

AUSWIRKUNGEN WALDBAULICHER BEHANDLUNGSVARIANTEN AUF DEN WASSERHAUSHALT – MODELLGESTÜTZTE ANALYSE AM BEISPIEL EINES EINZUGSGEBIETES IN NORDHESSEN

Caroline Fiebiger, Swen Hentschel, Birte Scheler, Henning Meesenburg,
Johannes Suttmöller, Johannes Eichhorn
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen

1 EINLEITUNG

Das Projekt AnFor (Analyse der Wirkungen und Ableitung von Anpassungsstrategien für die Forstwirtschaft) beschäftigt sich innerhalb des Verbundprojektes KLIMZUG-Nordhessen mit möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Waldstandorte in Nordhessen. Kernfragen betreffen die Abschätzung zukünftigen Wasserstresses sowie den Effekt forstlicher Maßnahmen bezüglich der Erhöhung der Bodenwasserverfügbarkeit.

Im Mittelpunkt sollen im Folgenden Ergebnisse aus dem Kalibriergebiet Elsterbach für das Wasserhaushaltsmodell stehen. Dabei werden vorrangig die Auswirkung von Klimaänderungen und der Einfluss von Waldwachstum und Waldbehandlung auf den Wasserhaushalt des Einzugsgebietes behandelt.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 UNTERSUCHUNGSGEBIET

Das Einzugsgebiet des Elsterbaches befindet sich im südlichen Teil des Reinhardswaldes in Nordhessen. Vorfluter des Elsterbaches ist die Fulda. Das Untersuchungsgebiet hat eine räumliche Ausdehnung von 426 ha und umfasst den oberen Teil des Einzugsgebiets bis zum Abflussmesswehr Elsterbach, das sich etwa 1,5 km oberhalb der Mündung in die Fulda befindet (Abb. 1).



Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes.

Vom tiefsten Punkt an der Pegelanlage bei 230 m ü. NN steigt das Gelände auf 468 m ü. NN am höchsten Punkt des Einzugsgebietes an. Aufgrund der Höhenlage und seiner morphologischen Eigenschaften hat das Gebiet Mittelgebirgscharakter (WEßEL 1992).

Der geologische Untergrund wird aus Buntsandstein und Basalt gebildet. Im nordwestlichen Gebietsteil haben sich teilweise unter Lösseinfluss eutrophe Braunerden und Parabraunerden entwickelt, während der Nordosten des Gebietes von Pseudo- und Stagnogleyen (sog. Molkeböden) geprägt wird.

Die Böden des Untersuchungsgebietes haben insgesamt eine relativ hohe Wasserspeicherkapazität. Bezogen auf den pflanzenverfügbaren Bodenwasseranteil (nFK = nutzbare Feldkapazität) liegt das gewichtete Gebietsmittel bei 162 mm/m. Die Spannweite reicht von 70 mm/m bis über 250 mm/m.

Das Einzugsgebiet des Elsterbaches ist zu 95 % bewaldet (SCHELER & EICHORN 2005). Davon sind 46 % mit Fichte, 34 % mit Buche und 9 % mit Eiche bestockt. Andere Baumarten wie Kiefer, Lärche oder Erle haben einen Anteil von 11 % (Abb. 2). Ältere bis alte Bestände über 100 Jahre nahmen insgesamt nur sehr kleine Flächen ein. Das Gebietsmittel des Bestandesalters war für das Stichjahr 2000 mit 54 Jahren relativ niedrig.

AUSWIRKUNGEN WALDBAULICHER BEHANDLUNGSVARIANTEN AUF DEN WASSERHAUSHALT – MODELLGESTÜTZTE ANALYSE AM BEISPIEL EINES EINZUGSGEBIETES IN NORDHESSEN

Caroline Fiebiger, Swen Hentschel, Birte Scheler, Henning Meesenburg,
Johannes Suttmöller, Johannes Eichhorn
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen

1 EINLEITUNG

Das Projekt AnFor (Analyse der Wirkungen und Ableitung von Anpassungsstrategien für die Forstwirtschaft) beschäftigt sich innerhalb des Verbundprojektes KLIMZUG-Nordhessen mit möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Waldstandorte in Nordhessen. Kernfragen betreffen die Abschätzung zukünftigen Wasserstresses sowie den Effekt forstlicher Maßnahmen bezüglich der Erhöhung der Bodenwasserverfügbarkeit.

Im Mittelpunkt sollen im Folgenden Ergebnisse aus dem Kalibriergebiet Elsterbach für das Wasserhaushaltsmodell stehen. Dabei werden vorrangig die Auswirkung von Klimaänderungen und der Einfluss von Waldwachstum und Waldbehandlung auf den Wasserhaushalt des Einzugsgebietes behandelt.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 UNTERSUCHUNGSGEBIET

Das Einzugsgebiet des Elsterbaches befindet sich im südlichen Teil des Reinhardswaldes in Nordhessen. Vorfluter des Elsterbaches ist die Fulda. Das Untersuchungsgebiet hat eine räumliche Ausdehnung von 426 ha und umfasst den oberen Teil des Einzugsgebiets bis zum Abflussmesswehr Elsterbach, das sich etwa 1,5 km oberhalb der Mündung in die Fulda befindet (Abb. 1).

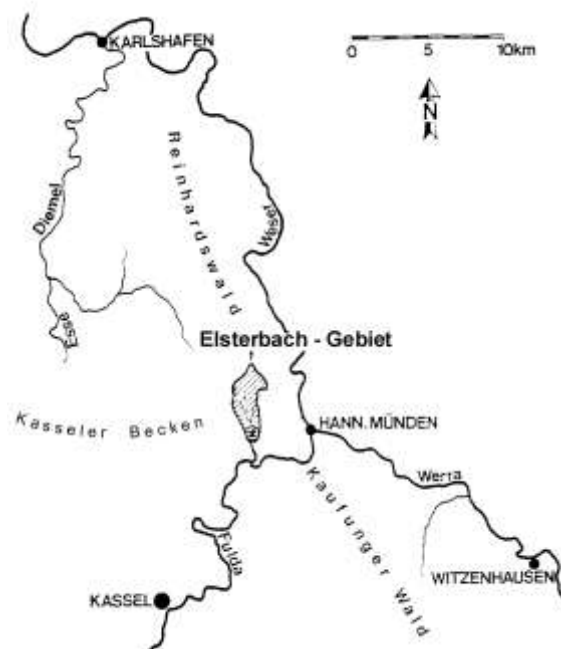


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes.

