	145.4
B2_trocken	29	2.5	60.4	152.2

Tabelle 44:Angaben zur Unterschreitung der 40% nFK am Standort Colbitz: Anzahl der Jahre mit
Unterschreitung der 40% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der
40% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Statische Bestan-
desentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	14	2.9	26.3	75.0
IST_feucht	18	3.5	21.2	74.2
IST_trocken	24	2.5	39.4	98.4
A1B_feucht	30	2.1	42.4	90.5
A1B_trocken	30	2.9	46.6	135.2
B2_feucht	26	2.3	41.4	95.6
B2_trocken	28	2.2	40.4	87.9

4.11.7 Standort Friedrichrode

Tabelle 45:Van Genuchten-Parameter, gesättigte Leitfähigkeit, FK, nFK und PWP für die (Pseu-
dogley-) Parabraunerde am Standort Friedrichrode für den Feinboden. (θs: Wasserge-
halt bei Sättigung, θr: Residualwassergehalt, α, n, m: van Genuchten-Parameter [-])

Horizont (cm)	θ _s (Vol- %)	<i>θ</i> r (Vol-%)	α (m ⁻¹)	n	т	<i>K</i> s (cm d⁻¹)	FK (Vol-%)	nFK (Vol-%)	PWP (Vol-%)
+2.5-0	76.6	1.00	1.2880	1.2039	0.169	8	69.6	43.0	26.6
0-4	71.0	11.68	2.3690	1.9199	0.479	5435	45.9	33.9	11.9
4-32.5	55.8	5.99	4.0420	1.6023	0.376	1564	32.3	25.3	7.0
32.5-87.5	41.8	8.02	5.6860	1.1399	0.123	599	35.6	14.5	21.1
87.5-130	43.4	0.00	3.2620	1.1143	0.103	15	38.4	17.2	21.2
130-200	34.3	24.76	6.5070	1.3862	0.279	6929	30.1	4.7	25.4



Abbildung 47: pF-WG- Kurven (Pseudogley-)Parabraunerde, Standort Friedrichsrode., Messwerte und parametrisiert nach van Genuchten (1980)

Tabelle 46:	Modellierte Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts für die Klimaszenarien am Stand-
	ort Friedrichrode

Szenario	Freiland- nieder- schlag ¹)	Inter- zeption	Ober- flä- chen- abfluss	Evapo- ration (real)	Transpi- ration (real)	Tiefen- sicke- rung	Tiefen- Sickerung (300 cm)	Speicher- änderung (0-300 cm)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	% des FNS	[mm]
MESS	568.7	148.0	0.0	54.1	356.3	19.0	3.3%	-8.8
IST_feucht	629.5	140.3	0.0	60.9	396.8	39.2	6.2%	-7.6
IST_trocken	559.8	129.2	0.0	54.7	373.5	12.5	2.2%	-10.2
A1B_feucht	564.4	113.0	0.0	64.5	372.4	20.2	3.6%	-5.7
A1B_trocken	485.0	107.1	0.0	53.8	321.6	1.1	0.2%	1.3
B2_feucht	593.9	123.6	0.0	63.2	391.1	21.9	3.7%	-6.0
B2_trocken	531.7	111.5	0.0	56.7	353.5	12.9	2.4%	-2.9



Abbildung 48: Standort Friedrichrode, Szenarioplausibilität: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien MESS, IST_feucht und IST_trocken



Abbildung 49: Standort Friedrichrode, Szenariovergleich: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien IST_feucht, A1B_feucht und B2_feucht



Abbildung 50: Standort Friedrichrode, Szenariovergleich: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien IST_trocken, A1B_trocken und B2_trocken

Tabelle 47:	Angaben zur Unterschreitung der 60% nFK am Standort Friedrichrode: Anzahl der Jah-
	re mit Unterschreitung der 60% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung
	der 60% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Statische Be- standesentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	30	2.2	94.7	205.8
IST_feucht	30	2.0	91.1	182.5
IST_trocken	30	1.9	108.8	210.9
A1B_feucht	30	1.8	114.2	202.2
A1B_trocken	30	2.4	105.8	251.3
B2_feucht	30	2.4	80.8	197.2
B2_trocken	30	2.4	93.6	222.1

Tabelle 48:Angaben zur Unterschreitung der 40% nFK am Standort Friedrichrode: Anzahl der Jahre mit Unterschreitung der 40% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der 40% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Statische Bestandesentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	30	2.1	71.9	149.0
IST_feucht	28	1.9	73.0	141.0
IST_trocken	30	2.3	66.3	152.7
A1B_feucht	30	1.5	104.1	152.8
A1B_trocken	30	2.1	91.4	195.6
B2_feucht	29	1.9	79.6	148.4
B2_trocken	30	1.7	93.7	162.8

4.11.8 Standort Hasselfelde

Tabelle 49:Van Genuchten-Parameter, gesättigte Leitfähigkeit, FK, nFK und PWP für die Podsol-
Pseudogley-Braunerde am Standort Hasselfelde für den Feinboden. (θs: Wassergehalt
bei Sättigung, θr: Residualwassergehalt, α, n, m: van Genuchten-Parameter [-])

Horizont (cm)	θ _s (Vol- %)	θ _r (Vol-%)	α (m⁻¹)	n	т	<i>K</i> s (cm d⁻¹)	FK (Vol-%)	nFK (Vol-%)	PWP (Vol-%)
+3.5-0	76.6	1.00	1.2880	1.2039	0.169	8	46.0	26.5	19.5
0-2	66.6	18.74	3.1300	1.6636	0.399	8070	39.9	22.9	17.0
2-15	58.1	12.04	6.9360	1.3190	0.242	4847	41.8	32.0	9.8
15-35	65.1	8.75	3.0000	1.6517	0.395	3180	33.4	9.9	23.5
35-132.5	41.8	16.69	17.9110	1.1649	0.142	7586	46.0	26.5	19.5



Abbildung 51:pF-WG- Kurven Podsol-Pseudogley-Braunerde, Standort Hasselfelde, Messwerte und parametrisiert nach van Genuchten (1980)

 Tabelle 50:
 Modellierte Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts für die Klimaszenarien am Standort Hasselfelde

Szenario	Freiland- nieder- schlag ¹)	Inter- zeption	Ober- flä- chen- abfluss	Evapo- ration (real)	Transpi- ration (real)	Tiefen- sicke- rung	Tiefen- Sickerung (300 cm)	Speicher- änderung (0-300 cm)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	% des FNS	[mm]
MESS	1416.0	124.5	0.0	79.1	242.5	967.5	68.3%	2.4
IST_feucht	1223.1	157.8	0.0	81.0	243.2	741.8	60.6%	-0.7
IST_trocken	1049.8	148.3	0.0	78.4	243.2	580.3	55.3%	-0.4
A1B_feucht	1209.9	141.5	0.0	81.2	276.1	711.1	58.8%	0.0
A1B_trocken	1034.4	138.2	0.0	79.5	278.9	538.2	52.0%	-0.4
B2_feucht	1232.1	144.6	0.0	82.8	261.1	745.4	60.5%	-1.8
B2_trocken	1051.3	134.7	0.0	77.9	263.4	575.1	54.7%	0.1

Die für den Standort Hasselfelde verwendeten Niederschläge sind identisch mit den Werten für den Standort Schierke und werden daher nur einmal dargestellt (siehe Kap. 4.11.10).

Tabelle 51:Angaben zur Unterschreitung der 60% nFK am Standort Hasselfelde: Anzahl der Jahre
mit Unterschreitung der 60% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der
60% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Statische Bestan-
desentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	14	2.1	24.8	51.3
IST_feucht	17	1.8	17.1	31.2
IST_trocken	20	2.2	24.4	53.6
A1B_feucht	27	2.1	29.6	62.4
A1B_trocken	27	2.3	30.5	70.1
B2_feucht	22	2.3	25.5	57.9
B2_trocken	27	2.4	26.5	63.9

Tabelle 52:Angaben zur Unterschreitung der 40% nFK am Standort Hasselfelde: Anzahl der Jahre
mit Unterschreitung der 40% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der
40% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Statische Bestan-
desentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	6	1.7	22.9	38.2
IST_feucht	4	1.8	10.4	18.3
IST_trocken	6	1.3	22.6	30.2
A1B_feucht	18	1.9	19.4	36.6
A1B_trocken	14	2.3	15.8	36.2
B2_feucht	10	2.3	15.4	35.4
B2_trocken	17	1.3	27.2	35.2

4.11.9 Standort Ochsenkopf

Tabelle 53: Van Genuchten-Parameter, gesättigte Leitfähigkeit, FK, nFK und PWP für den Fahlerde-Pseudogley am Standort Ochsenkopf für den Feinboden(θs: Wassergehalt bei Sättigung, θr: Residualwassergehalt, α, n, m: van Genuchten-Parameter [-])

Horizont	$ heta_{s}$	θ_r	α	n	т	Ks	FK	nFK	PWP
(cm)	(Vol-	(Vol-%)	(m⁻¹)			(cm d⁻¹)	(Vol-%)	(Vol-%)	(Vol-%)
	%)								
+3.5-0	5-0	76.6	1.00	1.2880	1.2039	8	46.0	26.5	19.5
0-2	0-10	64.7	13.91	2.7920	1.7388	2462	43.1	28.7	14.5
2-15	10-30	43.8	7.60	5.9990	1.4352	106	27.0	17.6	9.4
15-35	10-35	33.3	12.66	3.1640	1.5989	1020	24.9	11.8	13.2
35-132.5	35-115	33.2	25.30	1.8480	1.1911	1166	32.3	4.3	28.0



Abbildung 52: pF-WG- Kurven Fahlerde-Pseudogley, Standort Ochsenkopf, Messwerte und parametrisiert nach van Genuchten (1980)

Tabelle 54:	Modellierte Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts für die Klimaszenarien am Stand-
	ort Ochsenkopf

Szenario	Freiland- nieder- schlag ¹)	Inter- zeption	Ober- flä- chen- abfluss	Evapo- ration (real)	Transpi- ration (real)	Tiefen- sicke- rung	Tiefen- Sickerung (300 cm)	Speicher- änderung (0-300 cm)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	% des FNS	[mm]
MESS	632.0	103.5	0.0	67.7	296.5	163.7	25.9%	0.5
IST_feucht	655.6	98.6	0.0	70.3	294.1	192.1	29.3%	0.6
IST_trocken	567.7	90.1	0.0	65.1	278.0	134.8	23.7%	-0.2
A1B_feucht	608.0	81.0	0.0	73.6	272.8	180.4	29.7%	0.2
A1B_trocken	523.1	78.0	0.0	68.6	271.0	104.0	19.9%	1.5
B2_feucht	622.6	86.2	0.1	72.9	284.4	178.1	28.6%	0.9
B2_trocken	549.2	81.9	0.0	68.2	267.6	129.8	23.6%	1.8



Abbildung 53: Standort Ochsenkopf, Szenarioplausibilität: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien MESS, IST_feucht und IST_trocken



Abbildung 54: Standort Ochsenkopf, Szenariovergleich: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien IST_feucht, A1B_feucht und B2_feucht



Abbildung 55: Standort Ochsenkopf, Szenariovergleich: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien IST_trocken, A1B_trocken und B2_trocken

