

SILVAQUA – Bewertung forstlicher Maßnahmen im Hinblick auf die Zielerreichung der EG-Wasserrahmenrichtlinie und die nachhaltige Waldbewirtschaftung

SILVAQUA – Evaluation of whether silvicultural strategies achieve the objectives of the European Water Framework Directive and sustainable forestry

*Henning Meesenburg, Martin Jansen, Sven Hentschel, Johannes Suttmöller,
Bernd Abrends, Claus Döring und Ursula Rüping*

Zusammenfassung

Ziel des Projekts SILVAQUA war die vergleichende Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Waldbewirtschaftungsmaßnahmen wie Baumartenwahl, Durchforstungs- und Nutzungsintensität, Kalkung sowie spezieller Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerstruktur auf den Wasser- und Stoffhaushalt und den Gewässerzustand vor dem Hintergrund der EG-Wasserrahmenrichtlinie am Beispiel des Einzugsgebiets der Oker im Nordharz.

Für die Regulation des Wasserhaushalts wird empfohlen, nur moderate Veränderungen der Bestandesstruktur vorzunehmen, da ansonsten eine Verschärfung

des Niedrigwasser- bzw. Hochwasserrisikos eintreten könnte. Forstliche Maßnahmen wie beispielsweise die Erhöhung der Nutzungsintensität können das Stickstoffaustragsrisiko nur begrenzt mindern. Zusätzlich ist eine Reduktion der Emissionen notwendig. Für die Randbereiche der Waldgewässer im Untersuchungsgebiet wurde ein Vorschlag für den Umbau der bestehenden vorwiegend standortsfremden Nadelholz- in naturnahe Laubholzbestände erstellt. Die ökonomischen Konsequenzen der verschiedenen untersuchten Waldbewirtschaftungsszenarien wurden quantifiziert. In dem angegliederten Projekt SILVAQUAplus wurden für die verschiedenen forstlichen Wasserschutzmaßnahmen institutionelle Regelungen und deren Instrumente zur Umsetzung verglichen und bewertet.

Stichworte: EG-Wasserrahmenrichtlinie, Wasserhaushalt, Stoffhaushalt, Baumartenwahl, Harz

Abstract

The aim of the project SILVAQUA was to undertake a comparative analysis of effects of various silvicultural measures such as tree species selection, thinning and harvesting intensity, liming, and special measures for the improvement of water and nutrient budgets as well as the ecological status of watercourses in the Oker River Catchment, in the northern Harz Mountains, according to the European Water Framework Directive.

For the regulation of the water budget, management options which produce only moderate changes of stand structure are recommended in order to avoid the intensification of low flows or floods. Forest practices, for example increasing the harvesting intensity, can reduce the risk of nitrogen leaching to a limited extent only. Additional emission reduction measures are necessary. For the riparian areas in the study area, the conversion of existing, largely introduced coniferous stands to near-natural deciduous stands is proposed. The economic implications of the management options investigated were quantified. In the supporting project SILVAQUAplus, institutional regulations and the instruments for the implementation of silvicultural measures designed for water protection were compared and assessed.

Keywords: European Water Framework Directive, water budget, nutrient budget, tree species selection, Harz Mountains

1 Einleitung

Im Vergleich mit anderen Landnutzungsformen ist der Einfluss des Waldes und der forstlichen Bewirtschaftung auf den Zustand der Gewässer als insgesamt günstig anzusehen. Wald erfüllt dabei wichtige Funktionen im Hinblick auf die

Qualität und Quantität von Oberflächengewässern und Grundwasser. Mit einer angepassten Waldbewirtschaftung können diese Funktionen erhalten und verbessert werden (SCHÜLER 2005).