Vom tiefsten Punkt an der Pegelanlage bei 230 m ü. NN steigt das Gelände auf 468 m ü. NN am höchsten Punkt des Einzugsgebietes an. Aufgrund der Höhenlage und seiner morphologischen Eigenschaften hat das Gebiet Mittelgebirgscharakter (WEßEL 1992).

Der geologische Untergrund wird aus Buntsandstein und Basalt gebildet. Im nordwestlichen Gebietsteil haben sich teilweise unter Lösseinfluss eutrophe Braunerden und Parabraunerden entwickelt, während der Nordosten des Gebietes von Pseudo- und Stagnogleyen (sog. Molkeböden) geprägt wird.

Die Böden des Untersuchungsgebietes haben insgesamt eine relativ hohe Wasserspeicherkapazität. Bezogen auf den pflanzenverfügbaren Bodenwasseranteil (nFK = nutzbare Feldkapazität) liegt das gewichtete Gebietsmittel bei 162 mm/m. Die Spannweite reicht von 70 mm/m bis über 250 mm/m.

Das Einzugsgebiet des Elsterbaches ist zu 95 % bewaldet (SCHELER & EICHORN 2005). Davon sind 46 % mit Fichte, 34 % mit Buche und 9 % mit Eiche bestockt. Andere Baumarten wie Kiefer, Lärche oder Erle haben einen Anteil von 11 % (Abb. 2). Ältere bis alte Bestände über 100 Jahre nahmen insgesamt nur sehr kleine Flächen ein. Das Gebietsmittel des Bestandesalters war für das Stichjahr 2000 mit 54 Jahren relativ niedrig.

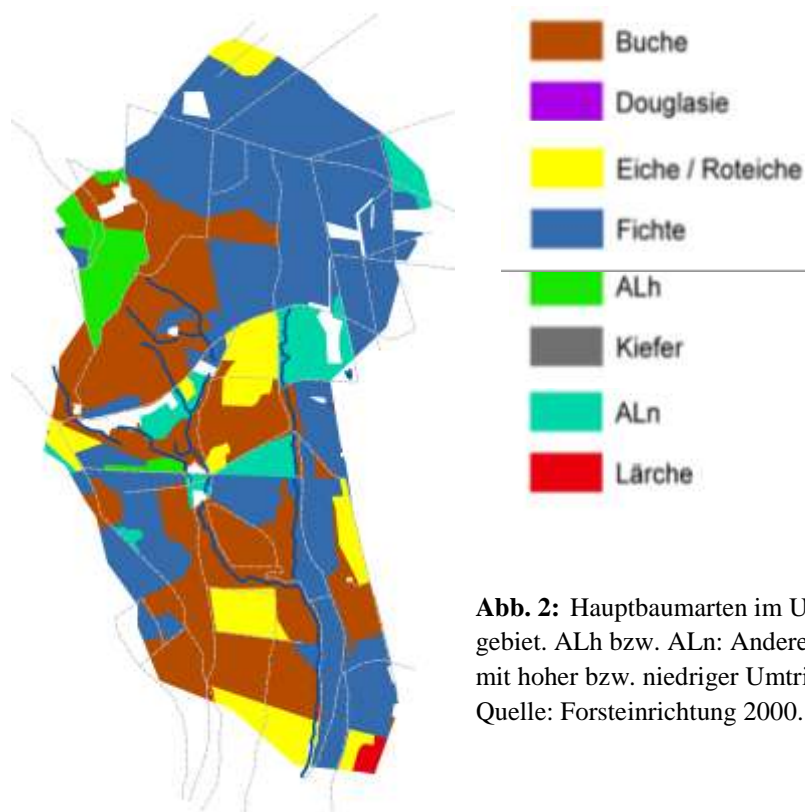


Abb. 2: Hauptbaumarten im Untersuchungsgebiet. ALh bzw. ALn: Andere Laubhölzer mit hoher bzw. niedriger Umtriebszeit.
Quelle: Forsteinrichtung 2000.

2.2 DATEN UND METHODEN

Der Wasserhaushalt des Einzugsgebietes Elsterbach wurde mit dem Modell WaSiM-ETH simuliert (SCHULLA 2012). Die für das Wasserhaushaltsmodell notwendigen gebietsbeschreibenden Informationen sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Datenbasis der Wasserhaushaltsmodellierung.

Parameter	Auflösung	Quelle
Niederschlag, Temperatur, Rel. Luftfeuchte, Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit	täglich	DWD (1961 – 2009), WettReg A1B, Varianten feucht und trocken (1961 – 2100)
Gelände	25 m	DHM25
Boden	1:50 000	BÜK 50, 5 Bodenprofile im Untersuchungsgebiet
Vegetation	5 Jahre	Forsteinrichtung, Modellergebnisse des WaldPlaners

Da die Klimadaten stationsbezogen vorlagen, wurden sie regionalisiert. Bei nicht höhenabhängigen Größen wurde die Methode der Inversen Distanzwichtung (IDW), bei höhenabhängigen Größen (Niederschlag, Temperatur) eine lineare Kombination aus IDW und Höhenregression angewandt. Die Methodik wird ausführlich bei SCHULLA (2012) beschrieben.

Die Verdunstung wurde nach dem Ansatz von PENMAN-MONTEITH berechnet. Zur Simulation der Wasserflüsse in der ungesättigten Bodenzone wurde die RICHARDS-Gleichung angewandt. Die dafür benötigten VAN GENUCHTEN-Parameter wurden aus den Daten zu Bodenart, Skelettgehalt, Trockenrohdichte und Humusgehalt nach RENGGER et al. (2009) abgeleitet.

