

Auswirkungen forstlicher Maßnahmen auf den Wasserhaushalt

Effects of forest management on hydrology

Johannes Suttmöller und Henning Meesenburg

Zusammenfassung

Um die Auswirkungen forstlicher Maßnahmen auf den Wasserhaushalt zu untersuchen, wird in dem Projekt SILVAQUA ein gekoppeltes Modellsystem bestehend aus dem Softwaresystem *WaldPlaner* zur Waldwachstumssimulation und dem Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH angewendet. Die Bestandesentwicklung wird unter der Annahme unterschiedlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen mit Hilfe des Waldwachstumsmodells simuliert. Ausgewählte Parameter der Waldwachstumssimulation werden an das Wasserhaushaltsmodell übergeben, um die Wasserflüsse unter den veränderten Randbedingungen im Waldaufbau zu modellieren. Die Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulation erlauben, die Auswirkungen forstlicher Maßnahmen wie Nutzungseingriffe, Waldumbaumaßnahmen und Baumartenwechsel auf den Gebietswasserhaushalt zeitlich und räumlich differenziert zu quantifizieren.

Die Szenariensimulationen für das Untersuchungsgebiet der Oker „Teilbereich Nordharz“ zeigen, dass forstliche Maßnahmen zu mehr oder weniger starken Veränderungen im Wasserhaushalt führen können. Im Kontext der EG-WRRL werden waldbauliche Bewirtschaftungskonzepte empfohlen, die durch ihre mode-

raten Eingriffe in die Bestandesstruktur keine übermäßig starken Veränderungen im Wasserhaushalt erwarten lassen.

Stichworte: Wasserhaushalt, EG-Wasserrahmenrichtlinie, WaSiM-ETH

Abstract

In the project SILVAQUA the effect of forestry practices on the water budget was investigated using an interactive systems model, which comprised the forest growth simulation model developed from the program *WaldPlaner* (Forest Planner) and the spatially-differentiated hydrological model WaSiM-ETH. Stand development was simulated with the forest growth model assuming different silvicultural regimes. Selected parameters derived from forest growth simulations were entered into the hydrological model to simulate water fluxes in relation to different conditions of forest structure. The results of the hydrological simulation permitted the effects of forestry practices, such as thinning and harvesting operations, changes in forest structure and tree species composition, on the catchment water budget to be quantified temporally and spatially.

The simulation of scenarios for the Oker Catchment research area, northern Harz Mountains, showed that forestry practices can cause major changes in the water budget in some cases. Under consideration of the European Water Framework Directive, silvicultural prescriptions involving moderate management practices that are not expected to cause considerable change in the water regime were recommended.

Keywords: water budget, European Water Framework Directive, WaSiM-ETH

1 Einleitung

Veränderungen des Waldaufbaus und der Waldnutzung können sich auf den Zustand der Gewässer im Wald auswirken, indem sie die Menge und Dynamik des Abflusses beeinflussen. So kann durch einen Baumartenwechsel oder durch Walderschließungsmaßnahmen die ausgleichende Wirkung der Wälder auf die Abflussdynamik nachhaltig verändert werden. Eine Verschärfung von Hochwasserereignissen oder eine Verminderung der Grundwasserneubildung können die Folge davon sein.

Mit der im Jahr 2000 in Kraft getretenen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) der Europäischen Union wurde ein Handlungsrahmen geschaffen, der erstmalig einen auf das Flusseinzugsgebiet bezogenen Ansatz verfolgt (EUROPÄISCHES PARLAMENT UND EUROPÄISCHER RAT 2000). In Artikel 1 der EG-WRRL wird der „gute“ ökologische Zustand der Gewässer als Zielsetzung gefordert. Für die quantitative Betrachtung der Gewässer bedeutet dies, dass Extremereignisse, wie

Hochwasser und Trockenperioden, in ihren Auswirkungen vermindert werden sollen. Forstliche Maßnahmen, die in den bewaldeten Bereichen des Okereinzugsgebietes durchgeführt werden, sind vor diesem Hintergrund insbesondere dahingehend zu untersuchen, ob sie eine Verschlechterung in der Abflussdynamik und Grundwasserneubildung zur Folge haben („Verschlechterungsverbot“).

Der Untersuchungsansatz erfordert den Aufbau eines hydrologischen Einzugsgebietsmodells, um den Wasserhaushalt flächendifferenziert nachbilden zu können. Da Informationen auf sehr unterschiedlichen Skalenebenen vorliegen, muss das Modell in der Lage sein, die Daten skalenunabhängig zu verarbeiten. Grundlage der Modellierung bilden Flächendatensätze der Forst- und Umweltverwaltung (JANSEN et al., in diesem Band).

Neben der Erfassung des aktuellen hydrologischen Prozessgeschehens ist für die Entwicklung von Managementstrategien die Beurteilung langfristiger Veränderungen des Wasserhaushaltes durch forstliche Maßnahmen von Bedeutung. Hierzu wird die Entwicklung der Bestände unter Annahme vier unterschiedlicher forstlicher Bewirtschaftungsstrategien mit Hilfe eines Waldwachstumsmodells simuliert (s. HENTSCHEL, in diesem Band). Die Ergebnisse der forstlichen Szenarien werden dem Wasserhaushaltsmodell zur Verfügung gestellt, um die Wasserflüsse im Untersuchungsgebiet unter den veränderten Randbedingungen im Waldaufbau zu modellieren. Durch diese Vorgehensweise können Veränderungen im Wasserhaushalt (z. B. erhöhte Grundwasserneubildungsraten etc.) quantifiziert und flächendifferenziert zugeordnet werden.

Die Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulation für verschiedene forstliche Szenarien im Okereinzugsgebiet des Nordharzes werden vorgestellt. Aus dem Vergleich der simulierten Wasserhaushaltsbilanzen bei unterschiedlichen forstwirtschaftlichen Behandlungsstrategien, werden waldbauliche Empfehlungen abgeleitet, die den nachhaltigen guten Zustand der Gewässer unter wasserwirtschaftlichen Gesichtspunkten gewährleisten.

2 Wasserhaushaltssimulation

2.1 Datengrundlage und Datenaufbereitung

Der Datenbedarf ergibt sich aus den Erfordernissen des hydrologischen Modells und der Genauigkeit, mit der das Untersuchungsgebiet im Modell abgebildet werden soll (Modelldiskretisierung). Die Daten werden benötigt, um die Gebietscharakteristik im Modell zu repräsentieren, und um die Modellkalibrierung und -validierung unter realen zeitabhängigen meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen zu gewährleisten.

Für die Modellierung der Wasserflüsse werden flächenbezogene Geodaten zur Orographie, Landnutzung und zum Boden benötigt. Die Geodatenbasis setzt sich folgendermaßen zusammen:

- digitales Höhenmodell
- Forsteinrichtungskarten
- forstliche Standortkartierung

Im Einzugsgebiet der Oker „Teilbereich Nordharz“ können zwei Teileinzugsgebiete ausgewiesen werden, beide wurden für die Kalibrierung des hydrologischen Modells herangezogen. Für die Pegel der Kalbe und den Radau liegen die Messwerte als Tagesmittelabfluss vor. Der Zeitraum von 1996 bis einschließlich 2005 diente zur Kalibrierung des Wasserhaushaltsmodells. Als meteorologischer Antrieb werden Angaben zum Niederschlag und Wind, zur Temperatur, Sonnenscheindauer oder Globalstrahlung und relativen Feuchte benötigt. Die meteorologischen Antriebsdaten stammen von Niederschlags- und Klimastationen des DWD. Die Klimazeitreihen fließen als Tagesmittelwerte bzw. als Tagessumme in das hydrologische Modell ein. Die Parametrisierung der Waldflächen erfolgte auf der Grundlage der Forsteinrichtung aus dem Jahr 2003. Die forstliche Standortkartierung wurde vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) aufbereitet und für die Parametrisierung der Bodeneigenschaften verwendet. Die Mächtigkeit der Leitprofile beträgt für alle forstlichen Standortsflächen 2 m. Die Flächen der Forsteinrichtung und der forstlichen Standortkartierung wurden unter Vorgabe des dominanten Flächentyps auf das 100 x 100 m-Modellgitter übertragen. Kleine Flächeneinheiten mit einer Größe von deutlich weniger als einem Hektar werden durch diese Vorgehensweise im hydrologischen Modell nicht berücksichtigt.

2.2 Modellauswahl und Modellbeschreibung

Mit Hilfe eines gebietsdifferenzierten hydrologischen Einzugsgebietsmodells werden die komplexen Prozesse des Wasserhaushaltes abgebildet. Das Wasserhaushalts-Simulations-Modell WaSiM-ETH erwies sich dabei als am besten geeignet, um die Projektziele zu erreichen. Es wird die Modellversion 7.2.7 verwendet, die im Vergleich zu älteren Versionen als wesentliche Erweiterung die Abbildung mehrschichtiger Vegetationsbestände erlaubt (SCHULLA 1997).