Tabelle 55:	Angaben zur Unterschreitung der 60% nFK am Standort Ochsenkopf: Anzahl der Jahre
	und mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der 60% nFK pro Jahr, mittlere
	Perioden- und Gesamtlänge (Statische Bestandesentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	30	1.9	83.2	158.2
IST_feucht	30	2.4	64.8	155.6
IST_trocken	30	2.4	67.3	159.3
A1B_feucht	30	2.2	75.7	164.0
A1B_trocken	30	1.9	95.6	184.8
B2_feucht	30	2.5	66.3	163.6
B2_trocken	30	2.0	83.1	166.3

Tabelle 56:Angaben zur Unterschreitung der 40% nFK am Standort Ochsenkopf: Anzahl der Jahre
und mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der 40% nFK pro Jahr, mittlere
Perioden- und Gesamtlänge (Statische Bestandesentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	30	3.7	30.3	113.2
IST_feucht	30	3.7	28.5	105.5
IST_trocken	30	3.2	33.7	108.9
A1B_feucht	30	2.9	41.4	121.4
A1B_trocken	30	3.6	39.5	140.9
B2_feucht	30	3.5	31.6	111.5
B2_trocken	30	3.1	38.7	121.4

4.11.10 Standort Schierke

Tabelle 57:Van Genuchten-Parameter, gesättigte Leitfähigkeit, FK, nFK und PWP für die schwach
podsolige Braunerde am Standort Schierke für den Feinboden(θs: Wassergehalt bei
Sättigung, θr: Residualwassergehalt, α, n, m: van Genuchten-Parameter [-])

Horizont (cm)	θ _s (Vol- %)	<i>θ</i> _r (Vol-%)	α (m ⁻¹)	n	т	<i>K</i> s (cm d⁻¹)	FK (Vol-%)	nFK (Vol-%)	PWP (Vol-%)
+7-0	91.0	4.97	3.5520	2.1287	0.530	16157	36.7	31.6	5.0
0-10	54.7	14.02	1.3160	1.9414	0.485	1028	45.5	31.2	14.3
10-15	74.2	10.79	1.8680	2.0683	0.517	3067	51.1	40.2	10.9
15-30	68.6	13.45	3.0740	1.6271	0.385	2454	46.0	31.4	14.6
30-50	58.2	5.98	2.2680	2.1285	0.530	1210	34.4	28.4	6.0
50-100	41.5	14.24	35.2290	1.5609	0.359	2998	19.0	4.6	14.5



Abbildung 56:pF-WG- Kurven schwach podsolige Braunerde, Standort Schieke., Messwerte und parametrisiert nach van Genuchten (1980)

Szenario	Freiland- nieder- schlag ¹)	Inter- zeption	Ober- flä- chen- abfluss	Evapo- ration (real)	Transpi- ration (real)	Laterl. Abfluss	Tiefen- sicke- rung	Tiefen- Sickerung (300 cm)	Speicher- änderung (0-300 cm)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	% des FNS	[mm]
MESS	1416.0	573.5	0.1	31.0	345.6	121.5	359.4	25.4%	-15.1
IST_feucht	1223.1	673.9	0.0	29.9	348.4	55.9	123.9	10.1%	-9.0
IST_trocken	1049.8	599.2	0.2	25.1	339.5	28.7	60.1	5.7%	-3.0
A1B_feucht	1209.9	635.9	1.1	28.6	369.1	53.7	129.6	10.7%	-8.1
A1B_trocken	1034.4	582.2	1.2	22.9	346.6	28.6	50.8	4.9%	2.1
B2_feucht	1232.1	645.3	0.3	29.1	360.2	54.6	150.2	12.2%	-7.6
B2_trocken	1051.3	593.0	0.4	24.1	334.2	34.4	65.3	6.2%	0.0

 Tabelle 58:
 Modellierte Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts für die Klimaszenarien am Standort Schierke



Abbildung 57: Standort Schierke, Szenarioplausibilität: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien MESS, IST_feucht und IST_trocken



Abbildung 58: Standort Schierke, Szenariovergleich: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien IST_feucht, A1B_feucht und B2_feucht



Abbildung 59: Standort Schierke, Szenariovergleich: Monats- und Jahresniederschlag der Klimaszenarien IST_feucht, A1B_feucht und B2_feucht

Tabelle 59: Angaben zur Unterschreitung der 60% nFK am Standort Schierke: Anzahl der Jahre mit Unterschreitung der 60% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der 60% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Statische Bestandesentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	11	1.7	42.4	75.7
IST_feucht	26	1.5	78.1	89.3
IST_trocken	27	2.4	54.3	131.0
A1B_feucht	28	1.5	79.6	119.5
A1B_trocken	30	2.1	80.5	172.1
B2_feucht	26	1.5	78.1	117.3
B2_trocken	27	1.7	96.3	164.3

Tabelle 60:Angaben zur Unterschreitung der 40% nFK am Standort Schierke: Anzahl der Jahre mit
Unterschreitung der 40% nFK, mittlere Anzahl der Perioden mit Unterschreitung der
40% nFK pro Jahr, mittlere Periodenlänge und mittlere Gesamtlänge (Statische Bestan-
desentwicklung).

Szenario	Anzahl Jahre	Mittlere Periodenanzahl	Mittlere Perioden- länge (Tage)	Mittlere Gesamt- länge (Tage)
MESS	8	1.4	36.2	49.8
IST_feucht	16	2.0	37.3	74.7
IST_trocken	24	2.0	40.2	82.2
A1B_feucht	27	2.0	39.2	78.5
A1B_trocken	28	2.0	56.7	113.4
B2_feucht	20	1.6	58.1	90.1
B2_trocken	26	2.2	50.1	108.0

5 Teilprojekt IV: Risikoanalyse

5.1 Einleitung

Das Klima wirkt sich auf alle Bestandteile unserer Umwelt aus, auch und besonders auf phytophage Insekten. Klimaänderungen, verändern bei diesen die Lebensrhythmen, die Agressivität und das Verbreitungsareal der Arten, prominente Beispiele sind Eichenprozessionsspinner und Buchdrucker (CUSTERS, 2003 und JÖNSSON et al. 2007). Besonders Massenwechsel von Insekten sind direkt und indirekt von Klimaparametern abhängig (FEEMERS et al., 2003).

Daneben dringen Neozoen nach Deutschland ein (z.B. der Asiatische Laubholzbock, SCHRÖDER, 2006), die aufgrund der sich ändernden Witterung zunehmend bessere Entwicklungsbedingungen vorfinden werden.

Für Deutschland und speziell für Sachsen-Anhalt werden höhere Sommertemperaturen bei gleichzeitig geringeren Niederschlägen in der Vegetationsperiode und höhere Wintertemperaturen und -niederschläge prognostiziert. Dieser Trend hat sich bereits im vergangenen Jahrhundert abgezeichnet (LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ SACHSEN-ANHALT, 2007). Diese Veränderungen können begünstigend auf Insekten wirken. Bruten können sich schneller entwickeln und pro Jahr können mehr Generationen entstehen. Dabei treffen Insekten zunehmend auf physiologisch schwächere Wirte, als das in der Vergangenheit der Fall war.

Häufigere und stärkere Stürme bei nicht gefrorenem Boden werden mehr Sturmholz verursachen und damit das Brutraumangebot für den Borkenkäfer zusätzlich erhöhen.

Der blaue Kiefernprachtkäfer (Phaenops

cyanea) ist ein bläulich bis grünlich glänzender Käfer, zwischen 7-12 mm lang (Abbildung 60). Er nutzt vor allem Kiefern im Stangen- und Baumholzalter für die Eiablage, seltener andere Nadelbäume wie Fichte, Tanne und Lärche. Der Kiefernprachtkäfer findet in lichten Beständen ideale warmen, Lebensbedingungen. Auftreten Sein nimmt mit der Kontinentalität zu.

Eine Käfergeneration ist meist 2-Jährig, selten 1 oder 3-jährig, im liegenden Holz dagegen zumeist einjährig.

Die Imagines erscheinen im Juni-August bei Temperaturen oberhalb von 25°C,



Abbildung 60: Imago des blauen Kiefernprachtkäfer (Phaenops cyanea) Quelle: www.entomart.be

nach einem Reifungsfraß an Kiefernnadeln, zum Schwarmflug. Die Weibchen werden begattet und legen ihre Eier im Juli-August in Borkenritzen der Wirtsbäume ab.

Die Junglarven schlüpfen im August des Jahres der Eiablage und bohren sich in die Borke bis auf die Kambialschicht ein. Hier überwintern sie, führen im Folgejahr den Fraß fort und überwintern nochmals. Im Mai des darauf folgenden Jahres verpuppen sie sich und schlüpfen im Juni.

Die Larven fressen 2 mm breite, geschlängelte Gänge in der Kambialschicht, ältere Larven hinterlassen bis zu 10 mm breite Gänge, die sich auch überkreuzen können. Der Befall zerstört die Wasserleitfähigkeit und bringt den Wirtsbaum zum Absterben.

Der Kiefernprachtkäfer ist in erster Linie ein Sekundärschädling, der nach ungünstigen Witterungseinflüssen, Pilzbefall oder Fraßeinwirkung durch andere Forstinsekten (Triebfraß durch Waldgärtner, Raupenfraß) auftritt. Niederschlagsreiche Sommerwitterung bremst den Befall.

Er neigte in Sachsen-Anhalt in besonders trockenen Jahren zu Massenvermehrungen (1975, 1976 und 1982), eine geringe Schadholzmenge von unter 1fm / 100ha Kiefernfläche fällt jedoch jährlich an.

Der Buchdrucker (*Ips typographus* L.) ist ein dunkelbrauner bis schwarzer walzenförmiger Käfer mit einer Länge von 4-5,5 mm (Abbildung 61). Auf dem ganzen Körper besitzt er lange Härchen. Er gehört zu den Rindenbrütern. Ips typographus befällt fast ausschließlich Fichten, selten Weymouths- und Schwarzkiefer, Weisstanne oder Douglasie.



Abbildung 61: Imago des Buchdruckers (Ips typographus), Quelle: M. Kolb

Die erwachsenen, in der Bodenstreu oder am Stamm überwinterten Imagines beginnen ab Mitte April mit dem Schwarmflug. Pioniermännchen suchen anhand von Duftstoffen bruttaugliche, d.h. kranke, geschwächte oder frisch gefällte Fichten. Haben diese Individuen einen tauglichen Baum gefunden, beginnen sie mit dem Einbohren in die Borke und dem Anlegen der Rammelkammer (Paarungsraum) im Bast. Gleichzeitig stößt dieses Männchen Lockstoffe für andere Artgenossen (Männchen und Weibchen) aus, um weitere Käfer anzulocken. Die Fichte wehrt sich gegen die Besiedlung mit der Produktion von Harz, welches die eingedrungenen Käfer ersticken soll. Austretendes Harz ist ein gut sichtbares Merkmal an befallenen Fichten. Überbesiedelung des Wirtsbaumes durch Artgenossen weiß der Käfer durch die Produktion repellenter Pheromone zu unterbinden. Jedes Männchen paart sich mit 2-3 Weibchen, die daraufhin das stimmgabelförmige Brutsystem anlegen. In die Einischen der Muttergänge werden einzelne Eier abgelegt. Die Larven nagen in den nächsten 1,5 bis 2 Wochen Larvengänge senkrecht zum Muttergang in den Bast. Anschließend folgt für 1-2 Wochen Puppenruhe. Danach erfolgt der Reifungsfraß der jungen, geschlüpften Käfer innerhalb von 2-3 Wochen. Bei ausreichend hohen Tagestemperaturen (16,5°C) bohren sich die geschlechtsreifen Jungkäfer aus der Rinde aus und es folgt der Schwarmflug. Dabei kann es auch zum Befall gesunder Fichten in der direkten Umgebung kommen.