Ziel des Projekts SILVAQUA „Auswirkungen forstlicher Bewirtschaftung auf die Qualität und Quantität von Sicker- und Oberflächengewässer in bewaldeten Einzugsgebieten“ und des angegliederten Projekts SILVAQUAplus „Untersuchungen institutioneller Regelungen und deren Instrumente zur effizienten Umsetzung nachhaltiger Wasserschutzleistungen der Forstwirtschaft“ war die vergleichende Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungsszenarien auf die Bilanzen des Wasser- und Stoffhaushalts und den Gewässerzustand vor dem Hintergrund der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL; EUROPÄISCHES PARLAMENT UND EUROPÄISCHER RAT 2000, MEESENBURG et al. 2005). Dabei sollten sowohl die Maßnahmen identifiziert werden, die negative Auswirkungen auf den Gewässerzustand nach sich ziehen und im Sinne des Verschlechterungsverbots vermieden werden müssen, als auch die Flächen, auf denen sich forstliche Maßnahmen besonders effektiv auf die Verbesserung des Gewässerzustands auswirken. Durch die Verknüpfung mit einer ökonomischen Bewertung wurden daraus kosteneffektive Maßnahmen zur Verbesserung des Gewässerzustands abgeleitet. Folgende forstliche Maßnahmen sind geeignet, den Zustand von Gewässern im Wald, ihrer Quellgebiete sowie der wasserabhängigen Waldökosysteme zu beeinflussen (RÜPING et al., in diesem Band S. 1 ff.):

- Baumartenwahl
- Bestandesbegründung (Naturverjüngung, Pflanzung, Saat)
- Bestandesbehandlung und Hiebssystem
- Umtriebszeiten
- Nutzungsintensität
- Walderschließung (Wegebau, Holzlagerung etc.)
- Bodenschutzkalkung
- Bodenbearbeitung
- Verzicht auf Pflanzenschutzmittel
- Verwendung spezieller Schmierstoffe/Bioöle/Kraftstoffe
- spezielle Maßnahmen zum Gewässerschutz (Verbesserung der Gewässerstruktur, Anlage von Flutmulden etc.)

Die Ergebnisse aus SILVAQUA und SILVAQUAplus zeigen Auswirkungen von Handlungsoptionen auf. Letztere können in die Entwicklung von Bewirtschaftungsplänen zur Umsetzung der EG-WRRL einbezogen werden. Dabei werden mit Hilfe der Simulation von verschiedenen Waldentwicklungsszenarien forstliche Maßnahmen hinsichtlich ihrer Eignung zur Erreichung des Umweltziels „guter Zustand“ der Gewässer beurteilt. Die EG-WRRL führt mit dem „ökologischen Zustand“ einen neuen Bewertungsmaßstab ein, der sich an der Biodiversität und Naturnähe der Gewässer orientiert (EUROPÄISCHES PARLAMENT UND EUROPÄISCHER RAT 2000, BISS et al. 2002). Bis zum Jahr 2015 soll für den überwiegenden

den Teil der natürlichen Fließgewässer mit Hilfe geeigneter Maßnahmen der gute Zustand erreicht werden, für erheblich veränderte natürliche oder künstliche Gewässer entsprechend das gute ökologische Potenzial (BMU 2004).

Für die verschiedenen forstlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen erfolgte eine ökonomische Bewertung. Diese liefert die Datengrundlage, mit deren Hilfe kosteneffiziente Maßnahmenkombinationen abgeleitet werden können, welche der Erreichung der Ziele der EG-WRRL dienen. Weiterhin wurde untersucht, welche institutionellen Regelungen geeignet sind, die entsprechenden Maßnahmen zu realisieren (RÜPING 2009). Im niedersächsischen Landeswald sind durch das LÖWE-Programm bereits Bewirtschaftungsmaßnahmen vorgesehen, die Gewässerschutzkriterien berücksichtigen (NIEDERSÄCHSISCHE LANDESFORSTEN 2006).