Die Parametrisierung der Vegetation wurde über eine Kopplung des Waldwachstumsmodells WaldPlaner (HANSEN 2006) mit dem Wasserhaushaltsmodell realisiert (SUTMÖLLER et al. 2009). So konnte die Dynamik der Waldentwicklung, bei der Wachstum, Entnahmen, natürliche Mortalität und Verjüngung berücksichtigt wird, in das Modell einfließen. Die Bestände wurden mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Jahren mit dem WaldPlaner fortgeschrieben und die Ergebnisse am Ende eines Simulationszyklus an das Wasserhaushaltsmodell übergeben.

2.3 KALIBRIERUNG

Für die Kalibrierung des Modells konnte auf langjährige Datenreihen aus dem Untersuchungsgebiet zurückgegriffen werden. Angepasst wurden die Interzeption für den Zeitraum 1995 – 2003 und der Gebietsabfluss 1995 – 2005. Dafür standen Daten von Freilandniederschlag und Kronentraufe in 14-tägiger Auflösung und Gebietsabflüsse in täglicher Auflösung zur Verfügung.

Die Güte des Modells wurde an einem unabhängigen Datensatz von Pegelabflussmessungen für den Zeitraum 1972 – 1995 validiert. Beispielhaft für zwei hydrologische Ereignisse zeigt Abb. 3 die Anpassung während einer Schneeschmelze (links) und während eines Niederschlagsereignisses (rechts). Der Nash-Sutcliffe-Koeffizient (NSE) als Modellgütekriterium bestätigte mit einem Wert von 0,7 die gute Anpassung.

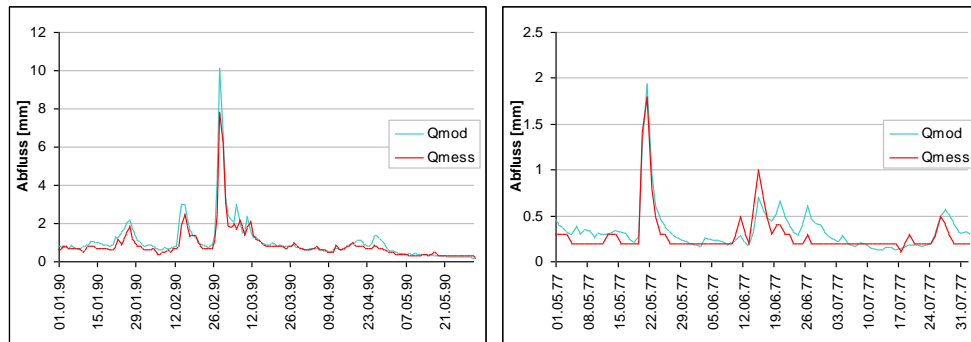


Abb. 3: Simulierter (Qmod) und gemessener (Qmess) Gebietsabfluss während eines Schneeschmelzereignisses (Abb. links) und eines Niederschlagsereignisses (Abb. rechts).

3 ERGEBNISSE

Im Referenzzeitraum 1961 – 1990 erhielt das Einzugsgebiet des Elsterbaches im Mittel 835 mm/a Niederschlag. Davon verdunsteten ca. 60 % und etwa 40 % kamen zum Abfluss. Für die potentielle Verdunstung, bezogen auf die reale Waldbedeckung, wurde ein Wert von 577 mm/a ermittelt. Die mittlere Jahrestemperatur betrug 8 °C.

In der Vegetationszeit lagen die Temperaturen im Mittel bei 14,6 °C. Bei einem mittleren Niederschlag von 365 mm verdunsteten 340 mm, der Abfluss betrug etwa 90 mm. Bemerkenswert ist, dass der Elsterbach auch in extrem trockenen Sommern noch Wasser führte. Dies ist auf die relativ hohe Speicherkapazität der Böden bei gleichzeitig ausreichend hohen Winterniederschlägen zurückzuführen. Im Mittel der Nicht-Vegetationszeit betrugen diese 470 mm bei Temperaturen von 3,7 °C.

Um mögliche zukünftige Klimaverhältnisse abzubilden, wurde auf Klimaprojektionen zurückgegriffen, die für das IPCC-SRES-Szenario A1B mittels des Globalmodells ECHAM4 und des Regionalmodells WettReg2006 in der trockenen und feuchten Variante regionalisiert wurden (SPEKAT et al. 2007). Entsprechend dieser Annahmen bedeutet das für den Zeitraum 2071 – 2100 einen deutlichen Temperaturanstieg auf ca. 10,5 °C im Jahr, 16,5 °C in der Vegetationszeit bzw. 6,2 °C im Winter. Die Niederschläge würden sich bei der feuchten Variante auf 900 mm/a erhöhen und bei der trockenen Variante auf 779 mm/a reduzieren. Für die Vegetationszeit liegen die Werte bei 345 mm bzw. 302 mm und für die Zeit der Vegetationsruhe bei 553 mm bzw. 477 mm. Bei beiden Varianten zeigt sich eine deutliche Verlagerung der Niederschläge hin zu trockeneren Sommern und feuchteren Wintern. Erwähnt werden muss in diesem Zusammenhang, dass WettReg in der feuchten Variante sowohl die Temperaturen als auch Niederschläge der Referenzzeit 1961 – 90 überschätzt. Die Abweichung ist signifikant. Die trockene Variante bildet dagegen die vergangenen Verhältnisse plausibel ab.

Die dargestellte Entwicklung hat auf den Wasserhaushalt von Wäldern unmittelbare Konsequenzen. So erhöht sich infolge der hohen Temperaturen die potenzielle Verdunstung von ≈ 400 mm in der Vegetationszeit auf 490 mm bzw. 525 mm (feuchte bzw. trockene

Variante). Da jedoch gerade in der Vegetationszeit mit geringeren Niederschlägen zu rechnen ist, erhöht sich das Risiko von Trockenstress. Als Indikator für das Trockenstressrisiko wird hier die Klimatische Wasserbilanz verwendet, die aus der Differenz von Niederschlag und potenzieller Verdunstung (bei aktueller Vegetation) während der Vegetationszeit resultiert.