Es ist als Open-Source-Modell frei zugänglich und hat eine relativ große Nutzergemeinde, von der sich viele Anwender an der Weiterentwicklung des Modells beteiligen. WaSiM-ETH ist in verschiedenen Einzugsgebieten von der Mikro- (< 1 km²) bis zur Mesoskala (\pm 10.000 km²) bereits erfolgreich getestet und angewendet worden (ETH ZÜRICH 2005). Durch die modulare Struktur und das GIS-basierte Einleseformat der Geodatenbasis werden eine einfache Handhabung und die Verknüpfbarkeit mit anderen Modellen gewährleistet. WaSiM-ETH weist zahlreiche Modellbausteine wie Module für Schneeschmelze und -akkumulation, Grundwasser und Abflussrouting auf, die bei Bedarf aktiviert werden können. Die

räumliche und zeitliche Auflösung der Eingabe- und Ausgabeparameter ist frei wählbar.

Im Hinblick auf Prognosezwecke ist es wünschenswert, ein Simulationsmodell zu verwenden, das das hydrologische Prozessgeschehen flächendifferenziert und möglichst physikalisch basiert nachbildet. Das rasterbasierte Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH erfüllt diese Anforderungen. Insbesondere die Verwendung der Richards-Gleichung zur Simulation der Bodenwasserflüsse in der ungesättigten Bodenzone ermöglicht eine wesentlich bessere Anpassung der Modellierung, als dies bei konzeptionell ausgerichteten Modellen möglich wäre.

Die einzelnen Modellbausteine können dem Ablaufschema aus Abbildung 1 entnommen werden. Der Simulation vorgeschaltet ist eine windabhängige Korrektur der Stationsniederschläge (RICHTER 1995). Der meteorologische Antrieb der Klimastationen wird mit Hilfe verschiedener Verfahren (Inverse Distance Weighting (IDW), höhenabhängige Regression), die vom Anwender ausgewählt und kombiniert werden können, auf das Flächenraster des Modells interpoliert. Weiterhin besteht die Möglichkeit einer topographiebedingten Strahlungskorrektur und Temperaturmodifikation. Eine detaillierte Modellbeschreibung ist bei SCHULLA (1997) zu finden.

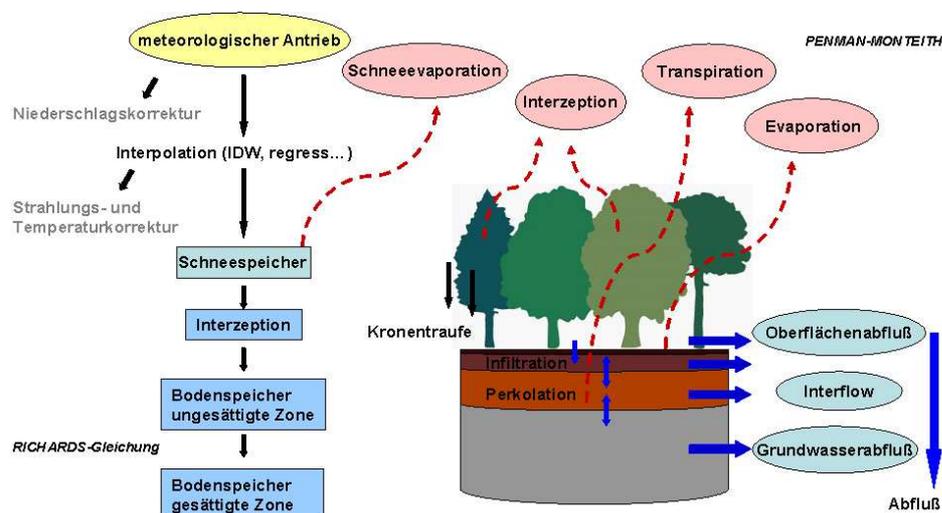


Abbildung 1: Modellschema WaSiM-ETH (verändert nach SCHULLA 1997)

Die Evapotranspiration beschreibt die Verdunstungsprozesse der Transpiration, Interzeption und Evaporation. Die Interzeption wird von WaSiM-ETH über einen einfachen Speicheransatz ermittelt. Die potenzielle Evapotranspiration wird nach der Methode von Penman-Monteith berechnet. Vegetationsspezifische Parameter wie LAI, Überschirmungsgrad und Bestandeshöhe, die für die Berechnung der

Verdunstungsprozesse benötigt werden, werden über die Simulation des Bestandeswachstums mit dem *WaldPlaner* (HANSEN 2006, ALBERT u. HANSEN 2007) abgeleitet.

Die Verknüpfung zwischen *WaldPlaner* und hydrologischem Modell erfolgt „offline“. Die Ergebnisse der Waldwachstumssimulation werden in einer Datenbank gespeichert, die als Schnittstelle zum hydrologischen Modell dient. Anhand des Brusthöhendurchmessers (BHD) und der Stammzahl wird die langfristige Veränderung des Blattflächenindex (LAI = leaf area index) auf der Basis der Einzelbaumdaten baumartenabhängig berechnet (HAMMEL u. KENNEL 2001). Durch Laub- bzw. Nadelabwurf entstehen jahreszeitliche Schwankungen im Bestandes-LAI. Der LAI für einen Nadelwaldbestand beträgt im Winter in Anlehnung an HAMMEL u. KENNEL (2001) 80 % des maximalen LAI. Für einen Laubwaldbestand entspricht der LAI während der Vegetationsruhe dem Stammflächenindex (SAI). Die Vegetationsperiode wird über ein Temperatursummenmodell bestimmt (HAMMEL u. KENNEL 2001). Eine weitere wichtige Größe zur Parametrisierung der Landnutzung im Wasserhaushaltsmodell stellt der Bedeckungsgrad (Überschirmung) dar. Dieser wird direkt im *WaldPlaner* berechnet und an das hydrologische Modell übergeben.

Bei einem Bedeckungsgrad von weniger als 0,85 wird die Annahme getroffen, dass sich in den Bestandeslücken eine Gras- und Strauchvegetation entwickelt. Tritt dies auf, werden die Vegetationsparameter der Grasvegetation und der Bestände flächengewichtet zu einem mittleren Bestandesparametersatz zusammengefügt. Da die Auswirkungen einer Sekundärvegetation auf den Wasserhaushalt nicht explizit in dieser Modellanwendung untersucht werden sollen, wurde auf die Modellierung mit mehrschichtigen Vegetationsbeständen verzichtet.

Die Durchwurzelungstiefe wurde den einzelnen Beständen altersabhängig zugewiesen. Bestände mit einem mittleren Alter bis 15 Jahren erhielten eine Durchwurzelungstiefe von 1 m, ältere Bestände eine von 1,4 m. Zwischen den Baumarten wurde keine Differenzierung bezüglich der maximalen Durchwurzelungstiefe vorgenommen. Bei den Laubbaumarten wurde jedoch eine gleichmäßige Wurzelverteilung über den gesamten durchwurzelten Raum angenommen, bei den Nadelbäumen hingegen eine Konzentration auf die oberen Bodenschichten.

Die Modellierung der Wasserbewegung im Boden ist primär von den bodenphysikalischen Eigenschaften des Substrates abhängig. WaSiM-ETH berechnet die Wasserflüsse in der ungesättigten Bodenzone auf der Grundlage der Richards-Gleichung in eindimensionaler vertikaler Form (SCHULLA 1997). Die Parametrisierung der verwendeten pF-Kurven erfolgt nach VAN GENUCHTEN (1980). Die physikalischen Eigenschaften von Waldböden unterscheiden sich jedoch deutlich von Ackerböden. Deshalb erfolgt in dieser Arbeit die Ableitung der van Genuchten-Parameter in Anlehnung an TEEPE et al. (2003). Die Untersuchungen dieser Arbeit haben gezeigt, dass die Unterschiede zwischen den 31 Texturklassen nach

der ARBEITSGRUPPE BODEN (1994) häufig sehr gering sind. Mit Hilfe einer Clusteranalyse konnten die Texturklassen der Kartieranleitung auf 10 Texturklassen mit jeweils 5 Dichteklassen reduziert werden. Für diese wurden anhand von 1.850 an Waldböden ermittelten Wasserretentionskurven die van Genuchten-Parameter berechnet.

2.3 Modellkalibrierung

WaSiM-ETH berechnet die Wasserumsätze auf einem Modellgitter mit quadratischen Zellen und simuliert die Abflussganglinie im Gewässer mit Hilfe eines Routingschemas. Die Einzugsgebiete der Kalbe und Radau wurden mit einer räumlichen Auflösung (Modellgitterweite) von 100 m modelliert. Das Einzugsgebiet der Kalbe wird mit 505 Modellzellen abgedeckt, das deutlich größere Einzugsgebiet der Radau umfasst 1.788 Modellzellen. Die Forsteinrichtungsdaten weisen im Einzugsgebiet der Oker „Teilbereich Nordharz“ eine Waldfläche von 15.359 ha aus. Diese wird im hydrologischen Modell durch 15.976 Modellzellen abgebildet. Das Modellgebiet umfasst neben den Waldflächen auch so genannte Nicht-Holzbodenflächen, wie Blößen oder Wirtschaftswege, die bei der Bestandessimulation unberücksichtigt bleiben. Dies erklärt die höhere Anzahl an Modellzellen (1 Modellzelle entspricht 1 ha) gegenüber der Forsteinrichtungsfläche.

