

Auswirkungen forstlicher Maßnahmen auf den Wasserhaushalt in bewaldeten Einzugsgebieten

Johannes Suttmöller, Swen Hentschel, Henning Meesenburg, Hermann Spellmann

Zusammenfassung

Wälder und ihre forstliche Bewirtschaftung wirken sich direkt und indirekt auf den Gewässerzustand aus, indem durch Veränderungen des Waldaufbaus und der Waldnutzung die Menge und Dynamik der Wasserflüsse beeinflusst wird. Über die konkreten Auswirkungen forstlicher Maßnahmen und Planungen auf Gewässer ist vergleichsweise wenig bekannt. Ziel des Pilotprojektes SILVAQUA ist der Aufbau eines raumbasierten Wissens- und Entscheidungsunterstützungssystems, dessen Komponenten sich den vielfältigen Fragestellungen zum Gewässerschutz stellen.

Mit Hilfe eines Waldwachstumssimulators (WaldPlaner) werden die Bestandesentwicklung und mögliche waldbauliche Entwicklungsszenarien generiert. Damit liefert das Modell raumbezogene Eingangsgrößen, die als Datenbasis für das gebietsdifferenzierte Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH benötigt werden. Die Anpassung der Modelle erfolgt für das forsthydrologische Experimentalgebiet „Lange Bramke“, das sich besonders für die vorgesehenen Untersuchungen eignet, da die nahezu vollständige Bewaldung eine gezielte Betrachtung der für Waldgewässer typischen Prozesse erlaubt.

Die Ergebnisse der hydrologischen Simulationen zu den forstlichen Bewirtschaftungsszenarien naturnaher Waldbau, PNV (Potentielle Natürliche Vegetation) und Ertragsorientierung zeigen, dass Wälder positiv für den Gewässerschutz anzusehen sind, da sie eine ausgleichende Wirkung auf den Wasserhaushalt ausüben. Der nach den aktuellen Bewirtschaftungsrichtlinien des naturnahen Waldbaukonzepts forcierte Waldumbau sollte aus wasserwirtschaftlichen Gründen langfristig und nachhaltig angelegt sein.

1 Einleitung

Mit der EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) ist ein neuer Rahmen für das wasserwirtschaftliche Handeln festgelegt worden. Die WRRL gibt verbindliche Ziele zur Erreichung des „guten Zustandes“ der Gewässer vor. Da die Auswirkungen vieler Maßnahmen zum Gewässerschutz relativ lange Wirkungszeiträume umfassen, ist eine frühzeitige Maßnahmenplanung wünschenswert.

Ziel des Pilotprojektes SILVAQUA ist die Untersuchung der Auswirkungen forstlicher Maßnahmen und Planungen auf den Gewässerzustand in bewaldeten Einzugsgebieten. In diesem Projekt wird ein raumbasiertes Wissens- und Entscheidungsunterstützungssystem aufgebaut, dessen Komponenten sich den vielfältigen Fragestellungen zum Gewässerschutz stellen. Das Instrumentarium ist modular aufgebaut und besteht überwiegend aus getesteten Modellen, die miteinander gekoppelt werden. Im Einzelnen werden Modelle zur Waldentwicklung, hydrologischen Einzugsgebietsmodellierung, zum Stoffhaushalt und zur forstlichen Ökonomie angewendet (s. Abbildung 1). Durch diesen modellbasierten Untersuchungsansatz können forstliche Maßnahmen hinsichtlich ihrer Eignung zur Erfüllung der Ziele der

WRRL beurteilt werden. Als Ergebnis werden Managementstrategien zur forstlichen Bewirtschaftung vorgeschlagen, die zu einer nachhaltigen Verbesserung des Gewässerzustandes beitragen können.

Die Anpassung der Modelle erfolgt für das forsthydrologische Experimentalgebiet „Lange Bramke“, da hier eine Fülle von Messreihen und Detailuntersuchungen zur Verfügung stehen. Das Einzugsgebiet „Lange Bramke“ eignet sich besonders für die vorgesehenen Untersuchungen, da die nahezu vollständige Bewaldung eine gezielte Betrachtung der für Waldgewässer typischen Prozesse erlaubt. Die im Testgebiet gewonnenen Erkenntnisse sollen die Übertragbarkeit auf andere bewaldete Einzugsgebiete im Bergland gewährleisten. Ziel des Projektes ist es, die verwendeten Modelle und Methoden auf das Zielgebiet der Oker im Westharz anzuwenden.

In dieser Arbeit werden erste Ergebnisse des Pilotprojektes SILVAQUA vorgestellt. Am Beispiel eines Fichtenbestandes im Teileinzugsgebiet „Lange Bramke“ werden die Auswirkungen verschiedener Bewirtschaftungsstrategien (naturnaher Waldbau, PNV, Ertragsorientierung) auf den Wasserhaushalt untersucht und mögliche Handlungsoptionen aufgezeigt. Die Auswirkungen auf die Wasserqualität und die ökonomischen Aspekte sind nicht Bestandteil dieser Arbeit (s. Abbildung 1).