In Bergregionen werden zumeist 1-2 Käfergenerationen pro Jahr gebildet. In warmen Jahren, insbesondere bei hohen Apriltemperaturen kann es zur Bildung einer 3. Generation kommen.

Das Vermehrungspotential des Käfers ist enorm: 1 Pärchen kann ca. 60 Nachkommen haben, davon 50% Weibchen. Diese haben eine Überlebenschance von ca. 70%. Damit kommt pro Generation eine Verzwanzigfachung der Käferzahlen zustande, bei 3 Generationen also 8000 Nachkommen in einem Jahr pro überwintertem Pärchen (THALENHORST, 1958; ALTENKIRCH et al., 2002).

In Sachsen-Anhalt sind in den letzten Jahren im Durchschnitt ca. 40.000 fm zwangsgenutztes Fichtenholz durch Buchdruckerbefall im Harz angefallen, wobei gerade in den letzten Jahren die Holzmenge infolge trocken-warmer Sommerwitterung drastisch angestiegen ist.

5.2 Untersuchungsgebiet

In Sachsen-Anhalt stockt auf großen Flächen Kiefer. Vor allem im östlichen und nördlichen Teil dominiert diese auf insgesamt 212.000 ha (ca. 45%) zusammen mit der Eiche, welche auf 45.000 ha stockt (9,6%). Im Süden sind vor allem Buche und Eiche zusammen mit Weich- und Hartlaubhölzern dominant.

Nur im Harz befinden sich große Flächen von ca. 55.000 ha, die mit Fichte bestockt sind (entspr. 11,5%)(Schmitz et al. 2004).

5.3 Datengrundlage und Methoden

5.3.1 Klimamodell WETTREG

Das statistische Klimamodell WETTREG (SPEKAT et al. 2007) wurde auf Basis der Modellrechnungen des ECHAM5/MPI-OM anhand regionaler Klimaprojektionen für ausgewählte Stationen des Deutschen Wetterdienstes erstellt. Dabei werden Wetterlagen der Vergangenheit und deren Übergangswahrscheinlichkeiten herangezogen. Dieses Modell ist also in begrenztem Maße in der Lage, auch Wetterextreme abzubilden.

Für die vorliegende Untersuchung wurde die Referenzperiode 1961-1990, sowie die Perioden 2011 - 2030 und 2031-2050 aus dem Szenario A1B, jeweils in einer trockenen und einer feuchten Variante (mit erhöhtem Niederschlag) ausgewählt.

Szenario A1B beschreibt eine künftige Welt mit sehr raschem wirtschaftlichem Wachstum, mit einer Weltbevölkerung, deren Zahl bis Mitte des 21. Jahrhunderts zunimmt und danach abnimmt. Die Einführung neuer und effizienterer Technologien erfolgt rasch. Fossile und nichtfossile Energiequellen werden in einem ausgeglichenen Maße gleichzeitig genutzt. Die CO₂- Emission der Weltbevölkerung nimmt bis 2050 noch leicht zu, danach kommt es zu einem leichten Rückgang der weltweiten Emissionen. Die Kohlendioxidkonzentration der Atmosphäre pegelt sich in diesem Modellansatz bei 700 ppm im Jahre 2100 ein, was dem Doppelten von 1990 entspräche (IPCC, 2007).

Für den Bereich des Harzes wurden sechs Harzklimastationen herangezogen (Bad Harzburg, Bad Sachsa, Braunlage-Hohegeiss, Braunlage, Brocken und Schierke), die im Modell WETTREG als Referenz für die Vergangenheit gedient haben und die in die Zukunft bis 2050 extrapoliert wurden. Auf diese Stationsdaten wurde das Modell PHENIPS (BAIER et al., 2007) zur Prognose der Buchdruckerphänologie (Kap. 5.3.2) angewandt. Anschließend wurden die errechneten Generationenzahlen des Buchdruckers mit den Stationshöhen korreliert, um Aussagen für die Höhenlagen zwischen den vorhandenen Stationen treffen zu können.

Für das Kiefernprachtkäfermodell (Kap. 5.3.3) wurden die Wetterstationen innerhalb von Sachsen-Anhalt (Bad Lauchstädt, Eisleben, Gardelegen, Halle, Magdeburg, Seehausen, Wittenberg) für eine Prognose herangezogen. Außerdem wurden einige außerhalb von Sachsen-Anhalt liegende Stationen (u.a. die Harzstationen, Helmstedt, Leipzig, Lüchow, Potsdam, Uelzen, Torgau) einbezogen, die sich aber relativ nahe an den derzeitigen Kieferngebieten Sachsen-Anhalts befinden.

5.3.2 Buchdruckermodell PHENIPS

Für die Prognose der Phänologie des Buchdruckers (*Ips typographus*) in Form von möglichen Käfergenerationen pro Jahr wurde das Modell PHENIPS von BAIER et al. (2007) verwendet.

Phenips ist in der Lage:

- die Schwärmzeit der überwinternden Käfer,

- den Zeitpunkt der Anlage der Brut,

- den Brutfortschritt,

- den Zeitpunkt des Überganges vom weißen Stadium (Larve) ins schwarze Stadium des unreifen Imago

- die Entwicklungszeit der Brut,

- die Anlage von Nebenbruten (2. Brut der überwinterten Eltern nach Reifungsfraß),

- die Schwärmzeit der fertigen Brut,

- damit die Anlage von Folgebruten (Brut der im aktuellen Jahr geschlüpften Käfer) und letztendlich die

- Anzahl möglicher Käfergenerationen pro Jahr zu prognostizieren.

Das Modell beruht auf der Berechnung von Tagegraden, also der Aufsummierung der Tagesmitteltemperaturen abzüglich einer unteren Schwellentemperatur (bei Ips typographus 8,3°C). Oberhalb dieser Temperatur findet ein Entwicklungsfortschritt statt, der umso größer ist, je höher die Temperatur ist. Steigt die Maximaltemperatur eines Tages über einen oberen Schwellwertes von 38,9°C findet an diesem Tag kein Entwicklungsfortschritt statt.

Wird an einem Tag die untere Schwellentemperatur nicht überschritten, findet an diesem Tag ebenfalls kein Entwicklungsfortschritt statt.

Der Schwarmflug der Überwinterer beginnt, wenn nach dem 1. April eines Jahres 160 Tagegrade erreicht sind und die Lufttemperatur über 16°C liegt.

An diesem Tag erfolgt im Modell auch das Einbohren, die Begattung der Weibchen und die Eiablage. Ab dem folgenden Tag werden die Tagegrade für die Brutentwicklung aufsummiert. Das weiße Stadium ist mit 334 Tagegraden abgeschlossen, für den Reifungsfraß werden zusätzlich 223 Tagegrade benötigt. Nach bisherigen Erkenntnissen von DOLEZAL und SEHNAL (2007) findet in der Regel bei einer Sonnenscheindauer von unter 14,5 Stunden pro Tag kein Schwarmflug der Buchdrucker mehr statt. Dies entspricht in Sachsen-Anhalt etwa dem 20. August. Die Unterschreitung dieser Schwelle bewirkt in den Käfern ein Einsetzen der Diapause, das bedeutet, dass sich die adulten Käfer unter die Erde zurückziehen oder unter der Borke verbleiben und inaktiv werden. Die Entwicklung der noch nicht ausgereiften Larven (weiße Stadien) setzt sich noch bis ca. Ende Oktober fort. Bis dahin besteht für diese Stadien die Möglichkeit, das braune Stadium (Jungkäfer) zu erreichen. Die Individuen, die dieses Stadium nicht erreichen, überleben mit hoher Wahrscheinlichkeit die Frostperioden im Winter nicht. Im Modell werden sie als nicht erfolgreiche Brut nicht weiter betrachtet.

Die Berechnung von Nebenbruten (2. Brut der überwinterten Eltern nach Reifungsfraß) wurde außer Acht gelassen, da dieses Phänomen nur unregelmäßig in der Natur auftritt. In Zukunft könnten jedoch diese Nebenbruten die Möglichkeiten des Fichtenanbaues weiter einschränken.

5.3.3 Modell Kiefernprachtkäfer

Das Modell für den Kiefernprachtkäfer beschreibt mit Hilfe von Temperatursummen den Zeitpunkt des Imagialschlupfes der Käfer und der anschließenden potentiellen Flugtage (APEL, 1986, 1991).

Für die Temperatursumme werden alle mittleren Tagestemperaturen, die oberhalb von 14°C liegen aufsummiert Der Imaginalschlupf erfolgt, wenn in einem Jahr 250 Tagegrade erreicht sind. Der Schwarmflug des Kiefernprachtkäfers findet nach dem Reifungsfraß der Imagines, der zwischen 12 und 14 Tage benötigt, statt.

Die fertigen Imagines beginnen mit dem Schwarmflug bei Tagesmaximaltemperaturen oberhalb von 25°C. Nach Ende August findet kein Schwarmflug mehr statt.

5.3.4 Verwendete Software

Berechnungen und Darstellungen wurden mit dem Softwarepaket R ver. 2.9.2 (R DEVE-LOPMENT CORE TEAM, 2009) erstellt.

5.4 Ergebnisse

5.4.1 Buchdrucker

Die Berechnungen zeigen, dass sich die Aktivitätsmuster des Buchdruckers auf den Fichtenflächen in Sachsen-Anhalt im Vergleich mit der Vergangenheit deutlich ändern werden.

Der Schwärmflug der überwinternden Käfer wird zukünftig durch die steigenden Winterund Frühjahrstemperaturen früher einsetzen (Abbildung 62). Auf dem Brocken beispielsweise verlagert sich der (errechnete) mittlere Schwärmtermin von Anfang Juli auf Anfang Juni. Die Wärmesummen, die insgesamt an einem Ort herrschen und die die Entwicklung der Käferlarven zum Imago ermöglichen, steigen im Zeitraum 2011-2030 nur gering, im Zeitraum 2031-2050 dagegen erheblich an (Abbildung 63). Auf dem Brocken ist im Zeitraum 2031-2050 nahezu immer eine Generation möglich. Für Bad Harzburg (270 m ü. NN.) sind in der Referenzperiode nur sehr selten 3 Generationen möglich, in Zukunft wird dies die Regel sein. In Braunlage und Schierke (600 m ü. NN.) werden im Zeitraum 2031-2050 meist 2 Generationen möglich sein.