Die Wasserbilanz der Klimanormalperiode (1961 - 1990) kann aus den simulierten Abflüssen und den gemessenen und in die Fläche interpolierten Niederschlägen berechnet werden. Daraus ergibt sich für die bewaldeten Flächen im Okereinzugsgebiet „Teilbereich Nordharz“ eine mittlere Abflusshöhe von 650 mm und eine Niederschlagssumme von 1.270 mm. Damit verbleiben 620 mm als mittlere Verdunstungsleistung übrig. Die Untersuchungen im Einzugsgebiet der „Langen Bramke“ haben gezeigt, dass die Niederschlagshöhe unterschätzt wird. Vor diesem Hintergrund wurden die Niederschläge in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit einer „konservativen“ Korrektur unterzogen (Niederschlagskorrektur < 10 %).

In der hydrologischen Modellierung nimmt die Modellkalibrierung einen hohen Stellenwert ein. Sie ist bei komplexen, hochgradig nichtlinearen Modellen kein triviales Problem, da eine Vielzahl von Parametern nicht eindeutig aus den Gebietseigenschaften abgeleitet werden kann. Für die vorliegende Fragestellung werden die modellierten Abflüsse mit den gemessenen Abflüssen am Pegel verglichen. Die Höhe der Abweichungen zwischen der gemessenen und simulierten Ganglinie bestimmt ein Gütemaß. Gütemaße, wie das Bestimmtheitsmaß R^2 oder die Erklärte Varianz EV, geben die Qualität einer Simulation in einer abstrakten Zahl an. Je höher die Differenzen sind, desto größer weicht das Gütemaß vom optimalen Wert ab.

Die Modellkalibrierung für die Einzugsgebiete der Kalbe und Radau erfolgt auf Grundlage der Jahre 1996 bis 2005. In Abbildung 2 ist die gemessene und simu-

lierte Abflussganglinie am Pegel Kalbe dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß und die Erklärte Varianz liegt im zehnjährigen Mittel jeweils bei 0,70. Die Gütemaße schwanken zwischen 0,47 R^2 /0,43 EV (1996) und 0,85 R^2 /0,84 EV (1999). Zur Anpassung der simulierten Abflussganglinie an die gemessenen Tagesmittelabflüsse wurden die effektiven Kalibrierparameter k_{rec} und d_r verwendet. Der Parameter k_{rec} beschreibt die Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit mit der Tiefe, mit Hilfe des Parameters d_r wird der Anteil des Interflows am Gesamtabfluss skaliert. Da zu den übrigen effektiven Kalibrierparametern keine Vergleichsgrößen aus den Einzugsgebieten der Kalbe und Radau vorliegen, wurden für diese Parameter Einstellungen aus einer Modellanpassung für das Einzugsgebiet der „Langen Bramke“ übernommen (SUTTMÖLLER et al. 2007).

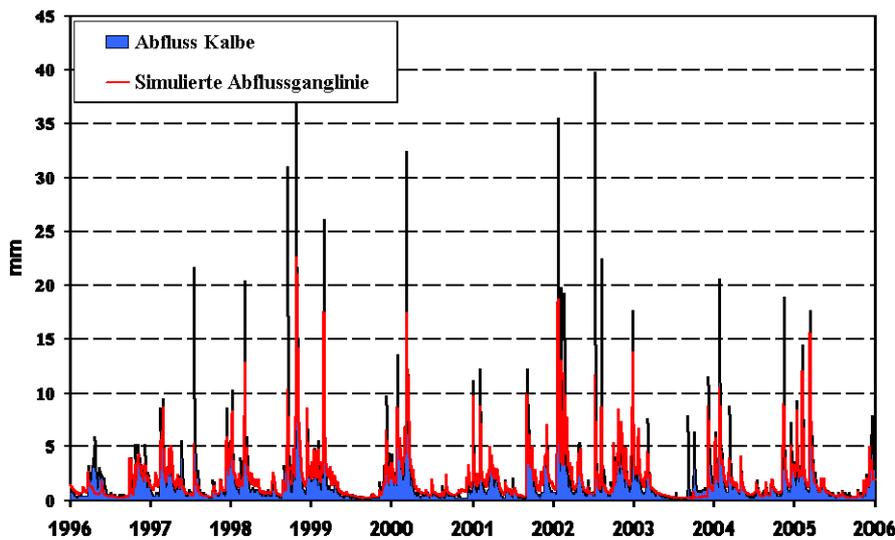


Abbildung 2: Gemessene und simulierte Abflussganglinie am Pegel Kalbe

Die Abflussdynamik im Einzugsgebiet der Kalbe wird durch die Modellsimulation gut erfasst. Typisch für die bewaldeten Einzugsgebiete im Okergebiet ist, dass stärkere Niederschlagsereignisse zunächst vollständig vom Boden aufgenommen werden und erst stark verzögert in den Vorfluter gelangen. Der Vergleich gemessener Niederschlags- und Abflusswerte zeigt, dass erst mit einer zeitlichen Verzögerung von 1 bis Tagen 2 eine Zunahme der Abflusshöhe am Pegel beobachtet werden kann. Erst bei intensiven und länger andauernden Niederschlägen oder bei einsetzender Schneeschmelze wird Oberflächenabfluss generiert, der direkt und ohne Zeitverzögerung zum Abfluss gelangt. Daraus resultieren die typisch steil ansteigenden Abflussspitzen und der ebenso schnelle Rückgang der Abflusshöhe auf das Basisabflussniveau. Die Simulationsgüte wird dadurch vermindert, dass die absolute Höhe einzelner Hochwasserereignisse vom Modell unterschätzt wird und der Rückgang auf das Basisabflussniveau etwas zu träge abgebildet wird.

Die mittlere Jahresniederschlagssumme für den Zeitraum von 1996 - 2005 beträgt im Einzugsgebiet der Kalbe 1.251 mm. Nahezu 52 % der Niederschläge gelangen in den Abfluss (gemessener Abfluss Pegel Kalbe: 647 mm). Der mittlere simulierte Abflussanteil liegt mit 651 mm ebenfalls bei rund 52 %. Rund 600 mm werden im Mittel über die Evapotranspiration aus dem Gebiet der Kalbe abgegeben, wobei zwei Drittel (400 mm) durch die Transpiration und ein Drittel (200 mm) über die Interzeption verdunstet werden.

Das Einzugsgebiet der Radau weist eine nahezu identische simulierte Wasserbilanz auf wie das Einzugsgebiet der Kalbe. Der berechnete Abflusskoeffizient liegt bei rund 0,53; bei einer mittleren Niederschlagssumme von 1.242 mm werden 657 mm als Abfluss simuliert. Auffällig ist, dass der am Pegel gemessene Abfluss mit 581 mm (Abflusskoeffizient: 0,48) deutlich unter den Werten der Kalbe liegt. Dies deutet daraufhin, dass am Pegel nicht alle im Gebiet generierten Abflüsse erfasst werden. Mögliche Ursachen können unterirdische Abflüsse in Form von Tiefensickerung oder die Umleitung eines Teils der Abflussmenge oberhalb des Pegels sein (Oker-Grane-Stollen). Trotzdem liegen das mittlere Bestimmtheitsmaß bei 0,70 und die Erklärte Varianz bei 0,71. Innerhalb des 10-jährigen Simulationszeitraumes treten im Vergleich zur Kalbe jedoch deutlich größere Unterschiede in der Modellgüte auf.

Die Modellkalibrierung mit WaSiM-ETH liefert plausible Ergebnisse. Das hydrologische Prozessgeschehen wird gut erfasst, so dass die Auswirkungen möglicher forstlicher Nutzungen und Bewirtschaftungsstrategien mit den langfristigen Folgen auf den Wasserhaushalt flächendifferenziert quantifiziert werden können.

3 Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulationen

3.1 Auswirkungen der Bewirtschaftungsstrategien auf den Wasserhaushalt

Auf der Grundlage der Modellkalibrierung in den Teileinzugsgebieten Kalbe und Radau wurde der Wasserhaushalt im Okereinzugsgebiet „Teilbereich Nordharz“ für vier Waldentwicklungsszenarien bis zum Jahr 2055 simuliert. Ausgehend vom Status quo im Jahr 2003 (Forsteinrichtung) wurde die Waldentwicklung unter der Annahme verschiedener Waldbauszenarien fortgeschrieben. Eine detaillierte Beschreibung der Waldentwicklungsszenarien „ertragsorientierter“ Waldbau (ERTRAG), „naturnaher“ Waldbau nach LÖWE (LÖWE), Waldbau unter Berücksichtigung der potenziell natürlichen Vegetation (PNV) und „naturschutzorientierter“ Waldbau (PROZESS) erfolgt bei HENTSCHEL (in diesem Band). Die untersuchten Waldbaukonzepte sollen exemplarisch einen Eindruck über die Variationsbreite möglicher forstlicher Strategien vermitteln.