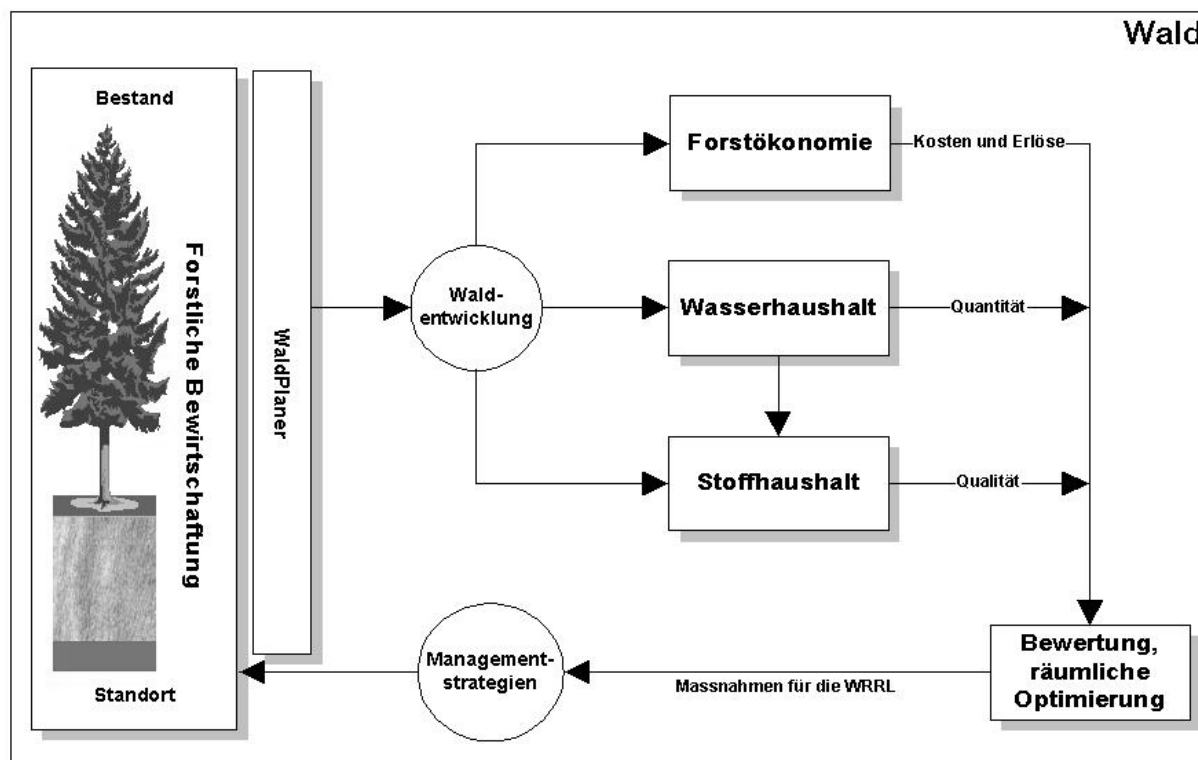


Abb. 1: Modellschema WRRL-Projekt SILVAQUA

2 Untersuchungsgebiet

Das Teileinzugsgebiet „Lange Bramke“ ist 76 ha groß und liegt im Oberlauf der Oker im nordwestlichen Teil des niedersächsischen Harzes. Es verläuft hauptsächlich in Ost-West-Richtung mit der Talöffnung nach Osten. Die „Lange Bramke“ reicht von ca. 700 m im westli-

chen Kammbereich bis zum Pegel bei 540 m ü. NN (s. Abbildung 2). Aufgrund der großen Höhenunterschiede treten verbreitet Hangneigungen von rund 15% auf, wobei der nordexponierte Hang mit durchschnittlich 12% gegenüber dem Südhang mit 18% Hangneigung deutlich flacher ist (SCHMIDT 1997).

Die geologischen Ausgangssubstrate bilden quarz- und illitreiche Sandsteine und Tonschiefer des Unterdevon. Auf Grundlage der Forstlichen Standortskartierung können drei unterschiedliche Bodeneinheiten ausgegliedert werden, die sich in ihrer Substratzusammensetzung unterscheiden. Das Ausgangssubstrat bildet eine überwiegend schluffig-lehmige Fließerde, die von einer skelettreichen Hangschuttdecke (Skelettanteil > 50%) unterlagert wird. Der Großteil des Einzugsgebietes wird durch geringmächtige (bis 30 cm) lehmig-sandige oder schluffig-lehmige Decken eingenommen. Weiterhin treten 30-70 cm mächtige schluffig-lehmige Decken oder stark schluffgeprägte Fließerden auf. Mächtige Kolluvien (über 70 cm), die meist schluffig und häufig mit sandigen oder kiesigen Zwischenlagen durchsetzt sind, sind nur im Talbereich „Lange Bramke“ zu finden. Die Wasserdurchlässigkeiten können flächendeckend als hoch eingestuft werden.

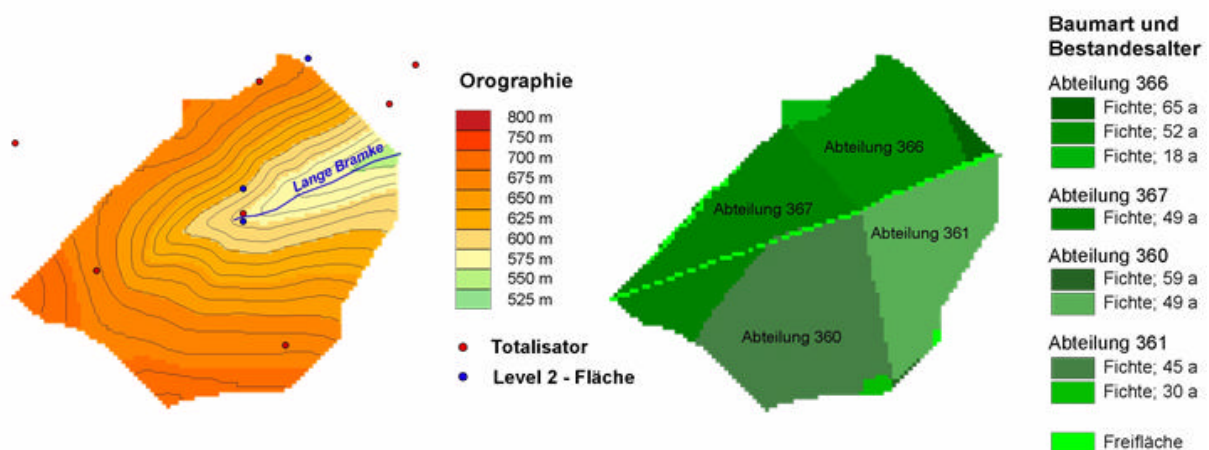


Abb. 2: Orographie, Baumarten und Bestandesalter im Einzugsgebiet „Lange Bramke“

Das Gebiet „Lange Bramke“ liegt in der montanen Stufe des Harzes. Die aktuelle Bestockung weicht deutlich vom naturnahen Zustand ab. Auf 96% der Fläche im Teileinzugsgebiet sind 45 bis 65-jährige Fichtenreinbestände zu finden. Einige kleinere Bestände sind mit 30 bzw. 18 Jahren deutlich jünger (s. Abbildung 2). Eine in West-Ost-Richtung verlaufende, ca. 20 m breite Schneise und die Talaue sowie ein kleiner Bereich auf dem Nordhang bilden die einzigen mit Gras bestandenen Freiflächen des Untersuchungsgebietes. Der Vorbestand aus ca. 120-jähriger Fichte wurde im Jahr 1947 im Rahmen von Reparationsmaßnahmen kahl geschlagen. Seit 1949 wurde wieder aufgeforstet und bis in die Mitte der 50er Jahre nachgebessert. Bis in die 60er Jahre erfolgte die Nutzung der bis dahin lückigen und mit einer dichten Grasschicht bedeckten Bestände als Viehweide. Die aktuellen Bewirtschaftungsrichtlinien des naturnahen Waldbaukonzeptes der Niedersächsischen Landesforsten sehen für das Gebiet zukünftig eine naturnähere Bestockung mit Mischbeständen aus Buchen und Fichten vor.