In der Referenzzeit 1961 – 1990 lag dieser Wert bei -37 mm als Gebietsmittel und kann damit als nahezu ausgeglichen bezeichnet werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass den Pflanzen in den Sommermonaten zusätzlich zum Niederschlag auch das im Winter aufgefüllte Bodenwasser zur Verfügung steht (vgl. auch Abb. 6, links oben). Geht man davon aus, dass der Wald auch weiterhin gemäß der Hessischen Waldbaurichtlinie (RIBES 2012) bewirtschaftet wird, sinkt der Wert im Mittel der Jahre 2071 – 2100 auf -180 mm für die feuchte Variante des Klimaszenarios A1B WettReg. Bei der trockenen Variante des WettReg-Modells wird ein Wert von -262 mm erreicht. Dieses Defizit kann nur auf Standorten mit sehr hoher Wasserspeicherkraft ausgeglichen werden, so dass insgesamt von einer Erhöhung des Trockenstressrisikos ausgegangen werden muss.

Ein wesentlicher Aspekt der Untersuchung war die Frage, inwieweit sich die Berücksichtigung der Walddynamik auf die Modellergebnisse auswirkt. Beispielhaft soll dies für den Gebietsabfluss unter Annahme des Szenarios A1B WettReg, trockene Variante, gezeigt werden. In Abb. 4 sind die Ergebnisse zweier Modellläufe mit unterschiedlicher Vegetationsentwicklung gegenübergestellt. Einmal wurde der Waldzustand aus dem Jahr 2000 auf den gesamten Modellierzeitraum übertragen („statisch“), während im zweiten Modelllauf „dynamisch“ forstliche Eingriffe wie Durchforstung, Ernte, aber auch natürliches Wachstum, Mortalität und Verjüngung in 5-Jahresschritten in das Modell eingingen.

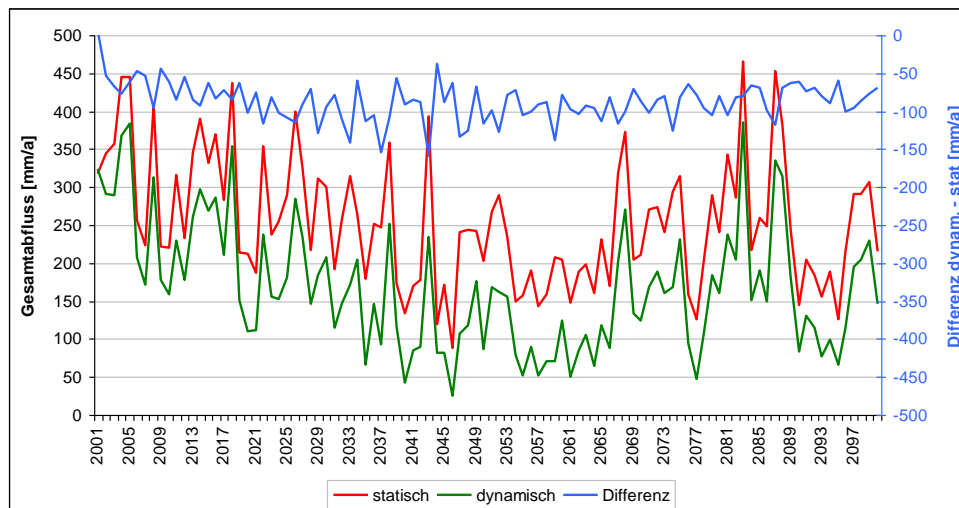


Abb. 4: Auswirkungen der Walddynamik auf den Wasserhaushalt (Gesamtabfluss).

Die Veränderungen des Abflussverhaltens im Modelllauf „statisch“ sind allein auf Klimaänderungen als die einzige sich ändernde Größe zurückzuführen, während bei der

„dynamischen“ Simulation eine Überlagerung von Klima- und Vegetationseffekten vorliegt. Die Differenz beider Simulationen (Abb. 4, rechte Ordinate) zeigt den vom Klimaeinfluss bereinigten Effekt der Vegetationsdynamik auf den Gebietsabfluss. Die Abflussmenge ist bei Berücksichtigung der Waldentwicklungsdynamik niedriger als bei der statischen Variante. Hintergrund ist, dass die im Jahr 2000 im Mittel relativ jungen Bestände (s. Kap. 2.1) zu Beginn der Betrachtung aufwachsen, damit größer und dichter werden und in der Folge mehr verdunsten, so dass sich der Abfluss verringert. Damit hat die Annahme eines statischen Waldzustandes aus dem Stichjahr 2000 eine Überschätzung des Abflusses um bis zu 100 mm zur Folge. Es ist also von Bedeutung, welches Zeitfenster betrachtet wird und in welchem Entwicklungsstadium sich der Wald befindet. Besonders bei der Kalibrierung des Wasserhaushaltsmodells kann die Berücksichtigung der Waldentwicklungsdynamik zu einer wesentlichen Verbesserung der Anpassung führen.

Für das Elsterbachgebiet wurden hinsichtlich der Vegetationsbedeckung einige Szenarien entwickelt, die die Dynamik der Waldentwicklung nicht berücksichtigen. Bei diesen Modellläufen steht die Frage im Vordergrund, ob die Bevorzugung bestimmter Baumarten einen Effekt auf die Wasserhaushaltsgrößen hat oder nicht. So wird im Szenario „Laub“ angenommen, dass anstelle der Nadelbäume im Einzugsgebiet Buchen gleichen Alters stehen, so dass im Gebiet ausschließlich Laubwald zu finden ist. Gegensätzlich dazu wurde beim Szenario „Nadel“ angenommen, dass anstelle der Laubbäume Fichten gleichen Alters stehen und das Gebiet ganzflächig von Nadelwald bestockt ist. Daneben steht das Szenario „Status quo“ (stat. quo), das den Waldzustand aus dem Jahr 2000 widerspiegelt (Abb. 2). Die Referenz für alle Zukunftsszenarien ist das Szenario „mess“ für den Zeitraum 1961 – 1990 in den Varianten statisch und dynamisch.