Die zukünftige Waldentwicklung wurde bis zum Jahr 2053 mit dem waldwachstumskundlichen Modell *WaldPlaner* (HANSEN 2006, ALBERT u. HANSEN

2007) berechnet. Die Einzelbaumattribute der Modellbestände, wie z. B. Brusthöhendurchmesser (BHD), werden in einem zeitlichen Abstand von 5 Jahren in die hinterlegte Datenbank gespeichert. Anhand der Einzelbaumdaten, die für jedes Waldentwicklungsszenario von 2008 über 2013 bis zum Jahr 2053 im gleichen Format wie die Forsteinrichtungsdaten 2003 vorliegen, werden baumartenspezifisch die langfristige Veränderung bestandesbeschreibender Parameter (wie z. B. Blattflächenindex und Bestandesdichte) abgeleitet und für die Wasserhaushaltsmodellierung bereitgestellt. Dabei ist der Waldzustand im Jahr 2008 repräsentativ für die Jahre 2006 bis 2010, der Waldzustand im Jahr 2013 für die Jahre 2011 bis 2015 usw. Dies bedeutet, dass die Parametrisierung der Waldbestände im hydrologischen Modell für jeweils fünf Jahre unverändert bleibt.

Im Untersuchungsgebiet der Oker „Teilbereich Nordharz“ wird die Waldfläche durch 4.001 Bestände gebildet, die jeweils durch einen eigenen Parametersatz im hydrologischen Modell repräsentiert werden. Ebenso wurden die 13.884 forstlichen Standortsflächen durch einen eigenen Parametersatz zur Beschreibung der Bodeneigenschaften abgebildet. Diese wurden im Gegensatz zu den Bestandesdaten während der gesamten Simulationsperiode nicht verändert.

Der meteorologische Antrieb für den Simulationszeitraum bis zum Jahr 2055 erfolgt mit gemessenen Klimadaten der Jahre 1956 bis 2003, um die Auswirkungen forstlicher Bewirtschaftungsstrategien auf den Wasserhaushalt unter heutigen klimatischen Bedingungen zu untersuchen. Die räumliche Interpolation der Stationsdaten wird modellintern gelöst. Während die Tagessummen der Niederschläge und die Tagesmitteltemperatur über ein kombiniertes Verfahren (IDW und höhenabhängige Regression) auf das Raster des hydrologischen Modells interpoliert werden, werden die Stationsdaten zur mittleren Windgeschwindigkeit und Relativen Feuchte sowie die tägliche Sonnenscheindauer mit dem IDW-Verfahren (Inverse Distance Weighting) regionalisiert.

Zur Beurteilung der Wirkung der forstlichen Maßnahmen auf den Wasserhaushalt bietet sich ein Vergleich der jährlichen Verdunstungs- und Abflusssummen an. Zu Beginn der Simulationsperiode im Jahr 2006 starten alle Waldentwicklungsszenarien mit dem gleichen Parametersatz. Dies erklärt die relativ geringen Unterschiede in der berechneten Verdunstungsleistung und Abflussmenge in den ersten Jahren der Simulationsperiode (s. Abb. 3 u. 4). Aber bereits nach 10 bis 15 Jahren treten insbesondere zwischen den Szenarien ERTRAG und PROZESS deutliche Veränderungen in den Wasserhaushaltsgliedern auf. Aufgrund der hohen Zuwachsraten und steigenden Vorräte bei der Variante PROZESS nimmt die Verdunstung der Waldbestände deutlich zu, während bei der „ertragsorientierten“ Variante, infolge intensiv durchgeführter forstlicher Eingriffe, eine Abnahme der realen Verdunstung im Gebietsmittel zu verzeichnen ist. Dies hat zur Folge, dass durch die Auflichtung vieler Bestände im Untersuchungsgebiet besonders die Interzeption stark rückläufig ist. Höhere Verdunstungsleistungen führen bei der Variante PROZESS gegenüber dem Status quo zu einer verringerten Abfluss-

menge von knapp 50 mm bis zum Jahr 2020. Die Variante ERTRAG folgt in der berechneten Wasserbilanz zunächst dem Status quo. Die Waldentwicklungsszenarien LÖWE und PNV weisen in den ersten Jahren nur eine geringfügige Erhöhung der Verdunstung auf.

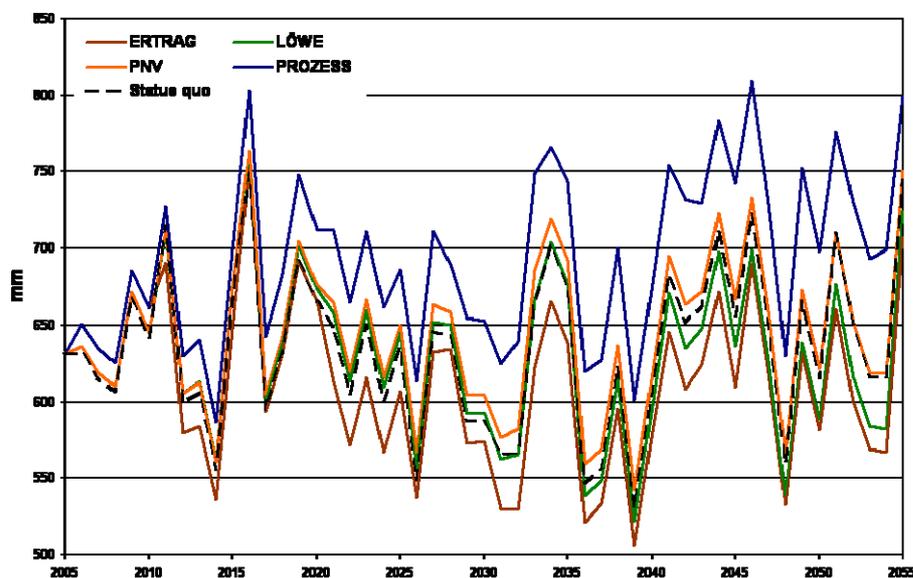


Abbildung 3: Berechnete reale Verdunstung [mm] für die Waldentwicklungsszenarien

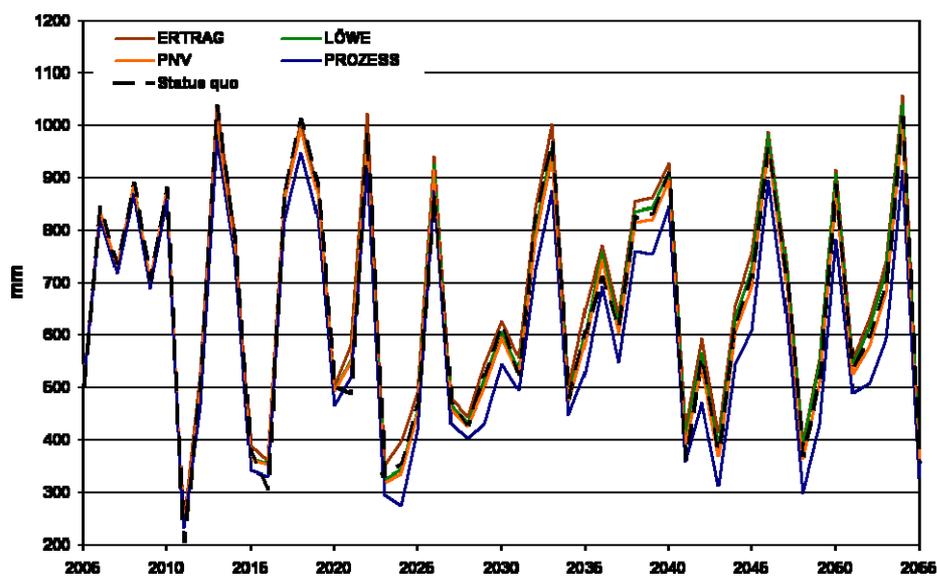


Abbildung 4: Berechneter Abfluss [mm] für die Waldentwicklungsszenarien

Bis zum Ende des Simulationszeitraumes nehmen die Unterschiede in der berechneten Verdunstungsleistung zwischen den Waldentwicklungsszenarien weiter zu. Während sich bei der Variante PROZESS die reale Verdunstung von im Mittel 650 mm zu Beginn des Simulationszeitraumes auf annähernd 750 mm erhöht, nimmt die reale Verdunstung bei der Variante ERTRAG auf rund 620 mm ab. Die moderate Abnahme der Verdunstungsmenge beim Szenario ERTRAG liegt darin begründet, dass infolge der Bestandesauflichtungen eine Bodenvegetation berücksichtigt wird. Entsprechend der veränderten Verdunstungsleistung ist mit einer Abnahme (PROZESS) bzw. Zunahme (ERTRAG) der Abflussmenge im Vergleich zum Status quo zu rechnen (s. Abb. 3 u. 4). Die Varianten LÖWE und PNV weisen bis zum Jahr 2025 kaum Unterschiede in den berechneten Wasserhaushaltskomponenten im Vergleich zum Basisszenario auf. Danach erhöht sich beim PNV-Szenario die Verdunstungsleistung leicht gegenüber dem Status quo, um gegen Ende des Simulationszeitraumes wieder auf das Niveau des Basisszenarios zurückzufallen. Bei der LÖWE-Variante wachsen viele Bestände zum Ende des Simulationszeitraumes in die Endnutzung hinein, so dass die reale Verdunstung abnimmt und sich mit im Mittel 635 mm dem Niveau der Variante ERTRAG annähert.