Die großflächigen Kahlhiebe im Jahre 1947 waren Anlass für die Einrichtung des forsthydrologischen Experimentalgebietes „Lange Bramke“. Der Schwerpunkt der Forschungen lag zu Beginn auf Fragen der Erosion und Niederschlags-Abfluss-Beziehungen. In den 70er Jahren traten verstärkt Waldschadenssymptome auf, die zu einer Erweiterung der Untersuchungen auf den Stoffhaushalt von Waldökosystemen führten. Seit 1992 ist die „Lange Bramke“ Teil des Niedersächsischen Boden-Dauerbeobachtungsprogramms und seit 1994 in das Level II-Programm der EU integriert.

Die langjährige Wasserbilanz (1950-2005) kann aus den am Pegel gemessenen Abflüssen und den gemessenen und in die Fläche interpolierten Niederschlägen berechnet werden. Daraus ergibt sich für das Einzugsgebiet „Lange Bramke“ eine durchschnittliche Abflusshöhe von 840 mm und eine Niederschlagssumme von knapp 1250 mm. Damit bleiben rund 400 mm als Verdunstungsleistung übrig. Die Evapotranspiration wird damit eindeutig unterschätzt. Untersuchungen der BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (1988) ergaben für das Einzugsgebiet „Lange Bramke“ mittlere Verdunstungssummen von knapp 600 mm (1950-1980). Vor diesem Hintergrund wurden die Niederschläge in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit einer ‚konservativen‘ Korrektur unterzogen. Die korrigierten Niederschläge betragen für den Messzeitraum von 1950-2005 im Flächenmittel 1390 mm, die Evapotranspiration erhöht sich dadurch auf 550 mm.

3 Modellierungsansatz

Im Zentrum des Projektes SILVAQUA steht ein flächendifferenziertes, multiskaliges hydrologisches Einzugsgebietsmodell. Es stützt sich auf eine GIS-Basis, in der die wesentlichen Informationen zum Standort und zu den Beständen verwaltet werden. Um die hydrologische Prozesskette flächendifferenziert und möglichst physikalisch basiert nachzubilden, wird das Wasserhaushalts-Simulations-Modell WaSiM/ETH (SCHULLA 1997) angewendet. Dieses ist bereits in verschiedenen Einzugsgebieten von der Mikro- ($< 1\text{km}^2$) bis zur Mesoskala ($\pm 10.000\text{km}^2$) erfolgreich getestet worden (ETH Zürich 2005).

Neben der Erfassung des aktuellen hydrologischen Prozessgeschehens ist für die Entwicklung von Managementstrategien die Beurteilung langfristiger Veränderungen des Gewässerzustandes durch forstliche Maßnahmen von Bedeutung. Hierzu wird die Entwicklung der Bestände unter Annahme unterschiedlicher forstlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen mit Hilfe eines Waldwachstumsmodells (WaldPlaner) simuliert. Die Ergebnisse der forstlichen Szenarien werden dem Wasserhaushaltsmodell zur Verfügung gestellt, um die Wasserflüsse im Untersuchungsgebiet unter den veränderten Randbedingungen zu modellieren. Durch diese Vorgehensweise können Veränderungen im Wasserhaushalt (z.B. erhöhte Grundwasserneubildungsraten etc.) quantifiziert und flächendifferenziert zugeordnet werden. Der gewählte Untersuchungsansatz erlaubt somit neben einer allgemeinen Bewertung forstlicher Maßnahmen auch deren gezielte räumliche Optimierung. Nachfolgend werden beide Modelle kurz erläutert und die Verknüpfung zwischen WaldPlaner und WaSiM/ETH aufgezeigt.

WaSiM-ETH berechnet die Wasserumsätze auf einem Modellgitter mit quadratischen Zellen. Das Modellgebiet „Lange Bramke“ wird mit einer Auflösung von 12,5 m diskretisiert. Die Modellkalibrierung erfolgt auf Grundlage der Jahre 1990 bis 1999. Der Validierungszeitraum

umfasst den Zeitraum von 1980 bis 1989. Für den Pegel „Lange Bramke“ liegen vom Betreiber (Harzwasserwerke) die Messwerte als Tagesmittelabfluss für den Zeitraum von 1950 bis heute lückenlos vor. Der gesamte Simulationszeitraum beginnt mit den Wiederaufforstungsmaßnahmen im Jahr 1950 und endet im Jahr 2050.

Für die Parametrisierung des Modells werden Informationen zur Orographie, Landnutzung und zum Boden benötigt. Im Teileinzugsgebiet „Lange Bramke“ setzt sich die Geodatenbasis folgendermaßen zusammen:

- Digitales Höhenmodell (12,5 m)
- Forsteinrichtungsdaten
- Forstliche Standortskartierung

Als meteorologischer Antrieb werden Angaben zum Niederschlag und Wind, zur Temperatur, Globalstrahlung und relativen Feuchte benötigt. Ein großer Anteil der meteorologischen Antriebsdaten kann durch eigene im Untersuchungsgebiet befindliche Monitoringnetze der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) gedeckt werden (s. Abbildung 2). Die Messreihen werden durch Niederschlags- und Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes und der Harzwasserwerke ergänzt. Die meteorologischen Zeitreihen fließen als Tagesmittelwerte bzw. als Tagessummen in die hydrologische Modellierung ein.

Der Simulation vorgeschaltet ist eine windabhängige Korrektur der Stationsniederschläge (s. Kapitel 2). Die Stationsdaten der meteorologischen Größen werden mit Hilfe eines kombinierten IDW (Inverse Distance Weighting Interpolation) und höhenabhängigen Regressionsverfahrens auf das Flächenraster des Modells interpoliert. Weiterhin besteht die Möglichkeit einer topographiebedingten Strahlungskorrektur und Temperaturmodifikation.