Abbildung 62:errechneter Schwärmbeginn der überwinterten Borkenkäfer in Abhängigkeit von der Stationshöhe. Dargestellt ist jeweils das Datum des Flugbeginns in einem Jahr als Punkt

Demnach können auf allen Flächen im Durchschnitt mehr Käfergenerationen pro Jahr auftreten, bzw. können sich in den Gipfelregionen des Harzes überhaupt Bruten bis zum Abschluss der Vegetationsperiode entwickeln und damit stabile Populationen etablieren. Auf vielen Flächen wird es in Zukunft wesentlich schwerer sein, die Fichte zu halten, da hier im Mittel mehr als 2,5 Generationen des Buchdruckers pro Jahr auftreten. Damit können sich bereits vorhandene Käferlöcher entsprechend schnell ausdehnen, bzw. neue Löcher können deutlich häufiger entstehen. Daraus entsteht ein Zwang zu konsequent sauberer Waldwirtschaft, der Aufwand für Waldschutz wird damit steigen.



Abbildung 63: Wärmesummen, die an den einzelnen Stationen erreicht werden können. Dargestellt ist jeweils die in einem Jahr erreichte Wärmesumme als Punkt

Das biotische Risiko für den Fichtenanbau hängt im Wesentlichen von der Generationenzahl des Buchdruckers ab, die dieser auf einer Fläche hervorzubringen vermag:

Sehr geringes Risiko besteht auf Flächen, auf denen im Durchschnitt unter 0,75 Generationen gebildet werden. Hier sind keine stabilen Populationen des Buchdruckers möglich, da die meisten Bruten das braune Stadium nicht erreichen. Dies ist in der Vergangenheit lediglich auf Flächen über 1100 m ü. NN der Fall gewesen. Bis 2050 wird sich dieser Bereich um 100 m nach oben verschieben.

Geringes Risiko: Flächen, auf denen zwischen 0,75 und 1 Generation pro Jahr möglich sind. Hier kann sich nach Anflug über wenige Jahre eine Population etablieren, die jedoch immer wieder zusammenbricht. Dieser Bereich lag in der Vergangenheit im Modell bei 950 – 1100 m ü. NN, zukünftig wird er sich bis 2050 auf 1100 m ü. NN verschieben.

Mäßiges Risiko: besteht bei Generationenanzahlen zwischen 1 und 1,5 hier ist in der Regel eine stabile Population des Buchdruckers möglich. In jedem Jahr wird eine lebensfähige Brut erzeugt, maximal alle 2 Jahre ist es dem Buchdrucker sogar möglich, eine weitere (lebensfähige) Brut zu haben. Heute liegt dieser Bereich bei 700-950 m ü. NN. In Zukunft wird er sich zwischen 880 m und 1100 m ü. NN. befinden. **Erhebliches Risiko**: bei Generationenanzahlen zwischen 1,5 und 2 Generationen pro Jahr werden in den meisten Jahren mehr als eine überlebensfähige Generation gebildet. Hier ist sehr intensive Überwachung und Bekämpfung nötig. Der Bereich befindet sich heute bei 450-700 m ü. NN. Bis 2050 wird er sich hin zu 650-880 m ü. NN. bewegen.

Deutliches Risiko: ist der Borkenkäfer in der Lage, auf einer Fläche 2 bis 2,5 Generationen zu bilden, ist eine intensive Überwachung und Bekämpfung unersetzlich. Insbesondere in großen Fichtengebieten können sich in schneller Folge Käferlöcher im Bestand bilden und ausweiten. In Zukunft wird dieser Bereich bei 450-650 m ü. NN. liegen, heute dagegen bei 200-450 m ü. NN.

Großes Risiko: Bestände in denen der Buchdrucker regelmäßig über 2 Generationen pro Jahr bildet, in mindestens jedem 2. Jahr noch eine dritte weisen ein hohes biotisches Risiko auf. Zusätzlich zu diesen regulären Generationen können bekanntlich noch Nebenbruten gebildet werden, indem die überwinterten Altkäfer einen Reifungsfraß durchführen und eine weitere Brut anlegen, die auch zum Abschluss kommt. Hier bewahrt nur konsequente Überwachung und Bekämpfung eine Ausbreitung der Schäden am stehenden Holz. Diese Bereiche liegen in der Regel unter 200 m ü. NN. Zukünftig wird sich dieser Bereich bis auf 450 m ü. NN verschieben.



Abbildung 64: Mittlere Generationenzahl des Buchdruckers im Harz im Zeitraum 1961-1990, es ist das trockene Szenario abgebildet.

Abbildung 64, Abbildung 65 und Abbildung 66 stellen die mittleren Generationenzahlen des Buchdruckers für das Gebiet des Harzes dar. Es wurden die Ergebnisse der Berechnungen für das trockene Szenario für die Referenzperiode 1961-1990 und die beiden zukünftigen Perioden 2011-2030 und 2031-2050 dargestellt. Auf die Abbildung der Berechnung des feuchten Szenarios wurde verzichtet, da sich die Abbildungen nicht wesentlich vom trockenen Szenario unterscheiden. Eine Zusammenfassung über die Betroffenheit der mit Fichte bestockten Flächen findet sich in Tabelle 61. Bemerkenswert ist, dass sich die Periode 2011-2030 nur sehr geringfügig von der Referenzperiode unterscheidet. Die Flächen, mit sehr geringem bis mäßigem Risiko nehmen teilweise drastisch bis in den Zeitraum 2031-50 ab, gleichzeitig nehmen die Flächenanteile mit erheblichen Risiken deutlich zu.

Flächen mit höchstens mäßigem Risiko betragen in der Referenzperiode 20% der Gesamtfläche, in der Periode 2031-2050 sinkt dieser Anteil auf unter 4%. Entsprechend steigen die Anteile der Flächen mit höheren Risiken. Flächen mit mindestens deutlichem Risiko steigen in dieser Zeit von ca. 25% auf 70%.

Die Flächen mit den jeweils geringsten Risiken konzentrieren sich jeweils um die höchsten Erhebungen des Harzes herum.



Mittlere Generationenanzahl des Buchdruckers

Abbildung 65: Mittlere Generationenzahl des Buchdruckers im Harz im Zeitraum 2011-2030, es ist das trockene Szenario abgebildet.


Mittlere Generationenanzahl des Buchdruckers

Abbildung 66: Mittlere Generationenzahl des Buchdruckers im Harz im Zeitraum 2031-2050, trockenes Szenario.

Tabelle 61:Anzahl von Buchdruckergenerationen pro Jahr, welche auf den Fichtenflächen in Sach-
sen-Anhalt in den einzelnen Szenarien nach dem Modell PHENIPS vollendet werden
können, Flächenangabe in ha

Zeitraum	Szenario	< 0,75 Gene-	0,75-1	1-1,5	1,5 -1,75	1,75 – 2	2 – 2,5	> 2,5
		rationen pro	Gen. pro	Gen.	Gen.	Gen.	Gen.	Gen.
		Jahr	Jahr	pro Jahr	pro Jahr	pro Jahr	pro Jahr	pro Jahr
1961-1990	Trocken	32	432	10046	16140	15612	10897	2383
2011-2030		15	376	9380	14426	17194	11758	2395
2031-2050		0	42	1710	5796	8394	28821	10779
1961-1990	Feucht	12	407	10735	18233	15351	8578	2230
2011-2030		0	176	6405	9247	16780	19483	3451
2031-2050		0	60	2093	6150	8875	28048	10317

5.4.2 Kiefernprachtkäfer

Schäden durch den Kiefernprachtkäfer im Bestand können nur dann auftreten, wenn dieser Käfer die Möglichkeit hat, zu schwärmen. Durch seinen variablen Generationszyklus ist er jedoch in der Lage, in Gebieten seine Population aufrecht zu erhalten, in denen ihm jährlich nur sehr wenige, in einigen Jahren gar keine passenden Schwärmtage zur Verfügung stehen.

Abbildung 67 zeigt, dass der Prachtkäfer jährlich eine sehr unterschiedliche Anzahl Schwärmtage zur Verfügung hat. In Gebieten, in denen er auch schon Massenvermehrungen durchlief, kamen in der Vergangenheit Jahre vor, in denen kein Flugtag auftrat.

Massenvermehrungen treten vor allem in überdurchschnittlich warmen, trockenen Jahren auf, in denen eben auch viele Flugtage vorkommen.

Die Modellrechnungen zeigen, dass die Anzahl der Schwärmtage deutlich zunehmen werden (Abbildung 67). Verglichen mit der Referenzperiode ist in der Periode 2011-2030 nur im trockenen Szenario ein deutlicher Anstieg zu sehen. Im feuchten Szenario ist nur eine leichte Erhöhung der Anzahl der Flugtage feststellbar. Drastische Veränderungen treten erst in der Folgeperiode auf. Es gibt 2031-2050 keine Jahre mehr, in dem kein Käferflug stattfinden kann.

Im Mittel gibt es im Zeitraum 2031-2050 an fast allen Stationen in beiden Szenarien 15 oder mehr Flugtage pro Jahr. Damit entspricht ein normales Jahr in der Zukunft einem heutigen sehr warmen Jahr mit hohem Prachtkäferbefall.

In den Extremjahren der Zukunft stehen dem Prachtkäfer so viele Flugtage zur Verfügung, wie dies in der Vergangenheit nie der Fall war. Die Folgen dieser Entwicklung sind bisher nicht abschätzbar.

Abbildung 68 und Abbildung 69 zeigen, dass vor allem der Osten und Süden Sachsen-Anhalts durchgängig mehr Schwärmtage aufweist als andere Gebiete. Hier herrschen die kontinentalsten Bedingungen. In diesen Gegenden werden aller Voraussicht nach zukünftig die höchsten Schäden auftreten. Allerdings sehen sich auch die restlichen Gebiete einer Anzahl von Schwärmtagen gegenüber, wie dies nur vereinzelt in der Vergangenheit auftrat.

Da sich im gesamten nördlichen und östlichen Teil Sachsen-Anhalts gleichzeitig die Wasserbilanz drastisch verschlechtern wird (Kapitel 2.2) ist mit einem erheblichen Anteil vorgeschädigter Kiefern zu rechnen, deren Abwehrmechanismen der Prachtkäfer leichter überwinden kann.





Abbildung 67: Anzahl möglicher Schwärmtage des blauen Kiefernprachtkäfers an ausgewählten Stationen, feuchtes Szenario oben, trockenes Szenario unten





Abbildung 68: Kartendarstellung der mittleren Anzahl Flugtage (Tage > 25°C nach Reifungsfraß) des blauen Kiefernprachtkäfers in Sachsen-Anhalt, Referenzzeitraum 1961-1990 (oben) und Zeitraum 2011-2030 (unten), feuchtes Szenario



Abbildung 69: Kartendarstellung der mittleren Anzahl Flugtage (Tage > 25°C nach Reifungsfraß) des blauen Kiefernprachtkäfers in Sachsen-Anhalt, Zeitraum 2031-2050 feuchtes Szenario

6 Zusammenfassung

Zentrale Aufgabe des Projektes "Risiken und Anpassungsstratgien für Wälder als Folge der prognostizierten Klimaveränderung in Sachsen-Anhalt" war zu untersuchen, inwieweit sich die erwartete klimatischen Verschiebung zu warm-trockener Witterung auf die Struktur, Funktionalität und Leistungsfähigkeit der Wälder auswirkt. Im Vordergrund der Untersuchung stand die Bestimmung der Wasserfügbarkeit verschiedener Waldstandorte unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen sowie die Abschätzung des Trockenstressrisikos mit Hilfe eines Wasserhaushaltsmodells. Weiterhin wurde untersucht, ob die Klimaerwärmung auch zu einem erhöhten Risiko durch die Zunahme von Insektenkalamitäten führt. Eine flächendeckende Risikoanalyse ist nur bedingt möglich. Für die Level II-Flächen Klötze und Nedlitz, das Großlysimeter Colbitz sowie weitere Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Sachsen-Anhalt trifft dies jedoch nicht zu, da für diese Standorte sehr detaillierte Standortsinformationen vorliegen. Die Intensivmonitoringflächen bilden das Waldgefüge und die Standorteigenschaften in Sachsen-Anhalt gut ab. Aussagen, die für diese Flächen getroffen werden können, erlauben damit auch eine gewisse Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die gesamte bewaldete Landesfläche.