Die Simulationsergebnisse zu den vier Waldentwicklungsszenarien zeigen, dass unterschiedliche Nutzungsstrategien im Flächenmittel deutliche Veränderungen in den Wasserhaushaltskomponenten zur Folge haben. Bei den Varianten ERTRAG und PROZESS treten bereits frühzeitig (nach rund 20 Jahren) markante Verschiebungen zwischen der simulierten realen Verdunstung und der berechneten Abflussmenge im Vergleich zum Status quo auf, während dies bei der LÖWE-Variante erst zum Ende des Simulationszeitraumes beobachtet werden kann. Relativ geringe Unterschiede zum Basisszenario treten während des gesamten Simulationszeitraumes bei der PNV-Variante mit der Zielsetzung des Waldentwicklungstyps „Buche“ (WET20) auf.

Mit der EG-WRRL haben sich alle Vertragsstaaten verpflichtet, die Zielsetzung eines „guten Zustandes“ von Oberflächengewässern und Grundwasserkörpern spätestens im Jahr 2015 zu erfüllen. Allerdings sieht die EG-WRRL die Möglichkeit einer Fristverlängerung bis zum Jahr 2027 vor, wenn die Erreichung der Zielsetzung nicht gewährleistet werden kann.

Vor diesem Hintergrund wurden die Simulationsergebnisse der hydrologischen Modellierung für die in der EG-WRRL genannten Stichjahre flächendifferenziert ausgewertet. Um die Jahre 2015 und 2027 wurde jeweils ein Zeitfenster von fünf Jahren gelegt, um die Auswirkungen jährlicher Witterungsschwankungen bei der Auswertung der Wasserbilanzen zu vermindern. So sind die Ergebnisse für das Jahr 2015 als Mittelwert der Jahre 2013 bis 2017 zu interpretieren, die Ergebnisse für das Jahr 2027 als mittlerer Zustand der Jahre 2025 bis 2029. Um die maximal möglichen Veränderungen im Wasserhaushalt zu untersuchen, die durch den Waldumbau im Okergebiet „Teilbereich Nordharz“ hervorgerufen werden, wurde

zusätzlich der Zeitraum von 2051 bis 2055 (Stichjahr 2053) flächendifferenziert ausgewertet.

Wie bei der Auswertung der Zeitreihen liegt der Fokus auch hier auf der Untersuchung der veränderten realen Verdunstungs- und der Abflussmenge, wie sie sich aus den verschiedenen Waldentwicklungsszenarien ergeben würden. In Abbildung 5 bis 7 ist für die genannten Zeitfenster 2015, 2027 und 2053 der berechnete Abflusskoeffizient flächendifferenziert dargestellt. Es werden keine Absolutwerte betrachtet, um den witterungsspezifischen Einfluss auf den Wasserhaushalt auszuschalten. In den Abbildungen sind zusätzlich die Geometrien der Forsteinrichtung dargestellt.

Die Abfluss- und Verdunstungskoeffizienten geben den Anteil der jeweiligen Bilanzgröße am Niederschlag an. Je höher der Koeffizient ist, umso größer ist der Anteil der betrachteten Bilanzgröße am Wasserhaushalt. Hohe Abflusskoeffizienten werden im Untersuchungsgebiet auf den Flächen erzeugt, die eine überdurchschnittlich hohe Niederschlagssumme aufweisen. Da im Okergebiet „Teilbereich Nordharz“ die Niederschlagsverteilung eine eindeutige Höhenabhängigkeit zeigt, treten die höchsten Abflusskoeffizienten von über 0,7 im Südosten des Untersuchungsgebietes am Fuße des Brockens auf (s. Abb. 5). Die niedrigsten Abflussanteile von unter 0,1 sind auf den bewaldeten Flächen im Harzvorland anzutreffen. Entsprechend verdunsten hier im Mittel über 90 % der gefallenen Niederschläge. Höhere Abflusskoeffizienten werden bei geringeren Niederschlagssummen nur auf waldfreien (Blößen) bzw. sehr lichten Beständen simuliert. Diese fallen in den tieferen Lagen des Untersuchungsgebietes durch ihre hellblaue Einfärbung (Abflusskoeffizient um 0,5) auf.

Bis zum Zeitfenster 2015 verändert sich der Wasserhaushalt unter Berücksichtigung der untersuchten Waldentwicklungsszenarien unterschiedlich. Die größten Auswirkungen auf den Wasserhaushalt im Vergleich zum Status quo ruft die Variante PROZESS hervor, da ein aktiver Eingriff in die Bestände bei diesem Szenario nicht vorgesehen ist. Innerhalb von nur rund zehn Jahren nimmt der Abflusskoeffizient um fast 5 % ab. Entsprechend ist auf der Gesamtfläche mit einer höheren Verdunstungsleistung zu rechnen. Eine gegensätzliche Wirkung auf den Wasserhaushalt löst die Variante ERTRAG aus. Bis zum Zeitfenster 2015 nimmt der Abflussanteil durch Nutzungs- und Durchforstungsmaßnahmen auf den bewaldeten Flächen um rund 2,5 % zu. Die Waldentwicklungsszenarien LÖWE und PNV bewirken im Flächenmittel kurzfristig keine nennenswerten Veränderungen im Wasserhaushalt. Einzelne Bestände, in denen eine Nutzung durchgeführt wird, oder dort, wo junge Bestände einwachsen, können jedoch größere Veränderungen bei den Abfluss- und Verdunstungsmengen auftreten.

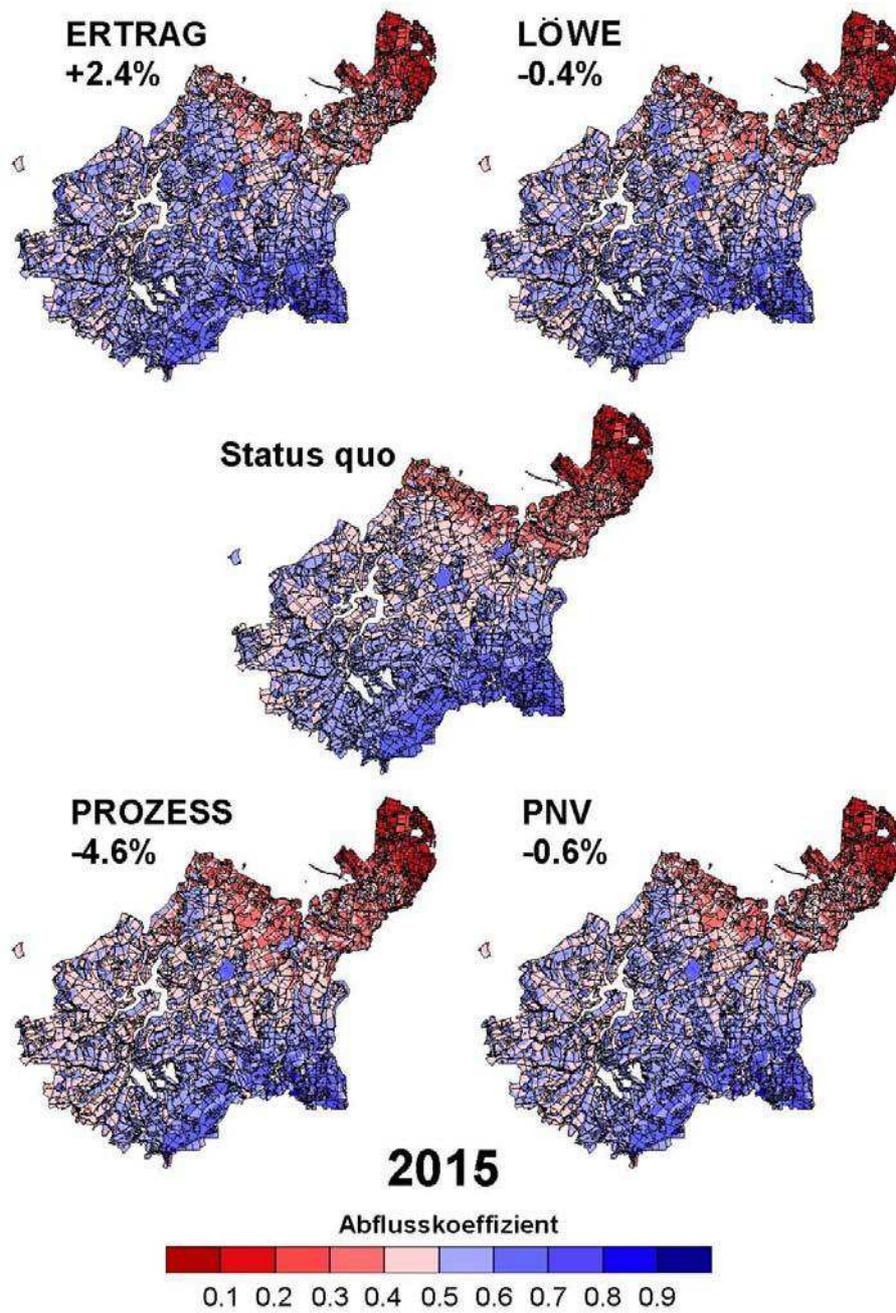


Abbildung 5: Berechnete Abflusskoeffizienten für die Waldentwicklungsszenarien im Zeitfenster 2015