Um den Effekt forstlicher Behandlung auf den Wasserhaushalt des Einzugsgebietes umfassend quantifizieren zu können, wurden unterschiedliche Nutzungsintensitäten angenommen. Diese Modellläufe wurden dynamisch modelliert. Die Umsetzung der Hessischen Waldbaurichtlinie (Hess. RL.) gemäß RiBES (2012) stellt dabei das praxisnächste Szenario dar. Als Pendant hierzu steht das Szenario „ohne Nutzung“ (ohne Nutz.), das nur Naturverjüngung, Wachstum und natürliche Mortalität als dynamische Steuergrößen beinhaltet.

Die Waldbauszenarien beziehen sich jeweils auf den Zeitraum 2071 – 2100. Die Modellierung fand sowohl unter der Annahme eines Klimas gemäß WettReg A1B trockene Variante als auch A1B feuchte Variante statt.

Für den Zeitraum 1961 – 1990 unterscheiden sich die Mittelwerte der Abflussjahressummen der Varianten „statisch“ und „dynamisch“ nur wenig. Bei Berücksichtigung der Dynamik der Waldentwicklung liegt der Wert mit 306 mm um 20 mm unter der Variante „statisch“.

Für die feuchte Variante von WettReg A1B sind durch die unterschiedlichen waldbaulichen Szenarien keine signifikanten Änderungen gegenüber der Vergangenheit zu erwarten. Die statisch durchgeführten Modellierungen mit Variationen in der Baumartenwahl ergeben für die Abflussmenge die Reihenfolge Laubwald Zukunft > Mischwald Zukunft > Nadelwald Zukunft > Mischwald Vergangenheit. Die Abflüsse sind jeweils höher als bei den die Nutzungsintensität betreffenden, dynamisch simulierten Szenarien „Umsetzung der Hessischen Waldbaurichtlinie“ und „ohne Nutzung“. Das

Szenario „ohne Nutzung“ ist das einzige der mit A1B feuchte Variante gerechneten Zukunftsszenarien, bei dem geringere Abflüsse ermittelt wurden als in der Vergangenheit. Der Unterschied ist jedoch nicht signifikant.

Unter Annahme der trockenen Variante von WettReg A1B liegen alle für den Zukunftszeitraum ermittelten Abflüsse niedriger als der der Vergangenheit. Es ergibt sich die Reihenfolge „Mischwald Vergangenheit“ > „Mischwald Zukunft“ > „Nadelwald Zukunft“ > „Umsetzung der Hessischen Waldbaurichtlinie“ > „ohne Nutzung“ (Abb. 5).

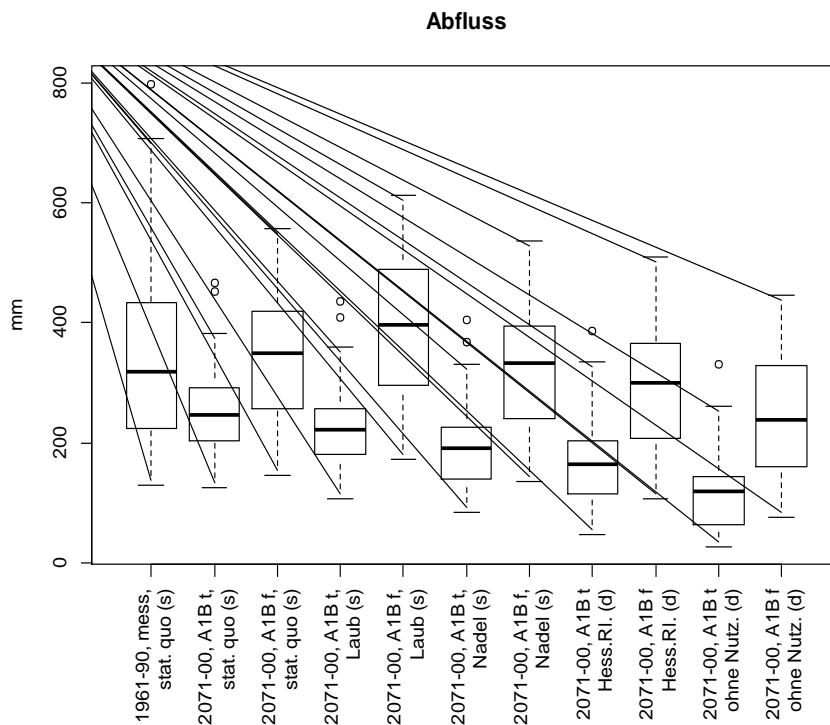


Abb. 5: Effekt von Klima, Waldwachstum und forstlichen Eingriffen auf den Gebietsabfluss des Elsterbaches. Klimadaten: DWD-Messdaten (mess), WettReg A1B feuchte (A1B f) und trockene Variante (A1B t); Waldbauszenarien: status quo (stat. quo) = Waldzustand des Jahres 2000, Laub- statt Mischwald (Laub), Nadel- statt Mischwald (Nadel), Umsetzung der Hessischen Waldbaurichtlinie (Hess. Rl.), ohne forstliche Nutzung (ohne Nutz.), starke forstliche Nutzung (rad.); Vegetationsbeschreibung: statisch (s), dynamisch (d).

Der Effekt waldbaulicher Maßnahmen, ausgedrückt in der Differenz zwischen dem Szenario mit dem höchsten und dem mit dem niedrigsten Abfluss, beträgt bei WettReg A1B trockene Variante maximal 134 mm, bei WettReg A1B feuchte Variante maximal 146 mm. Demgegenüber steht ein deutlicher Klimaeffekt, der sich aus dem Unterschied zwischen beiden Varianten von WettReg A1B ergibt. Dieser liegt je nach Waldbauszenario zwischen 93 mm und 166 mm. Damit kann der Effekt der Unsicherheit der Klimaprojektionen, vor allem bezüglich des Niederschlages, größer sein als der Effekt waldbaulicher Maßnahmen.