Zusammenfassung TP I:

Bereits unter den Klimabedingungen der Referenzperiode 1961 bis 1990 wird fast flächendeckend ein Wasserdefizit von rund 100 mm ausgewiesen. Nur die mittleren und hohen Lagen des Harzes sind durch einen Wasserüberschuss gekennzeichnet. Für die Dekade 2041 bis 2050 wird auf Grundlage des A1B-Szenarios (trockene Variante) für die gesamte Landesfläche mit Ausnahme des Brockengebietes ein hohes Wasserbilanzdefizit berechnet. Im gesamten Tiefland liegt das Defizit bei 300 mm oder sogar etwas darüber. Entsprechend hohe Defizitraten können auch nicht mehr durch die Wasserspeicherkapazitäten der Böden ausgeglichen werden.

Auf Grundlage der vorgestellten Risikoklassifizierung werden bis zum Jahr 2050 die unkritischen Fichtenanbaugebiete auf die höheren Lagen des Harzes zurückgedrängt. Der gesamte Tieflandbereich ist mit einem erhöhten bzw. hohen Anbaurisiko behaftet. Aber auch unter den klimatischen Bedingungen der Referenzperiode ist bereits über die Hälfte der Landesfläche für die Fichte ungeeignet. Dies betrifft den Norden und Osten des Landes Sachsen-Anhalt. Das Harzvorland und die südlichen Landesteile erhalten überwiegend ein mittleres Anbaurisiko.

Daraus ergibt sich, dass das Anbaurisiko für die Fichte in Zukunft zwar deutlich zunehmen wird, aber unter Berücksichtung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers auch im Tiefland auf gut wasserversorgten Standorten möglich sein wird. Dies betrifft vornehmlich das Harzvorland und die westlichen Landesteile sowie einige größere Flusstäler.

In Sachsen-Anhalt stellt die Trockenheit ein wesentliches Risiko für die Waldbestände dar. Hohe Wasserbilanzdefizite während der Vegetationsperiode können nur bedingt durch das pflanzenverfügbare Bodenwasser ausgeglichen werden. Der Vergleich der Wasserbilanzen für die Vegetationsperioden 1961 bis 1990 und 2041 bis 2050 zeigt, dass in Zukunft mit einer deutlich verschärften Belastung der Bestände durch Wassermangelsituationen zu rechnen ist. Auf der Grundlage bisheriger Anbauerfahrungen kann bisher nur für die Fichte eine erste Annäherung bezüglich der Risikoabschätzung getroffen werden.

Zusammenfassung TP II:

Die in Klötze und Nedlitz erkannte temporale Drift der Autokorrelation(1)-Sensitivität-Relation wurde im Rahmen der BMELV-Trockenheitsstudie für alle weiteren Level II-Flächen des Bundesgebietes in mehr oder weniger starker Ausprägung festgestellt. Irreguläre Schwankungen der Autokorrelation bei gleichzeitig geringer Sensitivität stellen bis in die 70iger Jahre hinein das normale Verhaltensmuster dar. Ein Übergangsstadium ist in den 80iger Jahren zu erkennen, wenn die Sensitivität bei niedrigem Level der Autokorrelation ansteigt. Seit 1990 nimmt die Sensitivität unter Verlust der Autokorrelation dramatisch zu, was gleichbedeutend ist mit einem Verlust der Pufferfähigkeit und somit erhöhter Disposition gegen Schadeinflüsse.

Die langjährige Deposition eutrophierender Stoffe, die das Wachstum verstärken, dabei aber den Wasserbedarf steigen lassen, sowie die Klimaänderung mit erhöhten Temperaturen bei gleichzeitig sinkenden Niederschlägen wirken als Stresskomplexe auf die Wälder ein. Die Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulationen (Kap. 4.11) zeigen für Nedlitz und Klötze, dass die Wasserverfügbarkeit z. T. bereits erheblich reduziert ist, so dass bei beiden Standorten mit Wasserstress für die Bäume gerechnet werden muss.

Betrachtet man aber das Weiserjahr 2003, so fallen die Wachstumseinbußen der Kiefer im Vergleich zu anderen Baumarten eher gering aus und wirken auch im darauf folgenden Jahr kaum noch nach.

Das Ergebnis bestätigt, dass die Kiefer eine an Wärme- und Trockenperioden gut angepasste Baumart ist. Die Bedeutung der gefundenen Drift des Verhältnisses der Autokorrelation und Sensitivität wird im beobachteten Zeitraum noch nicht konkret ersichtlich.

Zusammenfassung TP III::

Die Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulationen zeigten zunächst für die drei Intensivmessflächen Klötze, Nedlitz und Colbitz (Großlysimeter), die sowohl mit statischer als auch mit dynamischer Bestandesentwicklung gerechnet wurden, dass vor allem bei jungen Beständen, die noch in der Wachstumsphase sind, deutliche Unterschiede bei den Wasserhaushaltskomponenten zwischen den beiden Entwicklungstypen bestehen. Bei ausgewachsenen Beständen dagegen bestehen diese nicht. Die Unterschiede in den Wasserhaushaltskomponenten führen natürlich auch zu entsprechenden Unterschieden bei der Wasserverfügbarkeit. In Abhängigkeit von Bestand, Bodenparametrisierung und Klima ist die Wasserverfügbarkeit an diesen Standorten derzeit z. T. bereits erheblich reduziert, so dass bei allen drei Standorten mit einem beträchtlichen Wasserstress für die Bäume gerechnet werden muss. In der Simulation wird das an der häufigen und teilweise lang andauernden Unterschreitung sowohl der 60% nFK- als auch 40% nFK-Grenze sichtbar. Potenziell wird sich die Situation im Projektionszeitraum weiter verschärfen.

Bei den Bodendauerbeobachtungsflächen ergaben die Simulationen mit Ausnahme des Standortes Brocken für alle Standorte zukünftige Unterschreitungen der beiden Grenzwerte.

Der Standort Hasselfelde weist durch entsprechend hohe Niederschläge die beste Wasserverfügbarkeit im Beobachtungszustand auf. Hier werden nur in wenigen Jahren (14 bzw. 6) und einer geringen Anzahl von Tagen (51 bzw. 38) die Grenzwerte unterschritten. Auch ist in Hasselfelde in der nahen Zukunft mit einer nur moderaten Verschlechterung der Wasserverfügbarkeit hinsichtlich der Häufigkeit und mittleren Gesamtlänge der Unterschreitungen der Grenzwerte zu rechnen. Dagegen ist am Standort Friedrichrode, bedingt durch geringe Niederschläge, die Wasserverfügbarkeit am stärksten eingeschränkt. Im Beobachtungszeitraum werden beide Grenzwerte in allen Jahren im Mittel an 206 bzw. 149 Tagen unterschritten. Allerdings verschärft sich die Situation in der nahen Zukunft, bis auf das Szenario A1B trocken, nur unwesentlich.

An den restlichen Standorten bewegt sich die Einschränkung der Wasserverfügbarkeit zwischen den Ergebnissen von Hasselfelde und Friedrichrode: An den Tieflandstandorten ist die Wasserverfügbarkeit hierbei jeweils etwas stärker eingeschränkt als an den Mittelgebirgsstandorten. Während an den Tieflandstandorten in der nahen Zukunft überwiegend mit einer Verschlechterung der Wasserverfügbarkeit zu rechnen ist, wird an den Mittelgebirgsstandorten der Wasserstress kaum oder nur moderat zunehmen.

Zusammenfassung TP IV:

Durch die steigenden Temperaturen bei gleichzeitig geringeren Niederschlägen in der Vegetationsperiode werden die beiden untersuchten Schädlinge (Buchdrucker und Kiefernprachtkäfer) stark gefördert werden.

Dem Buchdrucker (Ips typographus) wird es möglich sein, in allen Regionen des Harzes stabile Populationen aufzubauen, in allen Regionen wird es ihm bis 2050 möglich sein, durchschnittlich eine Generation Käfer pro Jahr mehr zu erreichen als er dies in der Vergangenheit vermochte. Daher steigt das Risiko für Massenvermehrungen in den betroffenen Fichtenbeständen drastisch. Diese müssen in Zukunft noch engmaschiger überwacht werden, um die Schäden an den Beständen in Grenzen zu halten. Insbesondere Extremereignisse wie Sturm oder Schneebruch müssen schnellstmöglich aufgearbeitet werden, um Massenvermehrungen zu verhindern.

Der Kiefernprachtkäfer (Phaenops cyanea) hat in der Vergangenheit in besonders warmen und trockenen Sommern Massenvermehrungen durchlaufen und teils erhebliche Schäden verursacht. Nach den derzeitigen Prognosen werden diese in der Vergangenheit eher seltenen Ereignisse zukünftig die Regel darstellen. Insbesondere der sehr kontinental geprägte Osten und Süden Sachsen-Anhalts steht in Bezug auf den Prachtkäfer vor großen Herausforderungen. Die prognostizierten zukünftigen Wasserdefizite in den Kiefernwäldern schwächen diese und ermöglichen dem Prachtkäfer die erfolgreiche Besiedelung des Holzes. Auch hier wird eine intensive Überwachung nötig sein, um die Schäden zu minimieren.

Diese Arbeit kann lediglich eine Tendenz umreißen, in welche Richtung sich Walschutzrisiken entwickeln werden. Mit genaueren Kenntnissen und Modellen werden sich in Zukunft bessere und genauere Vorhersagen machen lassen. Dies bedarf jedoch weiterer Forschung

Die hier vorgestellte Arbeit basiert auf Klimasimulationen, die den derzeitigen Stand des Wissens über klimatische Zusammenhänge wiedergeben. Da auf diesem Gebiet derzeit ständig neue Erkenntnisse über neue Zusammenhänge gewonnen werden, stehen in Zukunft genauere Modelle zur Verfügung. Andererseits könnten durchaus höhere Temperaturen bis 2050 erreicht werden, als durch die Modelle voraus gesagt werden, da die Modelle an sich schon eine gewisse Unschärfe aufweisen (IPCC, 2007) und die in den Klimamodellen angenommene Kohlendioxidemission der Menschheit bereits jetzt der Realität des weltweiten CO2-Ausstoßes überholt sind (Interview mit Prof. Schellnhuber, Leiter des Potsdam-Institutes für Klimafolgenforschung (PIK) Süddeutsche Zeitung vom 13.12.2008; Schellnhuber, 2008)

7 Anpassungsstrategien

Auf der Grundlage der vorliegenden Erkenntnisse und mit Blick auf die Anpassungspotentiale der Forstbetriebe lassen sich einige vorläufige Empfehlungen geben. Ziel ist, die bestehenden Waldbestände in Sachsen-Anhalt zu erhalten und zu stabilisieren. Unter Berücksichtigung der zu erwartenden Klimaveränderung ist zu empfehlen, die Waldbehandlung auf eine Vermeidung bzw. Abmilderung von Trockenstresssituationen auszurichten. 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.