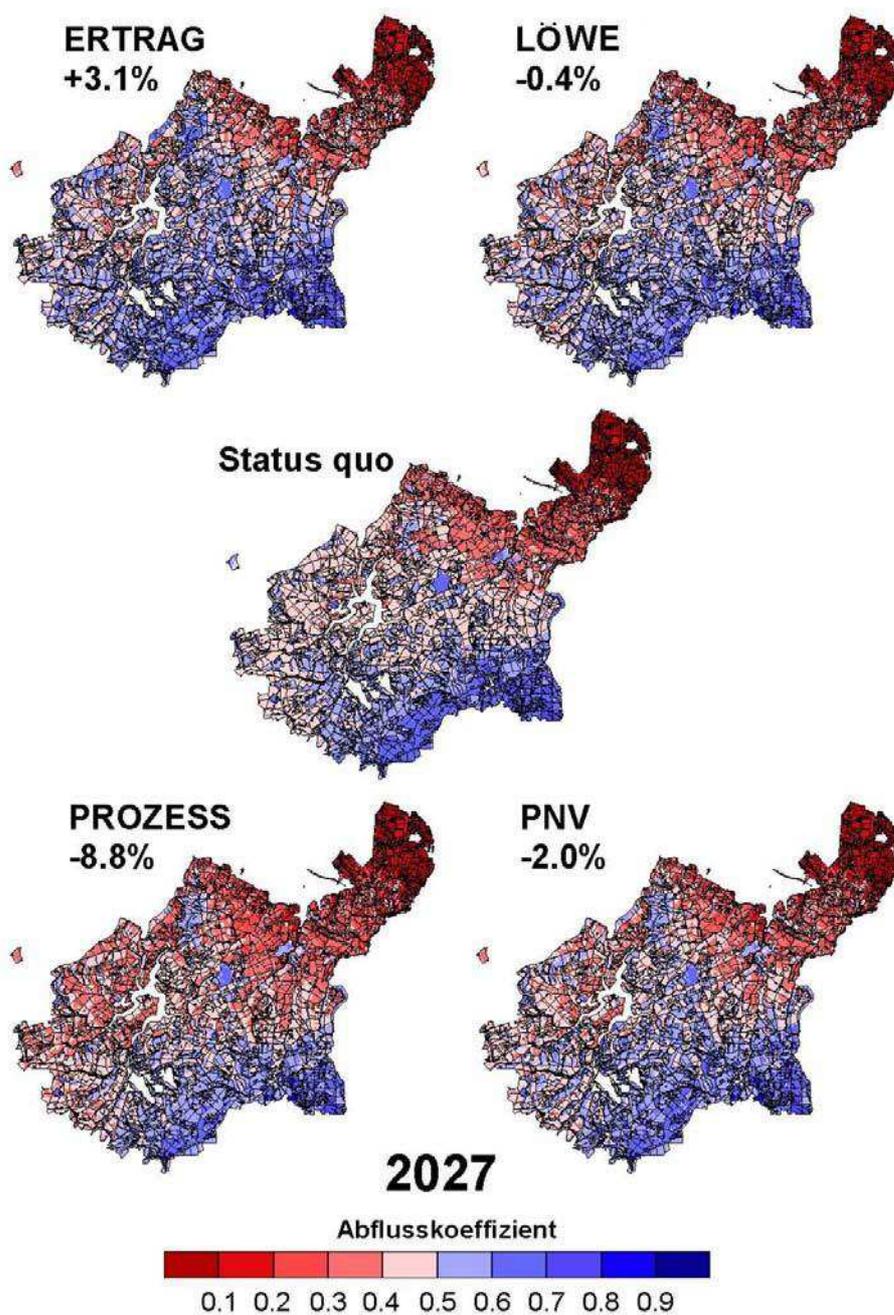


Abbildung 6: Berechnete Abflusskoeffizienten für die Waldentwicklungsszenarien im Zeitfenster 2027

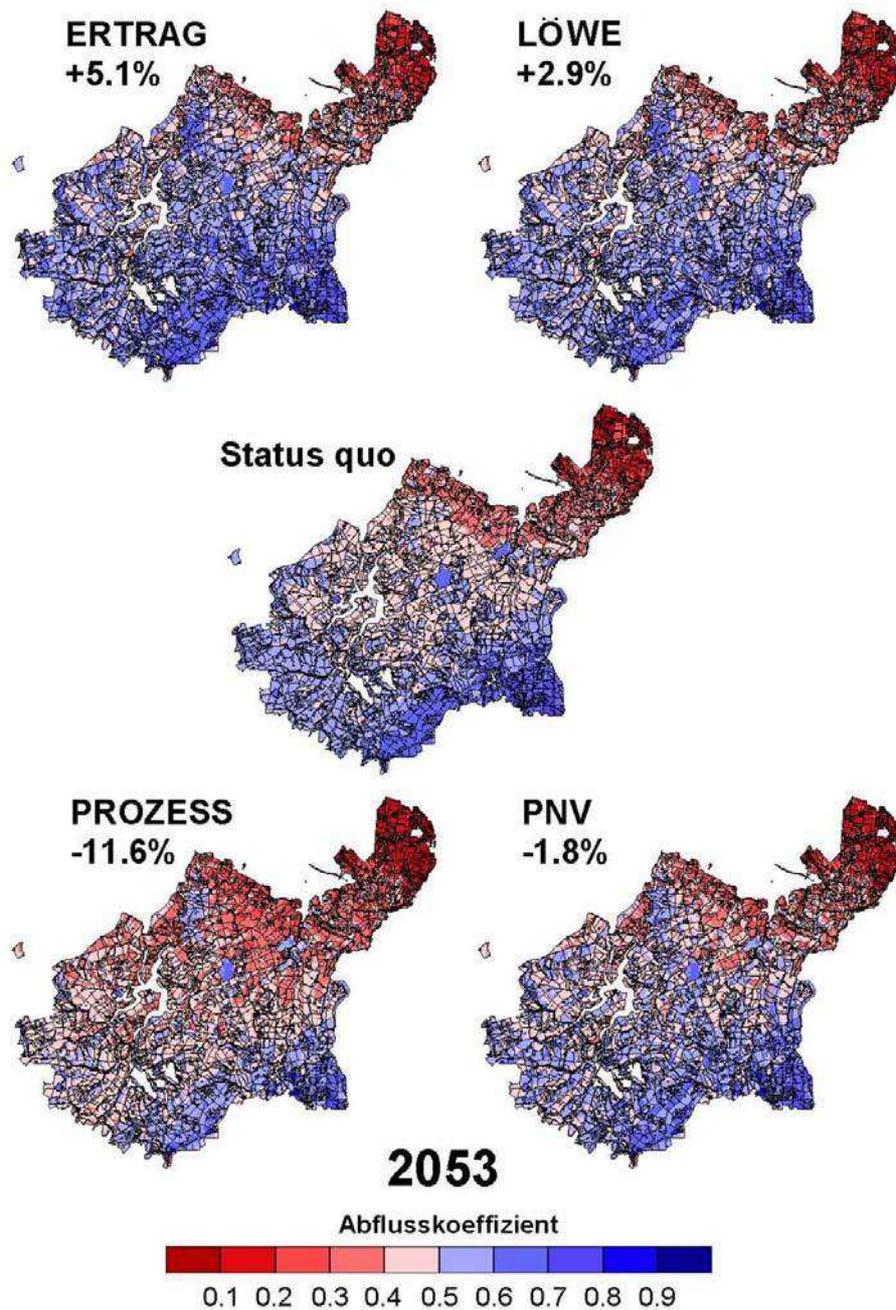


Abbildung 7: Berechnete Abflusskoeffizienten für die Waldentwicklungsszenarien im Zeitfenster 2053

Zur Mitte der Simulationsperiode im Zeitfenster 2027 nehmen die Unterschiede im Wasserhaushalt zwischen den Waldentwicklungsszenarien ERTRAG und PROZESS weiter zu. Die LÖWE- und PNV-Variante zeigen dagegen kaum Veränderungen gegenüber dem Basisszenario. Der prozessschutzorientierte Ansatz führt dazu, dass der Abflusskoeffizient im Flächenmittel um 8,8 % abnimmt (s. Abb. 6). Bei der ertragsorientierten Variante muss dagegen mit einer Zunahme des Abflusskoeffizienten um 3,1 % gegenüber dem Status quo gerechnet werden. Der Vergleich der „Extremszenarien“ ERTRAG und PROZESS zeigt, dass nach ungefähr 20 Simulationsjahren der Wasserhaushalt in Bezug auf die Verdunstungs- und Abflussleistung der Bestände durch unterschiedliche forstliche Bewirtschaftungsstrategien stark beeinflusst werden kann (s. Abb. 6).

Zum Ende der Simulationsperiode im Zeitfenster 2053 sind die Unterschiede in den berechneten Wasserbilanzen bei allen Waldentwicklungsszenarien im Vergleich zum Status quo am größten (s. Abb. 7). Hohe Bestandesdichten und das überdurchschnittlich hohe Bestandesalter der Wälder führen dazu, dass der Abflusskoeffizient bei der Variante PROZESS um fast 12 % gegenüber dem Basis-szenario zurückgeht. Entsprechend hoch ist die Verdunstungsleistung der Bestände bei diesem Szenario. Die kontinuierliche Nutzung der Wälder bei der LÖWE-Variante hat zur Folge, dass im Zeitfenster 2053 der Abflusskoeffizient im Vergleich zum Status quo um rund 3 % steigt. Die moderate Nutzung (Zielstärkenutzung) bei dieser Variante erklärt im Vergleich zum Szenario ERTRAG den ebenfalls nur moderaten Anstieg des Abflusskoeffizienten. Die geringsten Veränderungen weist auch am Ende der Simulationsperiode die PNV-Variante auf.