Die Modellierung der Wasserbewegung im Boden ist primär von den bodenphysikalischen Eigenschaften des Substrates abhängig. Mit der Version 2 von WaSiM/ETH werden die Wasserflüsse in der ungesättigten Bodenzone auf der Grundlage der Richards-Gleichung in eindimensionaler vertikaler Form berechnet (SCHULLA 1997). Die Parametrisierung der verwendeten pF-Kurven erfolgt nach VAN GENUCHTEN (1980). Die physikalischen Eigenschaften von Waldböden unterscheiden sich 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 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. Anhand von 1850 an Waldböden ermittelten Wasserretentionskurven wurden für die 10 Texturklassen die van Genuchten-Parameter berechnet (TEEPE et al. 2003).

Die Evapotranspiration beschreibt die Verdunstungsprozesse der Transpiration, Interzeption und Evaporation. Die Interzeption wird von WaSiM/ETH über einen einfachen Speicheransatz ermittelt. Die potentielle Evapotranspiration wird nach der Methode von Penman-Montheith berechnet. Wichtige vegetationsspezifische Parameter, die für die Berechnung der Verdunstungsprozesse benötigt werden, können mit Hilfe der Ergebnisse der Simulation mit dem Waldwachstumsmodell abgeleitet werden.

Der WaldPlaner ist eine eigenständige Entwicklung der NW-FVA (NAGEL 2002). Es handelt sich um eine Software, mit deren Hilfe Informationen zum Waldzustand, Waldwachstum und zur Prognose der Waldentwicklung zur Verfügung gestellt werden. Das grundlegende Prinzip der Simulation beruht darauf, dass zunächst aus Bestandesdaten (falls keine Einzelbaumdaten vorliegen) wie z.B. der Forsteinrichtung oder der Bundeswaldinventur unter Einbindung von Datenergänzungsroutinen Einzelbaumdaten generiert werden. Für die Simulation der Bestandesentwicklung sind im WaldPlaner vordefinierte Szenarien implementiert. Es besteht jedoch die Möglichkeit eigene Strategien zu entwickeln oder bestehende Szenarien zu modifizieren. Die gewählte Strategie wird mit den Daten des IST-Zustandes initialisiert und über die voreingestellte Simulationsperiode modelliert, wobei neben dem Zielzustand auch die Waldzustände in frei wählbaren Intervallen in eine Datenbank geschrieben werden. Aus der Vielzahl der berechneten Kennziffern werden raumbezogene Eingangsparameter bereitgestellt, die als Datenbasis für die Wasserhaushaltsmodellierung zur Verfügung gestellt werden.

Die Verknüpfung zwischen WaldPlaner und hydrologischem Einzugsgebietsmodell erfolgt ‚offline‘. So wird anhand des Bruthöhendurchmessers (BHD) und der Stammzahl die langfristige Veränderung des Blattflächenindex (LAI) berechnet (HAMMEL & KENNEL 2001). Durch Laub- bzw. Nadelabwurf entstehen jahreszeitliche Schwankungen im Bestandes-LAI. Der LAI für einen Fichtenbestand beträgt im Winter in Anlehnung an HAMMEL & KENNEL (2001) 80% des maximalen LAI. Für einen Buchenbestand entspricht der LAI während der Vegetationsruhe dem Stammflächenindex (SAI). Die Vegetationsperiode wird über ein Temperatursummenmodell bestimmt (HAMMEL & 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.

Die in dieser Arbeit untersuchten Waldbaukonzepte sollen exemplarisch einen Eindruck über die Variationsbreite möglicher forstlicher Strategien vermitteln. Das naturnahe Waldbaukonzept stellt die aktuelle Zielvorgabe für die Bewirtschaftung der niedersächsischen Landesforsten dar (NIEDERSÄCHSISCHE LANDESFORSTVERWALTUNG 1991). Das Konzept verfolgt den Ausgleich zwischen ökonomischem Nutzen und Ökologie, indem die Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes den gleichen Stellenwert erhalten (DUDA 2006). Viele Wälder entsprechen heute aufgrund anthropogener Einflüsse nicht mehr der natürlichen Vegetation. Durch die Simulationsvariante PNV (Potentiell Natürliche Vegetation) wird die Baumartenzusammensetzung so verändert, dass die Bestände langfristig in einen naturnahen Zustand überführt werden. Die dritte Variante verfolgt einen mehr ökonomisch orientierten Ansatz (Ertragsorientierung). Hierbei werden Baumarten bevorzugt, die in Abhängigkeit der Standortfaktoren den größten wirtschaftlichen Nutzen versprechen. Forstliche Eingriffe erfolgen seltener als bei der naturnahen Waldbauvariante, werden dann aber intensiver durchgeführt. Wälder, die ertragsorientiert bewirtschaftet werden, sind häufig Reinbestände, die eine wenig geschichtete Struktur aufweisen (DUDA 2006).

In Abbildung 3 (Szenario 2) ist die Umsetzung der vorgestellten Bewirtschaftungsszenarien am Beispiel eines knapp 60 Jahre alten Fichtenbestandes im Untersuchungsgebiet „Lange

Bramke“ dargestellt. Der Bestand befindet sich im Jahr 2050 in der Endnutzung und wird nach dem naturnahen Waldbaukonzept durch die Zielstärkennutzung bewirtschaftet. Bei der ertragsorientierten Variante wird die erntereife Bestandesschicht komplett genutzt. Die dritte Variante stellt die drastische Umsetzung des PNV-Konzeptes dar. Der aktuelle Bestand wurde im Jahr 2005 komplett kahl geschlagen und mit Buche wieder aufgeforstet, so dass im Jahr 2050 auf diesem Standort ein reiner Buchenbestand vorzufinden wäre.