Infolge der klimatischen und morphologischen Voraussetzungen verdunstet auf den Waldflächen ein Großteil des gefallenen Niederschlages. Ein je nach Baumart und Bestandesdichte nicht unerhebliche Anteil 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.

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). 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 vorliegenden Klimaprojektionen werden in Zukunft die Häufigkeit und Intensität von Trockenperioden vieler Standorte in Sachsen-Anhalt weiter zu nehmen. Das größte Risiko besteht dabei für Pflanzen mit geringer Wurzeltiefe wie z.B. für die Baumverjüngung.

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 (EL-LENBERG, 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 Standortswasserhaushalt 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 Vitalitätseinbußen führen können.

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 petrea, Qu. robur* als auch *Qu. pubescens*), die Kiefer dagegen gehört zu den gegenüber Temperaturerhöhungen empfindlichen Baumarten (KÖLLING 2007).

SUTMÖLER 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. 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 die Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer absolut ungeeignet und damit nicht überlebensfähig wären. 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 milderen Wintern kann für die Laubbaumarten zu verfrühtem Laubaustrieb bei gleich bleibendem Spätfrostrisiko führen (MENZEL, 1998; SUTMÖLLER et al., 2008). In jedem Fall kann nicht nur die Baumart, sondern innerhalb der Baumarten auch in starken Maß die Herkunft ausschlaggebend für die Anpassungsfähigkeit und Stresstoleranz der Individuen sein (CZAIKOWSKI, 2006; BOLTE et al., 2007; JANßEN et al., 2008).

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. 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; BEIERKUHNLEIN u. FOKEN, 2008).

Exakte Richtlinien können aus den Ergebnissen aus der Studie nicht gegeben werden, hierzu müssen noch räumlich differenzierte Untersuchungen folgen. Es können jedoch zusammenfassend folgende waldbaulichen Anpassungsempfehlungen (SPELLMANN et al. 2007) gegeben werden:

- Erhöhung bzw. Beibehaltung des Laubbaumanteils in Abhängigkeit von den Standortbedingungen zur Senkung der Interzeption (und Transpiration)
- Außerhalb der montanen Stufe weisen die mäßig frischen bis mäßig sommertrockenen, die staunassen und wechseltrockenen Standorte das höchste Trockenstressrisiko auf. Hier sollte auf führende Fichte und Buche verzichtet werden.
 Fichten- bzw. Buchennaturverjüngungen sind auf diesen Standorten ggf. zurückzudrängen oder je nach Standorteigenschaften mit Douglasie, Eiche, Küstentanne oder Edellaubbäumen zu überpflanzen bzw. gruppen- bis horstweise zu ergänzen.
- Die Zuwächse werden von der planaren bis zur submontanen Stufe eher sinken, in der montanen bis hochmontanen Stufe i.d.R. steigen. Gegensteuern kann man durch den Anbau angepasster, leistungsfähiger Baumarten und Herkünfte.
- 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

Aus Sicht des Waldschutzes sollten die folgenden Schutzstrategien umgesetzt werden, um sich für zukünftige Risiken bestmöglich aufzustellen:

- Ausreichend Fachkundiges Personal (Revierleiter, geschulte Waldarbeiter) muss zur Verfügung stehen.
- Weitergehender Aufbau von Mischwäldern, Beimischung von Buche und Tanne zur Fichte; Eiche, Douglasie, (Robinie) zur Kiefer
- Saubere Waldwirtschaft, um den Schadinsekten schon im Vorfeld maximale Mengen an Brutraum zu entziehen
- Personaldichte zur Überwachung muss dem jeweiligen Risiko angepasst werden, Lage und dichteabhängige Betreuung in den Forstbetrieben
- regelmäßige Überwachung muss erfolgen, entweder okular (auch mit Luftbild) oder mit Lockstofffallen (für den Prachtkäfer sind derzeit keine Pheromonfallen erhältlich, dies könnte sich jedoch mittelfristig ändern).
- Fachgerechtes Aufstellen und Betreuen von Fangeinrichtungen für Buchdrucker.
- Etablierung, Verbesserung und Umsetzung integrierter Walschutzkonzepte

- Erhaltung der Option, nach dem Ausschöpfen waldbaulicher und biologischer / biotechnologischer Möglichkeiten, chemische Pflanzenschutzmittel im Forstbereich einzusetzen.
- Erstellen und Verfeinern von Vorhersagemodellen, die kurzfristig Flugaktivitäten flächenbezogen prognostizieren, um die Überwachung zu optimieren. Hier ist noch weitere Forschung nötig.

Abschließend soll nochmals betont werden, dass die Ergebnisse anhand von Intensivmonitoringflächen abgeleitet wurden und die Übertragbarkeit auf die gesamten Waldflächen in Sachsen-Anhalt mit Unsicherheiten behaftet ist. Weiterführende, flächenbezogene Untersuchungen wären wünschenswert, um flächenscharfe und standortgerechte Anpassungsstrategien zu entwickeln.

8 Literatur

- Ababou, R., B. Sagar und G. Wittmeyer (1992): Testing procedures for spatially distributed flow models; Advances in Water Resources 15, 181-198.
- AG Boden (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung; 4., verbesserte und erweiterte Auflage, Hannover.
- Altenkirch, W., Majunke, C. & Ohnesorge, B. (2002): Waldschutz auf ökologischer Grundlage, Ulmer Verlag
- Anders, S., Beck, W., Bolte A., Hofmann, G., Jenssen, M., Krakau, U., Müller, J. (2002): Ökologie und Vegetation der Wälder Nordostdeutschlands., Verlag Dr. Kessel, Oberwinter 283 S
- Apel, K.-H. (1986): Biologie, Ökologie und Massenwechseln von Phaenops cyanea, Dissertation am Institut für Forstwirtschaft, Eberswalde
- Apel, K.-H. (1991): Die Kiefernprachtkäfer, Forschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Eberswalde, Bereich Waldbau/Forstschutz, Abt. Forstschutz, Merkblatt Nr. 50
- Baier, P., Pennerstorfer, J. & Schopf, A. (2007): PHENIPS—A comprehensive phenology model of Ips typographus (L.) (Col., Scolytinae) as a tool for hazard rating of bark beetle infestation, Forest Ecology and Management, Vol. 249 (3), S. 171-186
- Baumgartner, A., Liebscher, H. J. (1990): Allgemeine Hydrologie Quantitative Hydrologie; Gebrüder Borntraeger, Berlin und Stuttgart.
- Beierkuhnlein, C.; Foken, Th. (2008): Klimawandel in Bayern. Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten. Bayreuther Forum Ökologie, Vol. 113
- Beck, W. (2007): Analyse des Wachstumsverhaltens von Kiefern-Beständen auf unterschiedlichen zeitlichen Skalenebenen. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Bd. 32, 341 – 356.
- Beck, W.; Müller, J. (2007): Impact of heat and drought on tree and stand vitality dendroecological methods and first results from level 2-plots in southern Germany. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt 142, 120-127.
- Bernhofer, Ch.; Goldberg, V.; Franke, J.; Surke, M.; Adam, J. (2008): Regionale Klimadiagnose für Sachsen-Anhalt. BERICHTE des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, SONDERHEFT 5/2008, 66 S.
- Beven, K. (1993): Prophecy, reality and uncertainity in distributed hydrological modelling; Advances in Water Resources 16, 41-51.
- Biemelt, D. (2001): Bestimmung der Grundwasserneubildung auf Offenlandbereichen der Lausitzer Bergbaufolgelandschaft; Aktuelle Reihe (1/2001) (ISSN 1434-6834); Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Fakultät für Umweltschutz und Verfahrenstechnik, 126 S.

- Blombäck, K., M. Stähli und H. Eckersten (1995): Simulation of water and nitrogen flows and plant growth for a winter wheat stand in central Germany; Ecological modelling 81, 157-167.
- 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
- Botterweg, P. (1995): The user's influence on model calibration results: An example of the model SOIL, independently calibrated by two users; Ecological modelling, 81, 72-82.
- Bouten, W. (1992): Monitoring and modelling forest hydrological processes in support of acidification research; PhD-thesis, Universität Amsterdam, 211 S.
- Bouten, W. (1995): Soil water dynamics of the Solling spruce stand, calculated with the forhyd simulation package; Ecological Modelling, 83, 67-75.
- Brahmer, G. (1990): Wasser- und Stoffbilanzen bewaldeter Einzugsgebiete im Schwarzwald unter besonderer Berücksichtigung naturräumlicher Ausstattungen und atmogener Einträge; Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, Bd. 25.
- Bressem, U. (2008): Komplexe Erkrankungen der Buche. In: Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt 3, 87-107.
- Brooks, R. H. und A. T. Corey (1964): Hydraulic properties of porous media; Hydrology Paper No. 3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 27 S.
- Brutsaert, W. (1982): Evaporation into the atmosphere: theory, history, and applications. D.Reidel, Hingham MA, 299 p.
- Burger, H., (1929-1953). Holz, Blattmenge und Zuwachs: I. Die Weymouthsföhre, II. Die Douglasie, III. Die Föhren und Fichten verschiedener Herkunft, IV. 80j. Buchenbestand, V. Föhren und Fichten verschiedener Herkunft, VI. Ein Plenterwald mittlerer Standortsgüte, VII. Die Lärche, VIII. Die Eiche, IX. Die Föhre, X. Die Buche, XI. Die Tanne, XII. Fichten im Plenterwald, XIII. Fichten im gleichaltrigen Hochwald. Mitt. Schweiz Anst.f.d.forstl.Vers.-Wesen: I.1929, 15, 243-292, II. 1936, 19,21-72, III. 1937, 20, 101.104, IV. 1939, 21, 307-348, V. 1942, 22, 10-62, VI. 1942, 22, 377-445, VII. 1945, 24, 7-102, VIII. 1947, 25, 211-279, IX. 1948, 25, 435-493, X. 1949,26, 419-468, XI. 1951, 27,247-286, XII. 1952, 28, 109.156, XIII. 1953, 29, 38-130.
- Cienciala, E., H. Eckersten, A. Lindroth und J. E. Hällgren (1994): Simulated and measured water uptake by Picea abies under non-limiting soil water conditions; Agricultural and Forest Meteorology 71, 147-164.
- Cowan, I.R. 1965. Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. J Appl Ecol 2:221-239
- Custers, C. (2003): Climate Change and Trophis Synchronisation A case study of the Oak Processionary Caterpillar, Dissertation, Wageningen University