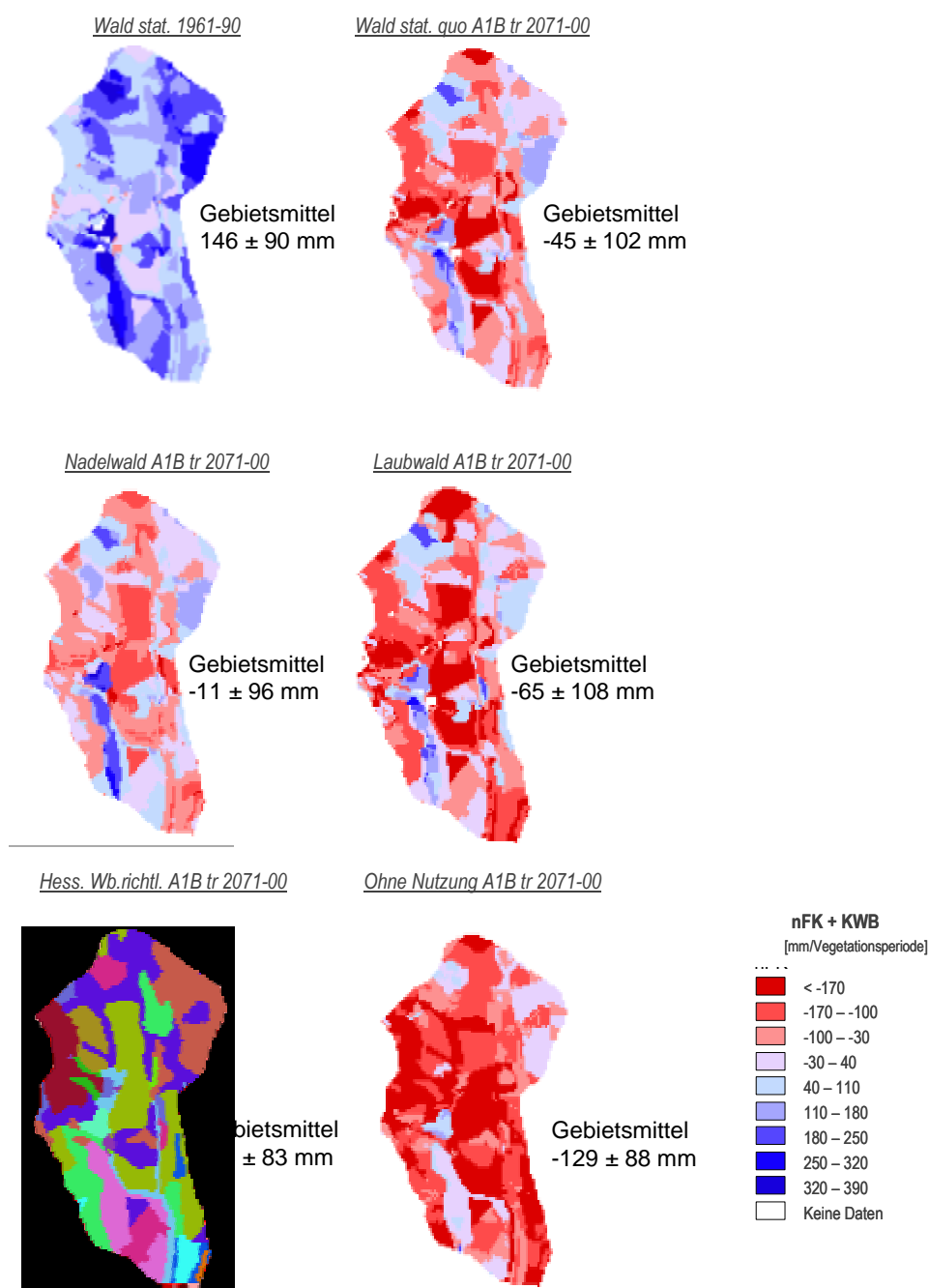


Abb. 6: Vergleich der Summe von Klimatischer Wasserbilanz in der Vegetationsperiode und nutzbare Feldkapazität (nFK) bis in eine Tiefe von 1 Meter für verschiedene Waldbau-szenarien bei Annahme von DWD-Messdaten (1961-1990) und WettReg A1B trockene Variante (2071 – 2100).

Eine wichtige Größe zur Beurteilung von Trockenstressgefährdung von Standorten ist die Klimatische Wasserbilanz (KWB) der Vegetationszeit. Die KWB erlaubt die Beurteilung, ob in den Sommermonaten ausreichend Niederschlag für eine uneingeschränkte Verdunstung fällt. Da den Pflanzen aber zusätzlich das im Boden pflanzenverfügbar gespeicherte Wasser zur Verfügung steht, wird die Größe der KWB mit der nutzbaren Feldkapazität verrechnet, indem davon ausgegangen wird, dass sich der Bodenwasserspeicher während der Vegetationsruhe wieder auffüllt. Für das Elsterbachgebiet haben die Modellierungen diese Annahme bestätigt.

Wie aus Abb. 6 links oben hervorgeht, war das Elsterbachgebiet im Zeitraum der Referenzperiode 1961 – 1990 sehr gut wasserversorgt. Die Summe aus Sommerniederschlägen und Bodenwasser ließen auf über 95 % der Fläche eine uneingeschränkte Verdunstung der Waldbestände zu. Nur auf vereinzelt Standorten mit geringer Bodenwasserspeicherkraft trat ein geringes Defizit an pflanzenverfügbarem Wasser auf. Im Mittel wurde für das Gebiet ein Wasserüberschuss von 146 mm berechnet.