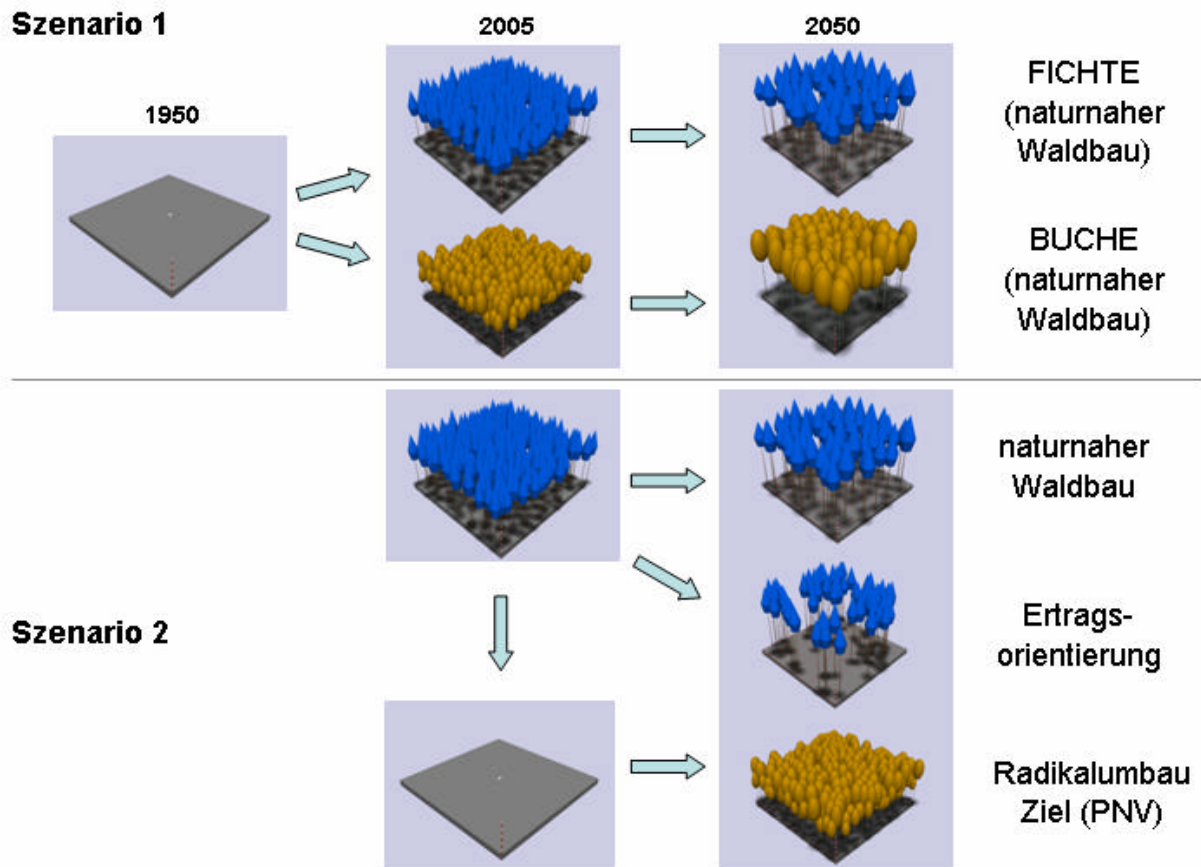


Abb. 3: Forstliche Bewirtschaftungsstrategien

4 Ergebnisse

In einem ersten Szenario wurde die Entwicklung des Fichtenbestandes mit dem Beginn der Wiederaufforstung im Jahr 1950 bis heute rekonstruiert. Bis zum Jahr 2005 wurden entsprechend der realen Bewirtschaftung zwei Durchforstungseingriffe berechnet (1979/80 & 1989/90), ab 2005 wird das Bestandeswachstum unter den Rahmenbedingungen des naturnahen Waldbaus mit Eingriffen alle 5 Jahre bis 2050 simuliert. Zum Vergleich wurde dieses Szenario dahingehend verändert, dass die Bestandesentwicklung von Beginn an als reiner Buchenbestand simuliert wird. Der WaldPlaner liefert für die Szenarien Einzelbaumdaten, wobei die Eingriffsfolgen baumartenspezifisch sind (s. Abbildung 3).

Die Randbedingungen sind für beide Szenarien identisch. Für den meteorologischen Antrieb werden bis 2005 die gemessenen Stationsdaten verwendet. Um auch für die Zukunft bis 2050 vergleichbare klimatische Bedingungen zu gewährleisten, wurde die 45-jährige Simulationsperiode (2006-2050) mit den klimatischen Zeitreihen von 1961 bis 2005 hinterlegt.

Zur Beurteilung der Wirkung der forstlichen Nutzung auf den Wasserhaushalt bietet sich ein Vergleich der jährlichen Interzeptionsverdunstung und Sickerwassermenge für die Nutzung mit Fichte oder Buche an (s. Abbildung 4). Zu Beginn der Simulationsperiode (bis 1965) erfolgt die Parametrisierung der Fichten- und Buchenbestände einheitlich als Gras- und Krautvegetation. Aufgrund der hohen Zuwachsraten nimmt ab Mitte der 60er Jahre die Interzeption der Fichte deutlich zu und erreicht mit 300 bis 350 mm Jahressumme bereits nach 30 Jahren Bestandesentwicklung seine höchsten Werte. Dieses Niveau wird trotz durchgeführter Eingriffe bis zum Jahr 2015 gehalten, wobei in klimatisch begünstigten Jahren der Interzeptionsverlust annähernd 400 mm beträgt. Der Buchenbestand zeigt dagegen keine signifikante Zunahme der Interzeptionswerte. Im Gegensatz zur Fichte hat die Reduzierung der Stammzahl durch natürliche Mortalität und aktive Nutzung einen deutlichen Rückgang der Interzeptionsverdunstung zur Folge. Von rund 250 mm im Jahr 1980 nimmt die Interzeption auf rund 150 mm im Jahr 2000 ab.