Innerhalb des Untersuchungsgebietes der Oker „Teilbereich Nordharz“ treten Unterschiede in der jährlichen Niederschlagssumme von rund 1.000 mm auf. So ist es nicht verwunderlich, dass die räumliche Verteilung der Abfluss- und Verdunstungskoeffizienten nicht nur das räumliche Verteilungsmuster der unterschiedlichen Bestände und der Bestandesentwicklung nachbildet, sondern durch die Niederschlagsverteilung überprägt wird. Nur die Freiflächen fallen durch ihre im Vergleich zu den bewaldeten Nachbarflächen überdurchschnittlich hohen Abflussanteile auf.

Aufgrund der bodenphysikalischen Eigenschaften wird nahezu der gesamte Abfluss im Vorfluter aus dem Grundwasserzufluss gebildet. Oberflächenabfluss tritt im Untersuchungsgebiet selten auf und wird nur bei hoher Vorfeuchte generiert. In den Modellsimulationen konnte bei keinem der Waldentwicklungsszenarien eine signifikante Veränderung der Oberflächenabflussanteile ermittelt werden. Dies mag darin begründet sein, dass die zeitliche Auflösung von einem Tag Simulationszeitschritt nicht ausreicht, da die Bildung eines Hochwasserereignisses in kleinen Mittelgebirgseinzugsgebieten meist innerhalb weniger Stunden erfolgt. Außerdem werden aufgelichtete und genutzte Bestände, wie es der in Deutschland praktizierten nachhaltigen Forstwirtschaft entspricht, umgehend im *WaldPlaner* in eine Folgenutzung überführt, so dass die Ausbildung von großflächigen vegeta-

tionslosen Freiflächen, die die Hochwasserentstehung begünstigen würden, nicht auftreten kann.

Die vier untersuchten Waldentwicklungsszenarien haben unterschiedlich starke Veränderungen im Gebietswasserhaushalt auf den bewaldeten Flächen der Oker im Nordharz zur Folge. Die größten Unterschiede gegenüber dem Status quo verzeichnet die Variante PROZESS, gefolgt von den Szenarien ERTRAG und LÖWE. Die PNV-Variante unterscheidet sich nur unwesentlich vom Basisszenario. Der Vergleich der Waldentwicklungsszenarien ERTRAG und PROZESS verdeutlicht, dass unterschiedliche Waldbewirtschaftungsstrategien kurzfristig (im forstlichem Sinn) zu deutlichen Veränderungen im Wasserhaushalt führen können.

Die Modellsimulation mit WaSiM-ETH liefert sowohl für die berechnete Gesamtbilanz wie auch für die flächendifferenzierten Wasserhaushaltsgrößen plausible Ergebnisse. Das hydrologische Prozessgeschehen wird gut erfasst, so dass die Auswirkungen forstlicher Nutzungen und Bewirtschaftungsstrategien mit den langfristigen Folgen auf den Wasserhaushalt quantifiziert und bewertet werden können.

3.2 Vergleich des Wasserhaushaltes zwischen einem Fichten- und einem Buchenbestand

Das von der NIEDERSÄCHSISCHEN LANDESFORSTVERWALTUNG (1991) verfolgte naturnahe Waldbaukonzept LÖWE sieht für den niedersächsischen Landeswald einen langfristigen Aufbau von Mischwäldern mit standortgerechten Baumarten vor. Für das Untersuchungsgebiet Oker im Nordharz bedeutet dies, dass die Fichtenbestände in den unteren und mittleren Lagen des Harzrandes sowie im montanen Mittel- und Oberharz in buchendominierte Bestände bzw. in Bestände mit Buchenbeimischungen überführt werden. Vor diesem Hintergrund ist der Vergleich des Wasserhaushaltes zwischen einem Fichten- und einem Buchenbestand von besonderem Interesse, um die Auswirkungen des Waldumbaus auf die Wasserumsätze von verschiedenen Waldökosystemen quantifizieren zu können.

Der Vergleich der Wasserhaushaltskomponenten ist nur dann aussagekräftig, wenn die Standorteigenschaften (Klima, Boden etc.) und die bestandesbezogenen Strukturparameter der zu vergleichenden Bestände sich nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Aus diesem Grund wurden für den Vergleich je ein realer Fichten- und Buchenreinbestand im Harzvorland ausgewählt, die aufgrund ihrer räumlichen Nähe von nur wenigen hundert Metern vergleichbare Standortbedingungen aufweisen. Beide Bestände stocken auf einem kalkhaltigen Mischlehm-boden über basenarmen Grundgestein. Es handelt sich um frische bis vorratsfrische Standorte mit einer schwachen Hangneigung, die ziemlich gut mit Nährstoffen versorgt sind (Standortskennziffer 9.4.46 laut Forstlicher Standortskarte). Die klimatischen Bedingungen sind ebenfalls sehr ähnlich. Die Mitteltemperatur während der Vegetationsperiode ist auf beiden Standorten mit 14,9 °C identisch.

Die mittlere Jahresniederschlagssumme bezogen auf die Periode 1996 bis 2005 beträgt auf dem Buchenstandort 813 mm (Vegetationsperiode 460 mm) und auf dem Fichtenstandort 816 mm (Vegetationsperiode 451 mm).

Der Buchenbestand ist mit einem Alter von 53 Jahren etwas älter als der Fichtenbestand mit 47 Jahren. Die mittlere Höhe des Buchenbestandes beträgt 20,8 m, der grundflächenbezogene Mitteldurchmesser (dg) wird mit 24,4 cm in der Forsteinrichtung angegeben. Die mittlere Höhe des Fichtenbestandes ist mit 17,9 m knapp 3 m niedriger als bei der Buche, wobei der dg mit 25,3 cm etwas höher ist. In dem Fichtenbestand stocken mit 744 Bäumen pro ha deutlich mehr Bäume als in dem Buchenbestand mit 436 Exemplaren. Auf beiden Flächen ist die Überschildung (Bedeckungsgrad) mit 0,90 (Buche) und 0,86 (Fichte) hoch, so dass sich kaum eine Sekundärvegetation etabliert hat. Der Bedeckungsgrad fließt als direkter Parameter in die Wasserhaushaltssimulation ein und steuert neben den Blattflächenindex, die Verdunstungsleistung der Bestände. Der maximale Blattflächenindex (LAI), abgeleitet aus dem mittleren Brusthöhendurchmesser und der Stammzahl, beträgt für die Buche 4,2 und für die Fichte 4,6. Während der Vegetationsruhe weichen die Werte für den LAI bei den Baumarten stärker voneinander ab und liegen bei 1,0 für die Buche und 3,6 für die Fichte.

Trotz der Lage am Harzrand sind die mittleren Jahresniederschlagssummen mit über 800 mm ausreichend, um die Wasserversorgung der Bestände ganzjährig zu gewährleisten. Nur in Trockenjahren kann in Abhängigkeit vom Bodenwasservorrat das Auftreten von Trockenstress nicht ausgeschlossen werden. Entsprechend hoch ist die mittlere jährliche Verdunstungsleistung sowohl des Fichten- wie des Buchenbestandes. Von den 711 mm realer Verdunstung des Fichtenbestandes werden im Mittel der Jahre 1996 bis 2005 238 mm über die Interzeption verdunstet. Die Transpirationsleistung der Buche ist mit der des Fichtenbestandes vergleichbar. Da die Interzeption der Buche mit 194 mm jedoch um knapp 50 mm geringer ist als bei der Fichte, beträgt die gesamte reale Evapotranspiration des Buchenbestandes „nur“ 678 mm. Entsprechend höher ist unter dem Buchenbestand die Grundwasserneubildung, die mit 107 mm um 40 mm über den Werten des Fichtenbestandes (77 mm) liegt.

Die Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulation für einen reinen Fichten- und reinen Buchenbestand im Nordharz verdeutlichen, dass unter gleichen Standortbedingungen bestandesspezifische Unterschiede in den Wasserhaushaltsbilanzen auftreten. Der Buchenbestand weist im Vergleich zum Fichtenbestand infolge der geringeren Interzeptionsverdunstung eine höhere Grundwasserneubildung auf. Allerdings ist die Verdunstungsleistung der winterkahlen Buche nur in der Nicht-Vegetationszeit niedriger, während in der Vegetationsperiode die reale Verdunstung der Buche sogar leicht über der des Fichtenbestandes liegt. In der langjährigen Bilanz sind die Unterschiede zwischen dem Buchen- und dem Fichtenbestand im Vergleich zu anderen Untersuchungen relativ gering. BENECKE (1984) ermittelte für einen 85-jährigen Fichten- und einen 120-jährigen Buchenbestand im

Solling eine Differenz in der Verdunstungsleistung von rund 150 mm (Mittelwert der Jahre 1968 - 1975). Die deutlich höhere Evapotranspiration der Fichte im Solling wird u. a. damit begründet, dass der Fichtenbestand im Vergleich zum Buchenbestand eine deutlich höhere Grundfläche aufweist, d. h. beide Bestände sind aufgrund ihrer unterschiedlichen Alters- und Bestandesstruktur nur bedingt miteinander vergleichbar. Weiterhin spielt bei der Buche der Stammabfluss eine wesentliche Rolle, der nach BENECKE (1984) bis zu rund 19 % des Niederschlages umfassen kann. Im hydrologischen Modell wird der Stammabfluss jedoch nicht berücksichtigt, sondern der Interzeption zugeführt, mit der Folge, dass bei der Buche die Interzeptionsverdunstung deutlich überschätzt wird.