In Abb. 6 rechts oben wird angenommen, dass sich das Waldbild aus dem Jahr 2000 nicht ändert. Dafür werden klimatische Verhältnisse gemäß WettReg A1B in der trockenen Variante für den Zeitraum 2071 – 2100 zugrunde gelegt. Demnach würde im Einzugsgebiet im Mittel ein Defizit von 45 mm auftreten. Nur auf Standorten mit sehr hoher Wasserspeicherkapazität wäre weiterhin eine uneingeschränkte Verdunstung möglich. Diese Entwicklung ist auf die erhöhte potenzielle Verdunstung durch höhere Sommertemperaturen bei gleichzeitiger Verlagerung der Niederschläge in die Wintermonate zurückzuführen. Die Vegetation ist in diesem Szenario durch den realen Wald des Stichjahres 2000 gekennzeichnet. Bei Annahme von ausschließlich Nadel- statt Mischwald reduziert sich das Defizit geringfügig auf im Mittel -11 mm. Bei Annahme von Laubwald würden Werte um -65 mm erreicht (Abb. 6 Mitte). Grund ist die höhere potenzielle Verdunstung von Laubbäumen im Vergleich zu Nadelbäumen innerhalb der Vegetationszeit. Für die Wintermonate kehrt sich das Verhältnis um, so dass unter Laubwald mehr Abfluss stattfinden kann als unter Nadelwald (Abb. 5).

Werden zusätzlich Wachstum, Durchforstung, Ernte und Verjüngung der Bestände nach RiBES (2012) berücksichtigt, ergibt sich für den Zeitraum 2071 – 2100 ein noch höheres Defizit. Bei Annahme der Umsetzung der Hessischen Waldbaurichtlinie läge dieses Defizit im Mittel bei 84 mm. Würden sämtliche Nutzungen eingestellt, wäre das Defizit mit durchschnittlich 129 mm noch deutlich höher.

Da sich die Klimatische Wasserbilanz auf die potenzielle Verdunstung bezieht, liefert sie keine Angabe zum realen Bodenwasserdefizit an einem Standort. Um hierzu Aussagen treffen zu können, wird der Bodenwasserhaushalt zweier Bestände im Einzugsgebiet beispielhaft dargestellt.

Beide Standorte befinden sich im unteren Einzugsgebietsbereich nahe dem Pegel. Ein ostexponierter Hang ist mit 94-jähriger Buche bestockt. Beim Boden handelt es sich um eine Pseudogley-Parabraunerde aus pleistozänem Löss mit einer nutzbaren Feldkapazität von 225 mm. Bei einem Bestockungsgrad von 0,9 wurde ein LAI von 4,57 abgeleitet.

Auf der gegenüberliegenden Hangseite befindet sich ein westexponierter Fichtenbestand (Alter: 139, Bestockungsgrad: 0,7, abgeleiteter LAI: 5,85). Die hier anstehende Braunerde

aus lössarmem, grusführendem Sand (Hauptlage) über Schuttsand (Basislage) mit Sandstein (Buntsandstein) kann im obersten Meter 105 mm pflanzenverfügbares Wasser speichern.

Alle Angaben zu den Beständen beziehen sich auf das Aufnahmejahr 2000.

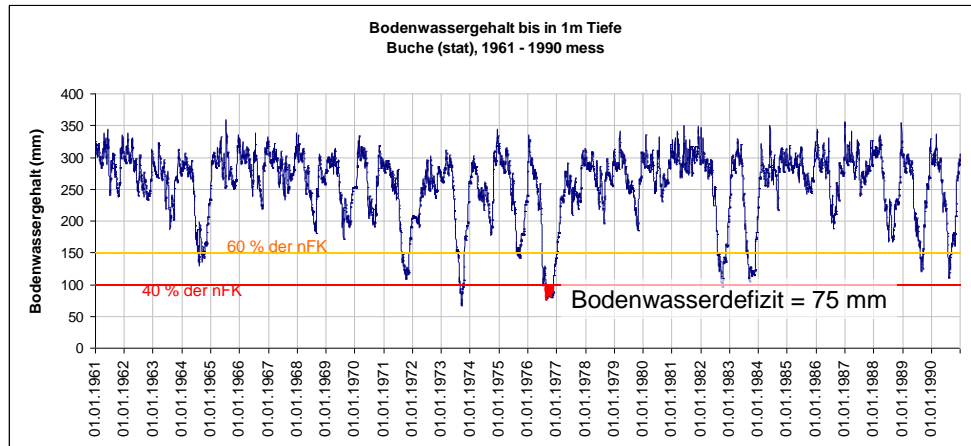


Abb. 7: Bodenwassergehalt des Buchenstandortes [in mm/m] im Zeitraum 1961-1990. Angaben der Grenzen von 60 % bzw. 40 % der nFK.

Nach GRANIER et al. (1999) sowie ANDERS et al. (2002) hat eine Unterschreitung des Bodenwassergehaltes unter die Grenze von 40 % der nFK die Reduktion der Transpiration zur Folge. Dies führt bei vielen Baumarten zu einer Beeinträchtigung des Wachstums und kann je nach Dauer und Intensität der Unterschreitung auch physiologische Schädigungen der Bäume verursachen. In den Studien wurden nicht alle Baumarten untersucht. Dennoch soll 40 % der nFK hier als kritischer Grenzwert für potenziell auftretenden Trockenstress Anwendung finden.

Auf dem sehr gut wasserversorgten Buchenstandort im Elsterbachgebiet fiel der Bodenwassergehalt im Betrachtungszeitraum nur in drei Jahren unter den Grenzwert. Das höchste Defizit an pflanzenverfügbarem Bodenwasser, das sich als Integral des Bodenwassergehaltes und der 40 %-Grenze ergibt, trat im Extremjahr 1976 auf und betrug 75 mm.

Demgegenüber steht der räumlich nicht weit entfernte, aber trotzdem weniger gut wasserversorgte Fichtenstandort. Hier wird die kritische Grenze in 10 von 30 Jahren unterschritten. Das Defizit im Trockenjahr 1976 lag mit 125 mm deutlich höher als auf dem Buchenstandort.

Unterschreitungen des kritischen Grenzwertes wurden auch für mögliche zukünftige Klimabedingungen bilanziert. Dabei wurde die Höhe des Defizits an pflanzenverfügbarem Bodenwasser und die Anzahl von Tagen mit Trockenstress (= Trockentage) pro Jahr berechnet.