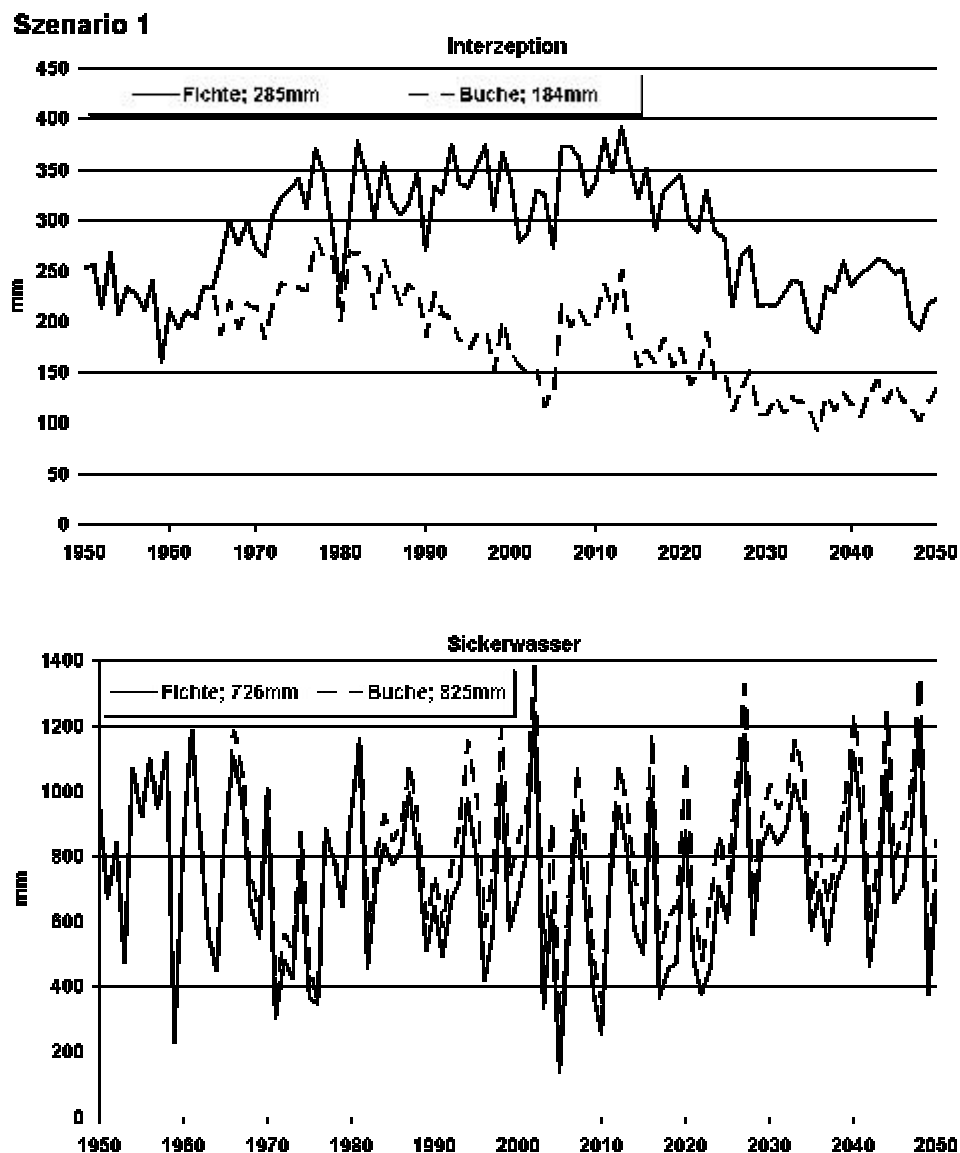


Abb. 4: Modellierte Interzeptionsverdunstung und Sickerwassermenge (in der Legende sind die mittleren Interzeptions- und Sickerwassermengen angegeben)

Die zukünftige Waldentwicklung bis zum Jahr 2050 zeigt dagegen bei beiden Bestandestypen einen gleichsinnigen Verlauf. Von ihren Maximalwerten ausgehend, reduziert sich die Interzeptionsverdunstung infolge regelmäßiger Eingriffe (5 Jahre) kontinuierlich auf 200 bis 250 mm bei der Fichte und 100 bis 250 mm bei der Buche. Während der gesamten Simulationsperiode ergibt sich zwischen Fichte und Buche eine Differenz in der Interzeption von rund 100 mm (s. Abbildung 4). Der höhere Bestandesniederschlag wird im Buchenbestand fast vollständig als Sickerwasser abgeführt. Im Vergleich zur Fichte würde die Grundwasserneubildung im Mittel um knapp 100 mm zunehmen (s. Abbildung 4). Die Transpirationsleistung weist zwischen Fichte und Buche im Jahresmittel keine signifikanten Unterschiede auf.