Der Wasserhaushalt eines Fichten- und eines Buchenbestandes unterscheidet sich signifikant voneinander. Insbesondere unter trockenen Klimabedingungen weist die Buche einen Standortvorteil auf, da die Interzeptionsverdunstung im Vergleich zur Fichte deutlich geringer ist und damit mehr Wasser für die Transpiration zur Verfügung steht. Zusätzlich ist die Grundwasserneubildungsrate unter einem Buchenbestand höher. Vor dem Hintergrund der erwarteten Klimaänderung, die je nach Szenario für viele Regionen in Deutschland steigende Temperaturen und gleichzeitig abnehmende Niederschläge vor allem in der Vegetationsperiode erwarten lässt, ist die Buche auf vielen derzeit mit Fichte bestockten Standorten im Vorteil.

4 Fazit und Ausblick

Die Art und Intensität der Waldbewirtschaftung hat einen direkten Einfluss auf den Gebietswasserhaushalt. Die Forstwirtschaft muss zukünftig in Zusammenhang mit der EG-WRRL die Auswirkungen ihrer waldbaulichen Maßnahmen auf die Oberflächengewässer und den Grundwasserkörper im Sinne einer nachhaltigen Bewirtschaftung optimieren. In Bezug auf den Wasserhaushalt in bewaldeten Einzugsgebieten können mit Hilfe von Szenarioanalysen die Auswirkungen verschiedener Nutzungsstrategien zeitlich und räumlich quantifiziert werden.

Wälder sind grundsätzlich positiv für den Gewässerschutz anzusehen, da sie eine ausgleichende Wirkung auf den Wasserhaushalt ausüben. Die Wasserhaushaltssimulationen belegen jedoch auch, dass forstliche Maßnahmen zu mehr oder weniger starken Veränderungen im Wasserhaushalt führen können. Der nach den aktuellen LÖWE-Bewirtschaftungsrichtlinien der Niedersächsischen Landesforsten forcierte Waldumbau in Richtung eines höheren Anteils an Laubbäumen und die naturnahe Bewirtschaftung von Wäldern wirkt sich im Harz günstig auf den Wasserhaushalt aus. Diese Bewirtschaftungsmaßnahmen lassen im Sinne der EG-WRRL keine Verschlechterung des Gewässerzustandes und des Gebietswasserhaushaltes erwarten („Verschlechterungsverbot“).

Vor dem Hintergrund des erwarteten Klimawandels scheint der langfristige Umbau der überwiegend fichtendominierten Bestände bzw. Fichtenreinbestände im Nordharz in buchendominierte Mischwälder gut begründet.

In diesem Sinn können aus wasserwirtschaftlicher Sicht die Waldentwicklungsszenarien LÖWE und PNV empfohlen werden, da bei beiden Bewirtschaftungskonzepten aufgrund der moderaten Nutzungseingriffe und Waldumbaumaßnahmen keine übermäßigen Veränderungen im Wasserhaushalt des Untersuchungsgebietes zu erwarten sind. Das Szenario ERTRAG und insbesondere die Variante PROZESS führen dagegen im Vergleich zum Status quo zu stärkeren Veränderungen im Wasserhaushalt. Eine deutliche Verminderung der Grundwasserneubildung (PROZESS) bzw. eine Zunahme der Hochwassergefahr (ERTRAG) kann nicht ausgeschlossen werden.

Aus dem Vergleich der Wasserbilanzen bei unterschiedlichen forstlichen Bewirtschaftungsstrategien lässt sich die Empfehlung nach ausgewogenen Bestandesdichten ableiten. Zu lichte Bestände begünstigen eine erhöhte Abflussmenge und das Aufkommen einer Bodenvegetation (Konkurrenz). Letztere kann die natürliche Verjüngung stark behindern. Zu dichte Bestände führen infolge erhöhter Interzeption und Transpiration zur Verminderung der Grundwasserneubildung. Gestaffelte Durchforstungen mit starken Eingriffen in der Jugend und abnehmender Eingriffsstärke mit zunehmenden Bestandesalter haben den Vorteil, dass sie die Produktions- und damit auch die Gefährdungszeiträume verkürzen. Weiterhin ist auf eine ausgewogene Bestandesstruktur zu achten, die die Bestandeselastizität erhöht. Dies kann ebenfalls durch horstweise Baumartenmischungen erzielt werden, die zudem eine Risikoverteilung gegenüber Schädlingen und Sturmwurfgefährdung gewährleisten (SPELLMANN et al. 2007).

Durch die Studie zum Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Oker „Teilbereich Nordharz“ konnte gezeigt werden, wie forstliche Bewirtschaftungsstrategien den Gebietswasserhaushalt von bewaldeten Flächen verändern können. Unter Berücksichtigung der Zielsetzung der EG-WRRl können für das Untersuchungsgebiet Empfehlungen für das forstliche Management gegeben werden, die einen nachhaltigen guten Zustand der Gewässer im wasserwirtschaftlichen Sinn gewährleisten.

Literatur

- ALBERT, M. u. HANSEN, J. (2007): Ein Entscheidungsunterstützungssystem für die multifunktionale Forstplanung auf Landschaftsebene. *Forst u. Holz*, 62. Jg., 12, 14-18
- ARBEITSGRUPPE BODEN (1994): *Bodenkundliche Kartieranleitung (KA4)*. – 4. Aufl., 392 S.; Hannover
- BENECKE, P. (1984): Der Wasserumsatz eines Buchen- und eines Fichtenwaldökosystems im Hochsolling. *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt*, Bd. 77; Frankfurt
- DUDA, H.A.A. (2006): Vergleich forstlicher Managementstrategien. Umsetzung verschiedener Waldbaukonzepte in einem Waldwachstumssimulator. Dissertation Universität Göttingen, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Books on Demand, Norderstedt, 182 S.
- ETH ZÜRICH (2005): WaSiM-Workshop, ETH Zürich, 17./18.März 2005. Homepage: <http://www.wasim.ch/dialog/events.htm>
- EUROPÄISCHES PARLAMENT UND EUROPÄISCHER RAT (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, ABl. L 327 der Europäischen Gemeinschaften vom 22.12.2000
- HAMMEL, K. u. KENNEL, M. (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. *Forstliche Forschungsberichte München*, 185
- HANSEN, J. (2006): Der WaldPlaner – Ein System zur Entscheidungsunterstützung in einer nachhaltigen Forstwirtschaft. In: DEGENHARDT, A. u. U. WUNN (Hrsg.): *Sammlung der Beiträge von der 18. Jahrestagung der Sektion Biometrie und Informatik im DVFFA vom 25. bis 27.09.2006 in Trippstadt*. Die Grüne Reihe, 112-119
- NIEDERSÄCHSISCHE LANDESFORSTVERWALTUNG (1991): *Langfristige Ökologische Waldentwicklung in den Landesforsten*. Programm der Landesregierung, Niedersächsische Landesregierung Hannover, 49 S.
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, 212
- SCHULLA, J. (1997): *Wasserhaushalts-Simulationsmodell WaSiM-ETH*, Anwender-Handbuch, Geogr. Inst. ETH Zürich
- SPELLMANN, H.; SUTTMÖLLER, J. u. MEESEBURG, H. (2007): Risikovorsorge im Zeichen des Klimawandels: Vorläufige Empfehlungen der NW-FVA am Beispiel des Fichtenanbaus. *AFZ/Der Wald*, 62. Jg., 23, 1246-1249
- SUTTMÖLLER, J.; HENTSCHEL, S.; MEESEBURG, H.; SPELLMANN, H. (2007): Auswirkungen forstlicher Maßnahmen auf den Wasserhaushalt in bewaldeten Einzugsgebieten. In: MIEGEL, K.; TRÜBNER, E.-R. u. KLEEBERG, H.-B. (HRSG.): *Einfluss von Bewirtschaftung und Klima auf Wasser- und Stoffhaushalt von Gewässern*. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2007 am 22./23. März in Rostock. *Forum für Hydrologie u. Wasserbewirtschaftung* 20.07 (1), 235-246
- TEEPE, R., DILLING, H. u. BEESE, F. (2003): Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 166, 111-119
- VAN GENUCHTEN, M.T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am.*, 44, 892-898

Korrespondierender Autor:

Johannes Sutmöller

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

Grätzelstr. 2

D-37079 Göttingen

E-Mail: johannes.sutmoeller@nw-fva.de

URL: www.nw-fva.de