Wie aus Tab. 2 hervorgeht, ist für den Zeitraum 2071 – 2100 eine Erhöhung des Bodenwasserdefizits auf beiden Standorten bei allen betrachteten waldbaulichen Szenarien im Vergleich zum Zeitraum 1961 – 1990 zu erwarten. Gleiches gilt für die Anzahl von

Trockentagen. Bei der trockenen Variante von WettReg A1B treten jeweils höhere und auch über längere Zeit anhalten Defizite auf als bei der feuchten Variante. Auf dem Buchenstandort werden für das waldbauliche Szenario „ohne Nutzung“ die höchsten und am längsten andauernden Defizite ermittelt, während auf dem Fichtenstandort bei der Variante „Buche statt Fichte“ das höchste Trockenstressrisiko auftritt.

Tab. 2: Defizit an pflanzenverfügbarem Bodenwasser (bezogen auf 40 % der nFK) und Anzahl von Tagen mit Auftreten von Bodenwasserdefizit (Trockentage) auf einem Buchen- und einem Fichtenstandort im Elsterbachgebiet. Waldbauszenarien: Status quo $\hat{=}$ Waldbild aus dem Jahr 2000; Baumartenwechsel $\hat{=}$ Buche statt Fichte bzw. Fichte statt Buche; Ohne Nutzung $\hat{=}$ keine forstlichen Eingriffe.

Waldbauszenario	Klima	Standort Buche		Standort Fichte	
		Defizit [mm] MW \pm STABW	Trockentage [n/a] MW \pm STABW	Defizit [mm] MW \pm STABW	Trockentage [n/a] MW \pm STABW
Referenz 1961-1990	Messdaten	4 \pm 16	4 \pm 14	24 \pm 38	19 \pm 3
Status quo 2071-2100	A1B feucht	12 \pm 24	10 \pm 21	39 \pm 31	34 \pm 33
	A1B trocken	44 \pm 35	38 \pm 30	67 \pm 32	67 \pm 34
Baumartenwechsel (Bu \rightarrow Fi; Fi \rightarrow Bu) 2071-2100	A1B feucht	10 \pm 17	10 \pm 20	68 \pm 43	48 \pm 37
	A1B trocken	37 \pm 29	38 \pm 30	98 \pm 33	81 \pm 30
Ohne Nutzung 2071-2100	A1B feucht	22 \pm 35	18 \pm 28	41 \pm 34	34 \pm 34
	A1B trocken	57 \pm 39	50 \pm 35	68 \pm 33	68 \pm 34

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Dynamik der Waldentwicklung kann einen großen Einfluss auf den Wasserhaushalt von Wäldern haben. Je nach Fragestellung sollte daher bei der Modellierung des Wasserhaushalts von Wäldern geprüft werden, ob dieser Einfluss zu berücksichtigen ist. Dabei spielen das Alter der Bestände sowie die Art der forstlichen Behandlung eine Schlüsselrolle. Besonders für die Kalibrierung sollte bei längeren Zeiträumen auf die Berücksichtigung der Vegetationsdynamik geachtet werden, um eine gute Anpassung des Modells zu gewährleisten.

Der Effekt forstlicher Behandlung auf den Wasserhaushalt ist demnach quantifizierbar. Er ist jedoch nicht groß genug, um Effekte, die durch den Klimawandel hervorgerufen werden, vollständig zu kompensieren. Die durch den Klimawandel verursachte Temperaturerhöhung bewirkt vor allem eine Erhöhung der Verdunstung. Bei gleichzeitig verringerten

sommerlichen Niederschlägen führt das zu einer Erhöhung der Trockenstressgefährdung der Wälder.

Abschließend muss erwähnt werden, dass die Modellergebnisse nicht die Anpassung der Bäume an die Klimaverhältnisse enthalten. Ein eingeschränktes Bodenwasserdargebot führt im Modell nicht zu einer Reduktion des Baumwachstums. Erst durch die Kopplung von Wasserhaushalt- und Waldwachstumsmodell kann das Baumwachstum klimasensitiv nachgebildet werden (SUTMÖLLER et al. 2011).

5 LITERATUR

- 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.
- GRANIER, A.; BRÉDA, N.; BIRON, P.; VILLETTE, S. (1999): A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecol. Modelling* 116, 269-283.
- RENGER, M.; BOHNE, M.; FACKLAM, M.; HARRACH, T.; RIEK, W.; SCHÄFER, W.; WESSOLEK, G.; ZACHARIAS, S. (2009): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. – In: Wessolek, G.; Kaupenjohann, M.; Renger, M. (Hrsg.) (2009): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. *Bodenökol. Bodengenese* 40, 5-51, (Selbstverlag) TU Berlin.
- RIBES (2012): Richtlinie für die Bewirtschaftung des hessischen Staatswaldes. Hess. Minist. Umwelt, Energie, Landwirtsch., Verbrauchersch., 28 S.
- SCHELER, B.; EICHHORN, J. (2005): Forsthydrologische Forschung im Wandel: Das forsthydrologische Forschungsgebiet Reinhardswald. *AFZ/Wald* 21, 1124-1126.
- SCHULLA, J. (2012): Model Description WaSiM (Water balance Simulation Model). http://www.wasim.ch/products/wasim_description.htm (Stand 14.11.2012).

- SPEKAT, A.; ENKE, W.; KREIENKAMP, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2; FuE-Vorhaben Förderkennzeichen 204 41 138, Publikationen Umweltbundesamt.
- SUTMÖLLER, J.; HENTSCHEL, S.; HANSEN, J.; MEESENBURG, H. (2011): Coupled forest growth-hydrology modelling as an instrument for the assessment of effects of forest management on hydrology in forested catchments. *Adv. Geosci.* 27, 149-154.
- WEBER, K. (1992): Stoffaustrag aus einem bewaldeten Einzugsgebiet im mittleren Buntsandstein Nordhessens. Institut Geographie Georg-August-Univ. Göttingen. Diplomarbeit, unveröff.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des Projektes (Förderkennzeichen 01LR0809B).