- 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
- Deutschmann, G.; Beese, F.; Meißner, R. (Hrsg.) (2001): Veränderung des Wasser- und Stoffhaushalts von Kiefernbeständen aufgrund forstlicher Eingriffe. Endbericht zum UFZ-Forschungsprojekt
- Dickinson, R.E. (1984): Modelling evapotranspiration for three-dimensional global climate models.- In: Hansen, J.E. & Takahashi, T. (eds.): Climate Processes and Climate Sensitivity. AGU Geophysical Monograph 29, 58 72.
- Dobbertin, M. (2005): Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. European Journal of Forest Research 124, 319 333.
- Dolezal, P. & Sehnal, F. (2007): Effects of photoperiod and temperature on the development and diapause of the bark beetle Ips typographus, Journal of applied entomology, Vol. 131 (3), S. 165-173
- Drobyshev, I., Linderson, H., Sonesson, K. (2007): Relationship between Crown Condition and Tree Diameter Growth in Southern Swedish Oaks. In: Environmental Modeling and Assessment 128, 61 – 73.
- Duda, H.A.A. (2006): Vergleich forstlicher Managementstrategien. Umsetzung verschiedener Waldbaukonzepte in einem Waldwachstumssimulator, Dissertation. Universität Göttingen, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, ISBN: 3-8334-6618-9, Norderstedt, Germany, Books on Demand, 2006, 182 S.
- Duelli, P., Zahradnik, P., Knizek, M. & Kalinova, B. (1997): Migration in spruce bark beetles (Ips typographus L.) and the efficiency of pheromone traps, Journal of Applied Entomology, Vol. 121, S. 297-303;
- Durner, W. (1991): Vorhersage der hydraulischen Leitfähigkeit strukturierter Böden; Bayreuther Bodenkundliche Berichte Bd. 20, 180 S.
- Eckersten, H., Gärdenäs, A., Jansson, P. E. (1995): Modelling seasonal nitrogen, car-bon, water and heat dynamics of the Solling spruce stand; Ecological modelling 85, 119 129.
- EG (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 327/1
- Farahani, H.J. und Bausch, W.C. (1995): Performance of evapotransporation models for maize Bare soil to closed canopy. Trans. ASEA, 38, 1049-1059.
- Feddes, R. A., P. Kabat, P.J.T. van Bakel, J.J.B. Bronswijk und J. Halbertsma (1988): Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone state of the art; Journal of Hydrology 100, 69-111.
- Feddes, R.A., Bresler, E. und Neuman, S.P. (1974): Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems. Water Resour Res 10:1199-1206.

- Federer, C. A. (1995): BROOK90: A simulation model for evaporation, soil water and streamflow, Version 3.1. Computer freeware and documentation; USDA Forest Service, PO Box 640, Durham, New Hampshire, USA.
- Federer, C. A. und D. Lash (1978): BROOK: A hydrologic simulation model for eastern forests; University of New Hampshire, Water Resources Research Center, Research Report 19, 94 S. Durham, New Hampshire, U.S.A. (überarbeitet 1983).
- Federer, C.A., C. Vörösmarty, and B. Fekete. (1996): Intercomparison of methods for calculating potential evaporation in regional and global water balance models. Water Resour Res 32:2315-2321.
- Feemers, M.; Blaschke, M.; Skatulla, U.; Gulder, H.-J. (2003): Klimaveränderungen und Biotische Schäden im Wald. LWF aktuell Nr. 37, S. 19-22
- Fitzgerald, D.R. & Moore, K.E. (1994): Growing season boundary layer climate and surface exchanges in a subarctic lichen woodland.- J. Geophys. Res. (Atmosphere), 99 (D1): 1899 - 1917.
- Flühler, H., Germann, P., Richard, F., Leuenberger, J. (1976): Bestimmung von bodenhydraulischen Paramtern für die Wasserhaushaltsuntersuchungen in natürlich gelagerten Böden; Z. Pflanzenern. Bodenk. 3, 329 - 342.
- Gärdenäs, A. I. Und P. E. Jansson (1995): Simulated water balance of Scots pine stands in sweden for different climate change scenarios; Journal of Hydrology 166, 107-125.
- Green, R. E., L. R. Ahuja und S. K. Chong (1986): Hydraulic conductivity, diffusivity and sorptivity of unsaturated soils: Field methods; In: Klute, A. (Hrsg.): Methods of soil analysis; Vol. 1: Physical and Mineralogical Methods, 2nd Ed., Agronomy series 9(1), American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 771-798.
- Hartge, K. H. und R. Horn (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden; Enke Verlag, Stuttgart.
- Hartge, K. H. und R. Horn (1999): Einführung in die Bodenphysik; Enke Verlag, Stuttgart.
- Hillel D. (1998): Environmental Soil Physics. Academic Press, London, UK
- Hillel, D. (1980): Fundamentals of Soil Physics; Academic Press, New York.
- 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
- Hörmann, G. (1997): SIMPEL Ein einfaches, benutzerfreundliches Bodenwassermodell zum Einsatz in der Ausbildung; Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 41(2), 67-72.
- Hörmann, G. und H. Meesenburg (2000): Die Erfassung und Modellierung des Wasserhaushaltes im Rahmen des Level II-Programms in der Bundesrepublik Deutschland; Forstarchiv 71, 70 - 75.

- Hörmann, G. und J. Schmidt (Hrsg.) (1995): Dokumentation von Wasserhaushaltsmodellen; Berichte des Forschungszentrums für Waldökosysteme, Göttingen, Reihe B 42, 111 S.
- Hoyningen-Huene, J. von (1983): Die Interzeption des Niederschlags in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen; Schriftenreihe DVWK 57, 1-53.
- Huwe, B. (1990): WHNSIM. Ein Modell zur Simulation des Wasser-, Wärme- und Stickstoffhaushalts landwirtschaftlich genutzter Böden: Programmdokumentation; Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Fachgebiet Bodenphysik, Universität Hohenheim, 96 S.
- Huwe, B. und R. R. van der Ploeg (1988): Modelle zur Simulation des Stickstoffhaushalts von Standorten mit unterschiedlicher landwirtschaftlicher Nutzung; Mitteilungen des Institutes für Wasserbau, Universität Stuttgart 69, 213 S.
- IPCC (2007): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor und H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin, 2007.
- 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
- Janssen, P. H. M. und P. S. C. Heuberger (1995): Calibration of process-oriented models; Ecological Modelling 83, 55 - 66.
- Jansson, P. E., Halldin, S. (1979): Model for the annual water and energy flow in a layered soil; in: Halldin, S. (Hrsg.): Comparison of forest and energy exchange models. Society for Ecological Modelling, Copenhagen, 145 - 163.
- Jansson, P.E. (1996): Simulation Model for Soil Water and Heat Conditions Description of the SOIL Model. Draft March 1996; 1 80.
- Jarvis, P.G., James, G.B. & Landsberg, J.J. (1976): Coniferous forest.- In: Monteith, J.L. (ed.): Vegetation and the Atmosphere. Academic Press, London; 171 240.
- Jäsche, P. und R. Scheibke (1993): Bestimmung hydraulischer Parameter an einem Bodenprofil; Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 72, 139-142.
- Johnsson, H., L. Bergström und P. E. Jansson (1987): Simulated Nitrogen Dynamics in a layered agricultural soil; Agriculture, Ecosystems and Environment 18, 333-356.
- Kasel, H. (1998): Wasserhaushaltsmodellierung und Stoffflussbilanzierung auf Kompensationsflächen der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz. Diplomarbeit an der Fachhochschule Bingen, Fachbereich Umweltschutz (Prof. H. Ber-nard), 147 S..

- Katzur, J., Liebner, F. (1995): Erste Ergebnisse eines Großlysimeterversuchs zu den Auswirkungen der Abraumsubstrate und Aschemelioration auf Sickerwasserbildung und Stofffrachten der Sickerwässer auf den Kippen und Halden des Braunkohlebergbaus
 1. Mitteilung: Versuchsbeschreibung, Funktionskontrolle und physikalischemische Parameter der Sickerwässer; Arch. Acker- Pfl. Bo-den. 39, 19 35.
- Kelliher, F.M., Lloyd, J., Arneth, A., Byers, J.N., McSeveny, T.M., Milukova, I., Grigoriev,
 S., Panfyorov, M., Sogatchev, A., Varlargin, A., Ziegler, W., Bauer, G. & Schulze, E.D. (1998): Evaporation from a central Siberian pine forest.- J. Hydrol., 205: 279 296.
- Kersten, M. S. (1949): Thermal properties of soils. Institut of Technology, Eng. Exp. Station, Bulletin No. 28, 1 - 26.
- Kindermann, G. (2009): Herleitung des jährlichen Zuwachses für Bäume deren BHD-Zuwachs nur für einen längeren Zeitraum bekannt ist. DVFFA, Sektion Ertragskunde, Jahrestagung 2009, 182 190.
- Klute, A. (Hrsg.) (1986): Methods of soil analysis; Vol. 1: Physical and Mineralogical Methods, 2nd Ed., Agronomy series 9(1), American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Kölling, Ch. (2007): Klimahüllen für 27 Baumarten. AFZ-DerWald, 23/2007, 1242-1245
- Lafleur, P.M. und Rouse, W.R. (1990): Application of an energy combination model for evaporation from sparse canopies. Agricultural and Forest Meteorology, 49, 135-153.
- Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (2008): Regionale Klimaänderungen auf der Basis des statistischen Regionalisierungsmodells WETTREG- ANALYSEN und Trends für Sachsen-Anhalt -, Hrsg.: Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt - Halle, Sonderheft 3
- Landsberg, J. J., M. R. Kaufmann, D. Binkley, J. Isebrands und P. G. Jarvis (1991): Evaluating progress towards closed forest models based on fluxes of carbon, water and nutrients. Tree Physiology 9, 1-15.
- Legovic, T. (1997): Ecological modelling Internet resources; Ecological Modelling 100, 163-169.
- Leuschner, Ch. (1998): Mechanismen der Konkurrenzüberlegenheit der Rotbuche. Ber. D. Reinh. Tüxen-Ges., 10, 5-18
- Lischeid, G. (1995): Prozessorientierte hydrologische Untersuchungen am Kleinen Gudenberg bei Zierenberg (Nordhessen) in verschiedenen Skalenbereichen; Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen, Bd. 128, Reihe A, 1 - 132.
- 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.; Fabian, P. (1999): Growing season extended in Europe. Nature 397, S. 659