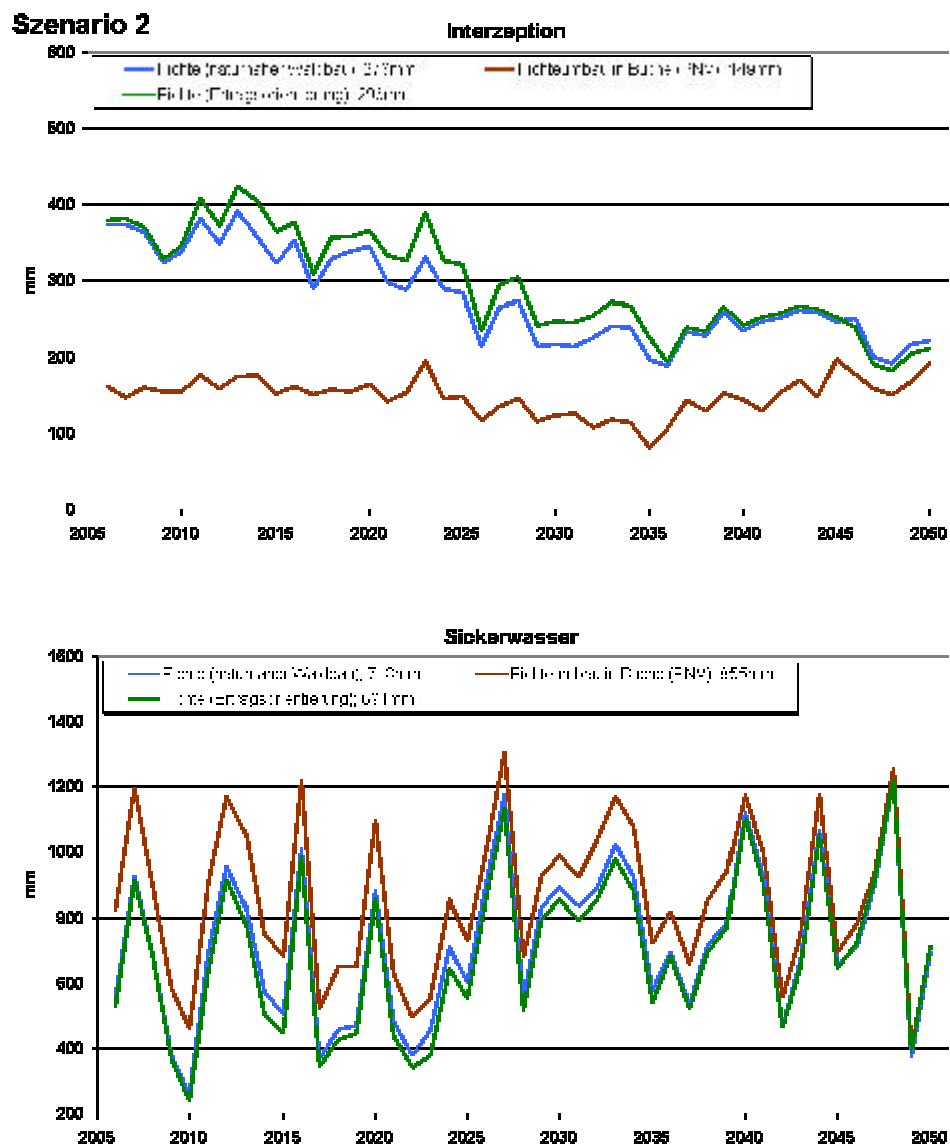


Abb. 5: Modellierte Interzeptionsverdunstung und Sickerwassermenge für verschiedene forstliche Szenarien (in der Legende sind die mittleren Interzeptions- und Sickerwassermengen angegeben)

Das zweite Szenario lässt den derzeitigen Bestand nach drei unterschiedlichen Bewirtschaftungsstrategien bis 2050 wachsen. Neben der bereits besprochenen naturnahen Waldbauvariante wird ein ertragsorientiertes Konzept verfolgt. Hierbei erfolgen die Eingriffe alle 10 Jahre mit einer im Vergleich zur naturnahen Waldbaustrategie jedoch deutlich erhöhten Durchforstungsstärke. Die dritte Variante stellt die drastische Umsetzung des PNV-Konzeptes dar (s. Kapitel 3).

Zwischen der ertragsorientierten Variante und der naturnahen Waldbaustrategie sind die Unterschiede der simulierten Interzeption und Sickerwassermenge gering (s. Abbildung 5). Die Interzeptionsverdunstung der ertragsorientierten Variante liegt dabei um knapp 20 mm höher als bei der naturnahen Waldbaustrategie. Aufgrund höherer Holzentnahmemengen fallen bei der naturnahen Waldbauvariante die Interzeptionsverluste in den ersten 30 Jahren der Simulation niedriger aus als bei der ertragsorientierten Variante. Beide Konzepte zeigen über den gesamten Simulationszeitraum von 2005 bis 2050 einen ähnlichen Verlauf in den modellierten Bilanzgrößen. Allerdings findet in der Endnutzungsphase der Fichte zwischen beiden Varianten eine Angleichung in der Verdunstungsleistung statt.

Die PNV-Strategie zeigt einen anderen Verlauf. Fast während der gesamten Simulationsperiode schwankt die Interzeptionsleistung um 150 mm pro Jahr. Erst mit dem Einwachsen der jungen Buchenbestände in das geringe Baumholz ($BHD > 14$ cm) ist eine leichte Zunahme auf annähernd 200 mm zu verzeichnen. Dementsprechend wäre bei einem Umbau des Fichtenbestandes in einen reinen Buchenbestand mit einer deutlich erhöhten Sickerwassermenge (Grundwasserneubildung) zu rechnen (s. Abbildung 5). Zwischen der ertragsorientierten Variante und dem naturnahen Waldbaukonzept sind die Unterschiede in der simulierten Sickerwassermenge mit knapp 40 mm deutlich geringer.

Neben der Gebietsbilanz ist die flächendifferenzierte Abbildung der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag, Evapotranspiration und Abfluss von Interesse. Dabei werden die räumlichen Verteilungsmuster der Bilanzgrößen analysiert und der Einfluss der jährlichen Niederschlagssumme auf die Verdunstung und Abflusshöhe untersucht, indem am Beispiel eines für den Oberharz relativ trockenen Jahres (1991) und des niederschlagsreichen Jahres 1998 die Flächenbilanzen miteinander verglichen werden (s. Abbildung 6).

Die regionalisierten Niederschläge zeigen in beiden Jahren eine ähnliche räumliche Verteilung. Die höchsten Niederschlagssummen werden auf dem westlichen Kammbereich gemessen, ein lokales Minimum befindet sich auf den nordexponierten Hanglagen. Innerhalb des Einzugsgebietes „Lange Bramke“ treten Unterschiede in der jährlichen Niederschlagssumme von knapp 100 mm auf. Die simulierte Evapotranspiration weist größere räumliche Unterschiede im Vergleich zur Niederschlagsverteilung auf. Das räumliche Verteilungsmuster bildet überwiegend die unterschiedliche Bestandesentwicklung im Untersuchungsgebiet nach. Die höchsten Verdunstungssummen werden auf den südexponierten Hängen der Abteilung 366 berechnet (s. Abbildung 6). Hier sind die ältesten Bestände mit der höchsten Bestandesdichte anzutreffen (s. Abbildung 2). Die Freiflächen fallen durch ihre unterdurchschnittliche Verdunstungsleistung auf. Folglich werden auf diesen Flächen die höchsten Abflusssummen erzeugt, die allerdings aufgrund der bodenphysikalischen Eigenschaften nahezu komplett versickern und als Grundwasserabfluss dem Vorfluter zugeführt werden.

Oberflächenabfluss tritt im Untersuchungsgebiet selten auf und wird bei einzelnen Ereignissen als Sättigungsflächenabfluss im Bereich der Talaue simuliert.

Der Vergleich der Jahresbilanzen zeigt, dass auch in relativ trockenen Jahren der Boden ausreichend pflanzenverfügbares Wasser bereitstellt, so dass die Evapotranspiration während der Vegetationsperiode kaum eingeschränkt wird. So ist es nicht überraschend, dass die Verdunstungssumme im Jahr 1991 mit 658 mm knapp 200 mm über der Evapotranspiration des Jahres 1998 liegt. So wird die Verdunstungsleistung nicht durch den Bodenwasservorrat, sondern vielmehr maßgeblich durch den strahlungs- und temperaturabhängigen Energieeintrag gesteuert. Infolgedessen werden im Jahr 1998 trotz hoher Niederschläge von 1698 mm nur 466 mm über die Evapotranspiration aus dem Gebiet abgeführt. Der überwiegende Anteil des Niederschlags gelangt über den Grundwasserabfluss in den Vorfluter.

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 ihren langfristigen Folgen auf den Wasserhaushalt quantifiziert und bewertet werden können.

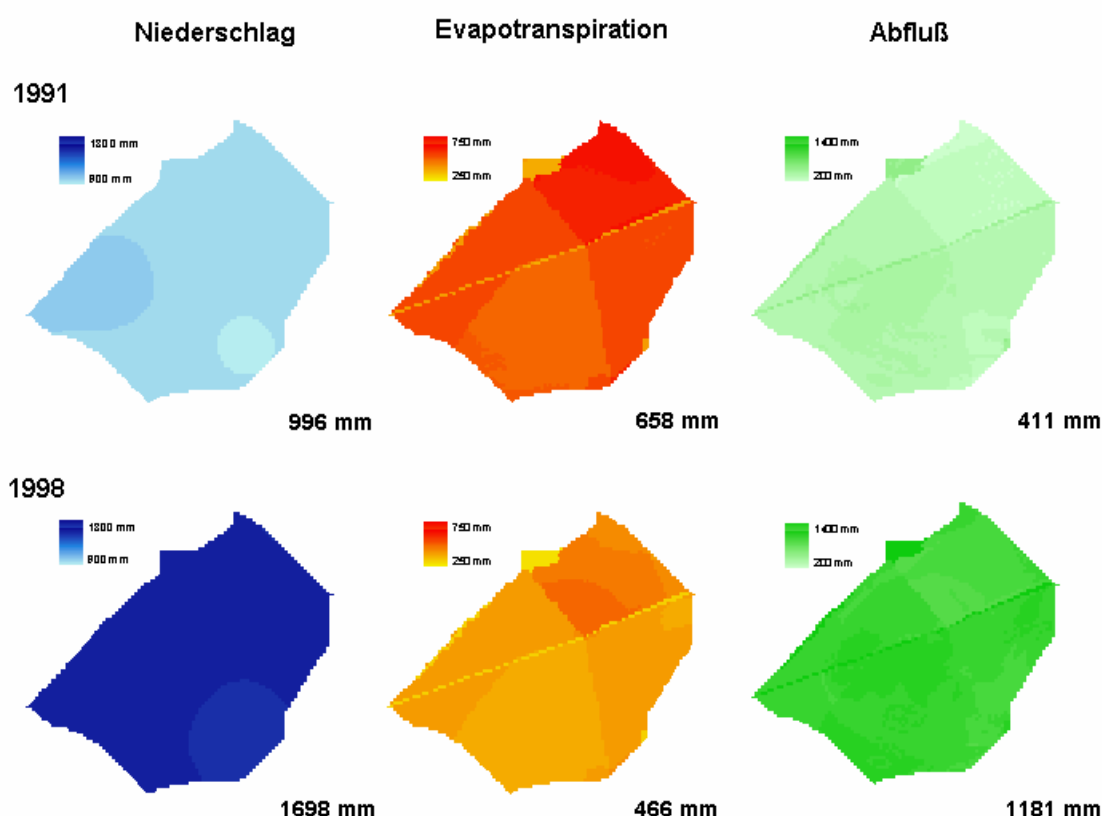


Abb. 6: Regionalisierte Niederschläge und simulierte Evapotranspiration und Abflussmenge im Einzugsgebiet „Lange Bramke“ für die Jahre 1991 und 1998 (in der Abbildung sind die Jahressummen der Wasserbilanz aufgeführt)

5 Fazit

Das Pilotprojekt SILVAQUA kombiniert Modelle, die für unterschiedliche Fragestellungen konzipiert wurden. Durch den modellbasierten Untersuchungsansatz können die Auswirkungen forstlicher Managementstrategien auf den Gebietswasserhaushalt quantifiziert und flächendifferenziert zugeordnet werden. Neben einer allgemeinen Bewertung forstlicher Maßnahmen können diese auch gezielt räumlich optimiert umgesetzt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass Wälder als positiv für den Gewässerschutz anzusehen sind, da sie eine ausgleichende Wirkung auf den Wasserhaushalt ausüben. Wie die Szenariensimulationen jedoch auch belegen, können forstliche Maßnahmen zu Veränderungen im Wasserhaushalt führen. So weisen Buchenbestände im Vergleich zu Fichtenbeständen geringere Interzeptionsverluste auf und tragen damit zu einer erhöhten Grundwasserneubildung bei.

Der nach den aktuellen Bewirtschaftungsrichtlinien des naturnahen Waldbaukonzepts forcierte Waldbau sollte aus wasserwirtschaftlichen Gründen langfristig und nachhaltig angelegt sein. Für das Einzugsgebiet „Lange Bramke“ ist im Wesentlichen darauf zu achten, dass durch forstliche Bewirtschaftungsmaßnahmen im Sinne der WRRL keine Verschlechterung des Gewässerzustandes erfolgt („Verschlechterungsverbot“).

Literatur

- ARBEITSGRUPPE BODEN (1994): BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG (KA4). – 4. AUFL., 392 S.; HANNOVER
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (1988): Oberharzer Untersuchungsgebiete – Bericht über die Untersuchungen in den Jahren 1981 – 1985. Mitteilungen 2 der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- DUDA, H. (2006): Vergleich forstlicher Managementstrategien. Homepage: <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl/?webdoc-1300>
- ETH Zürich (2005): WaSiM-Workshop, ETH Zürich, 17./18.März 2005. Homepage: <http://homepage.hispeed.ch/wasim/index.html>
- HAMMEL, K. & M. KENNEL (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. Forstliche Forschungsberichte München, Nr. 185
- NAGEL, J. (2002): Das Open Source Entwicklungsmodell - eine Chance für Waldwachstumssimulatoren. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten - Sektion Ertragskunde, Jahrestagung Schwarzburg 13-15. Mai 2002, 1-6
- NIEDERSÄCHSISCHE LANDESFORSTVERWALTUNG (1991): „Langfristige Ökologische Waldentwicklung in den Landesforsten“, Programm der Landesregierung, Niedersächsische Landesregierung Hannover, 49 S.
- SCHMIDT, S. (1997): Zusammenhang von Wasser- und Stoffhaushalt in der Langen Bramke – Vergleich unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Maßstäbe. Berichte des Forschungszentrum Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 146.
- SCHULLA, J. (1997): Wasserhaushalts-Simulationsmodell WaSiM-ETH, Anwenderhandbuch, Geogr. Inst. ETH Zürich, unveröff.
- TEEPE, R., DILLING, H. & F. BEESE (2003): Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. J. Plant Nutr. Soil Sci., 166, 111-119
- Van GENUCHTEN (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am., 44, 892-898