- Milne, R. (1979): Water loss and canopy resistance of a young sitka spruce plantation. Bound. Layer Met., 16: 67-81.
- Monteith, J. L. (1965): Evaporation and environment. In: Fogg, G. E. (Hrsg.): The State and Movement of Water in Living Organisms, 19th Symp. Soc. Exp. Biol., The Company of Biologists, Cambridge, 205 234.
- Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res., 12, 513 522.
- Müller, J. (1996): Beziehungen zwischen Vegetationsstrukturen und Wasserhaushalt in Kiefern- und Buchenökosystemen; in: Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Nr. 185, 112 - 128.
- Nagel, J. (2005): Integriertes Handbuch des Simulators: Modellfunktionen und Koeffizienten des Forest Simulators BWINPro Version 7.0, http://treegross.sourceforge.net/, 15.06.2006
- Nagel, J.; Duda, H., Hansen, J. (2006): Forest Simulator BWINPro7. Forst u. Holz, 61, 427-429
- Peck, A., Mayer, H. (1996): Einfluss von Bestandesparametern auf die Verdunstung von Wäldern; Forstwiss. Centralblatt 115, 1 9.
- Penman, H.L., (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc.R.Soc. London 193A, 120-145.
- Perrier, A. (1982): Land surface processes: vegetation.- In: Eagleson, P. (ed.): Land Surface Processes in Atmospheric General Circulation Models; Cambridge Univ. Press, 395 -448.
- R Development Core Team (2009): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL http://www.R-project.org.
- Rang, J. (2003): Handbuch und mathematische Grundlagen von METEODATA (Version 2.0.1); Mathematik-Bericht 2003/2 Technische Universität Clausthal, Institut für Mathematik, 47 S.
- Rawls, W. J. und D. L. Brakensiek (1989): Estimation of Soil Water Retention and Hydraulic Properties; In: Morel-Seytoux, H. J. (Hrsg.): Unsaturated Flow in Hydro-logic Modelling, Theory and Practice; Kluwer Academic Publishers, 275-300.
- Rennenberg, H.; Seiler, W.; Matyssek, R.; Gessler, A. u. Kreuzwieser, J. (2004): Die Buche (Fagus silvatica L.) – ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa? Allg. Forst- u. J.-Ztg. 175, 210-224
- Richards, L. A. (1931): Capillary conduction of liquids in porous mediums. Physics, 1, 318 333.
- Richards, L.A. (1931): Capillary conduction of liquids through porous mediums. Phys., 1, 318-333

- Richter, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, 93 S.
- Running S. W. und J. C. Coughlan (1988): A general model of forest ecosystem processes for regional applications; I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes; Ecological Modelling 42, 125-154.
- Running, S. W. und S. T. Gower (1991): FOREST BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets; Tree Physiology 9, 147 160.
- Rüther, B.; Hansen, J.; Spellmann, H.; Nagel, J.; Möhring, B.; Schmidt-Walter, P.; Dieter, M. (2008): Clusterstudie Forst und Holz Sachsen-Anhalt. 2. Auflage. Göttingen, April 2008
- Rutter, A.J., Kershaw, K.A. Robins, P.C. und Morton, A.J., (1972): A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of corsian pine. Agricultural and Forest Meteorology,, 9, 367-384.
- Schaaf, W. (1992): Elementbilanz eines stark geschädigten Fichtenökosystems und deren Beeinflussung durch neuartige basische Magnesiumdünger; Bayreuther Bodenkundliche Berichte, Bd. 23.
- Schaaf, W. und Scherzer, J. (1998): Ermittlung des Wasserhaushalts von forstlich genutzten Kippenstandorten. In : Hüttl, R. F. (Hrsg.): REKLAM - Wiederherstellung ökologischer Bodenfunktionen in Bergbaufolgelandschaften des Lausitzer Braunkohlereviers unter Einsatz geeigneter Reststoffe bei der forstlichen Nutzung - 3. Zwischenbericht, BTU Cottbus, Lehrstuhl für Bodenschutz 1998, 28 - 40.
- Schaaf, W., M. Weisdorfer und R. F. Hüttl (1995): Soil solution chemistry and element budgets of three scots pine ecosystems along a deposition gradient in northeastern Germany. Water, Air and Soil Pollution, 85: 1197 - 1202.
- Schäfer, D., H. Montenegro und B. Herrling (1994): Bestimmung bodenhydraulischer Parameter unter Verwendung von Labor- und Freilanddaten: Ein Vergleich unterschiedlicher Verfahren; Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 74, 307-310.
- Scheffer, F. und Schachtschabel, P (1989): Lehrbuch der Bodenkunde, F.-Enke-Verlag Stuttgart.
- Scheibke, R. (1998): Die Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit in Böden mit der Augenblicksprofilmethode - Fehleranalyse, Feldexperiment und Simulation; Bayreuther Forum Ökologie, Band 57.
- Schellnhuber, H. (2008): Global warming: Stop worrying, start panicking?, Proceedings of the National Academy of Sciences , National Acad Sciences, Vol. 105(38), S. 14239;
- Scherzer, J. (2001): Der Wasserhaushalt von Kiefernforsten auf Kippböden der Niederlausitz; Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung, Band 16.

- Scherzer, J. und Schaaf, W. (1997): Beschreibung des Bodenwasserhaushalts von Kippenstandorten - Möglichkeiten und Grenzen eines eindimensionalen Modellierungsansatzes (Modell SOIL). Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 85(1): 151 - 154.
- Schmitz, F., Polley, H., Hennig, P., Schwitzgebel, F. & Kriebitzsch, W.-U. (2004): Die zweite Bundeswaldinventur BWI2: Das Wichtigste in Kürze; Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, Bonn
- Schröder T. (2006): Asiatischer Laubholzbockkäfer (Anoplophora glabripennis), URL: http://www.jki.bund.de/cln_045/nn_1171846/DE/Home/pflanzengesundheit/ schadorganismen/anoplophoraGlabripennis/alb__datenblatt.html (Stand: 28.9.2009)
- Schröder, M. (1975): Erste Ergebnisse der Großlysimeteranlage St. Arnold; Wasserwirtschaft 65, 301 - 305.
- Schüler, G. (1998): Schwemmfächer im nördlichen Oberrheingraben als Waldstandorte. Habil.Schr., Univ. Trier; Mitt. der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz, Nr. 16/1999 186 S.
- Schultze, B. (1998): Optimierung der Messung bodenhydraulischer Eigenschaften durch inverse Simulation von Ausfluß und Rückflußexperimenten an Bodensäulen; Bayreuther Forum Ökologie, Band 60.
- Schweingruber, F. H. (1983): Der Jahrring. Haupt, Bern.
- Schweingruber, F. H. (1996): Tree Rings and Environment. Dendroecology. Bern, Stuttgart, Wien (Paul Haupt).
- Shuttleworth, W.J. (1989): Micrometeorology of temperate and tropical forest.- Phil. Trans. Roy. Soc. London, B 324: 299 334.
- Shuttleworth, W.J. und Wallace, J.S., (1985): Evaporation von sparse crops An energy combination theory. Q.J.R.Meterol.Soc., 111, 839-855.
- Sorooshian, S. Q. D. und V. K. Gupta (1993): Calibration of rainfall-runoff models: Application of global optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting Model; Water Resources Research 29, 1185-1194.
- 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
- Spellmann, H., Sutmöller, J. & H. Meesenburg (2007): Risikovorsorge im Zeichen des Klimawandels. AFZ – Der Wald 23. S. 1246-1249.

- Stannard, D.I. (1993): Comparison of Penman-Montheith, Shuttleworth-Wallace, and modified Priestley-Taylor evapotransporation models for wildland vegetation in semiarid rangeland. Water Resour Res 29:1379-1392.
- Süddeutsche Zeitung vom 13.12.2008: Ein kleines Stück vorangekommen , Interview von J. Rubner mit Hans Joachim Schellnhuber (Potsdam Institut für Klimafolgenforschung)
- 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 3, 135-157.
- Swift, L.W. Jr. (1976): Algorithm for solar radiation on mountain slopes. Water Resour Res 12:108-112.
- Thalenhorst, W. (1958): Grundzüge der Populationsdynamik des grossen Fichtenborkenkafers Ips typographus L., Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Vol. 21, S. 1-126.
- Thom, A.S., (1975): Momentum, mass and heat exchange. In J.L. Monteith (Hrsg.), Vegetation and the Atmosphere, Band 1, Kapitel 3, 57-109. Academic Press, London.
- Tiktak, A., van Grinsven, H.J.M. (1995): Review of sixteen forest-soil-atmosphere-models; Ecological modelling 85, 35 - 53.
- Ulrich, B. (1981): Theoretische Betrachtungen des Ionenkreislaufs in Waldökosystemen; Z. Pflanzenernährung Bodenk. 144, 289 - 305.
- Ulrich, B. (1989): Effects of acid precipitation on forest ecosystems in Europe; in Adriano, D. C., Johnson, A. H. (Hrsg): Acid precipitation, Vol. 2: Biological and eco-logical Effects; Springer, New York, 189 - 272.
- Van Genuchten, M. Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils; Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892 - 898.
- Van Genuchten, M. Th., F. J. Leij und S. R. Yates (1991): The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils; EPA-Report 600/2-91/065, U. S. Environmental Protection Agency; ADA, Oklahoma.
- Verma, S.B., Baldocchi, D.D., Anderson, D.E., Matt, D.R. & Clement, R.J. (1986): Eddy fluxes of CO2, water vapour, and sensible heat over a deciduous forest.- Boundary Layer Meteorol., 36: 71 91.
- Vogel, T., K. Huang, R. Zhang und M. Th. Van Genuchten (1996): The HYDRUS Code for Simulating One-Dimensional Water Flow, Solute Transport, and Heat Movement in Variably-Saturated Media; Research Report No. 140; U. S. Salinity Laboratory, Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture; Riverside, California.
- Warrick, A. W., Myers, D. E., Nielson, D. R. (1986): Geostatistical methods applied to soil science. In: Klute, A. (Hrsg.): Methods of soil analysis. Vol. 1: Physical and Minera-

logical Methods, 2nd Ed., Agronomy series 9(1), American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.

- Weihe, J. (1974): Benetzung und Interzeption von Buchen- und Fichtenbeständen in Nordrhein-Westfalen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 145, 1-11.
- Weisdorfer, M. (1999): Einfluß unterschiedlicher Schwefel- und Staubimmissionen in der Vergangenheit auf die chemische Entwicklung von Humusauflagen und Mineralböden in Kiefernwaldökosystemen im Nordostdeutschen Tiefland; Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung, Band 4.
- Wermelinger, B; Epper, C.; Schneider D. (2002): Das Erbe des Borkenkäfers-Warum tote Käferbäume stehen lassen, Wald und Holz Vol. 83, S. 39-42
- Whitmore, A. P. (1991): A method for assessing the goodness of computer simulation of soil processes; Journal of Soil Science 42, 289 299.
- Wigmosta, M.S., Vail, L.W., und Lettenmaier, D.P. (1994): A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. Water Resour Res 30:1665-1679.
- Wilson, G. V., Alfonsi, J. M., Jardine, J. M. (1989): Spatial variability of saturated hydraulic conductivity of the subsoil of two forested watersheds. Soil Sci. Soc. Am. J. 53, 679 - 685.
- Wösten, J.H.M.; Lilly, A.; Nemes, A.; Le Ba, C. (1999): Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. Geoderma 90, 169-185.
- Zimmermann, L. (1995): Der Bodenwasserhaushalt an einem Hochlagenstandort im Schwarzwald; Freiburger Bodenkundl. Abhandlungen, Bd. 35.

9 Anhang

9.1 Teil Risikoanalyse

Tabelle 1:Regressionsparameter zur Berechnung des Zusammenhangs zwischen Geländehöhe
und Anzahl der Buchdruckergenerationen pro Jahr

-

Zeitraum/Szenario	R ²	Interzept	Steigung
1961-1990 trocken	0,906	2,845000	-0,001900
1961-1990 feucht	0,900	2,974653	-0,0020184
A1B 2011-2030 Feucht	0,917	2,972400	-0,001987
A1B 2011-2030 Trocken	0,951	3,123508	-0,002058
A1B 2031-2050 Feucht	0,974	3,557280	-0,002337
A1B 2031-2050 Trocken	0,967	3,535971	-0,002344