Für das Teileinzugsgebiet „Nordharz“ der Oker mit den seit vielen Jahrzehnten hydrologisch und biogeochemisch intensiv untersuchten Teileinzugsgebieten der „Langen“, „Dicken“ und „Steilen Bramke“ wurden zur Ableitung unterschiedlicher Handlungsalternativen vier forstliche Bewirtschaftungsszenarien verglichen, die sich in der Auswahl der Baumarten und Intensität der Eingriffe unterscheiden (HENTSCHEL, in diesem Band). Für die Simulation verschiedener forstlicher Bewirtschaftungsszenarien wurde ein modulares Modellsystem entwickelt. Im Szenario LÖWE erfolgt die waldbauliche Behandlung nach dem Konzept der „Langfristigen ökologischen Waldentwicklung“ der Niedersächsischen Landesforsten (NIEDERSÄCHSISCHE LANDESFORSTVERWALTUNG 1991). Im Szenario PNV (potenziell natürliche Vegetation) ist die Waldbehandlung auf die Erreichung der potenziell natürlichen Waldgesellschaften ausgerichtet. Das Szenario PROZESS (Prozessschutz) unterstellt eine durch Nutzungsverzicht weitgehend gewährleistete unbeeinflusste Waldentwicklung. Im Szenario ERTRAG (ertragsorientierte Waldbewirtschaftung) wird eine Waldbehandlung im Hinblick auf eine stärkere Produktionsorientierung simuliert. Die Szenarien der Bestandesentwicklung dienen als Grundlage für die Simulation des Wasser- und Stoffhaushalts sowie für die ökonomische Bewertung.

Zusätzlich zu den von der EG-WRRL vorgegebenen Zeitpunkten (2015, 2021 und 2027) wurde eine Simulation bis zum Jahr 2053 gerechnet, da Waldentwicklungsprozesse langsam ablaufen und daher die Zieltermine der EG-WRRL eher nur Zwischenschritte auf dem Weg zu einem an Gewässerschutzziele angepassten Waldaufbau sind.

Das gesamte Modellsystem mit hydrologischen, waldwachstumkundlichen, stoffhaushaltlichen und ökonomischen Modulen ist durch die Verwendung von statistischen oder auf physikalischen und chemischen Gesetzmäßigkeiten beruhenden Methoden auf andere Regionen Niedersachsens und darüber hinaus übertragbar. Die Verfügbarkeit der benötigten Eingangsdaten kann die Anwendung jedoch einschränken.

2 Regulation des Wasserhaushalts durch forstliche Bewirtschaftung

Im Bereich der Wasserhaushaltsanalyse standen Fragen der Wassermenge und Abflussdynamik im Vordergrund. Für den mengenmäßig guten Zustand der Gewässer im Sinne der EG-WRRL sind insbesondere Extremereignisse wie Hochwasser und Trockenperioden von Relevanz. Forstliche Maßnahmen, die in den bewaldeten Bereichen des Okereinzugsgebietes durchgeführt werden, sind vor diesem Hintergrund dahingehend zu bewerten, ob sie eine Verschlechterung in der Abflussdynamik und Grundwasserneubildung zur Folge haben („Verschlechterungsverbot“).

Mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH wurde für das Untersuchungsgebiet „Teilbereich Nordharz“ der Landschaftswasserhaushalt simuliert. Das verwendete Modell wurde bereits in verschiedenen anderen Einzugsgebieten erfolgreich angewendet (ETH ZÜRICH 2005). Neben hochalpinen Wassereinzugsgebieten wurde das Modell auch in überwiegend grundwasserbeeinflussten Gebieten eingesetzt (GURTZ et al. 2003, KRAUSE u. BRONSTERT 2005). Auf unterschiedlichen räumlichen Skalen (< 1 bis > 1.000 km²) werden dabei die Prozesse des Wasserhaushaltes regional differenziert abgebildet (FIEBIGER et al. 2008, JASPER u. KAUFMANN 2003). Die Übertragbarkeit auf Einzugsgebiete unterschiedlicher Größe und Gebietsausstattung ist somit gewährleistet (SUTMÖLLER et al. 2007).

In Bezug auf die EG-WRRL liefern die Wasserhaushaltsmodellierungen Aussagen zu:

- den Auswirkungen forstlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Gebietswasserhaushalt (Abfluss, Verdunstung) und dessen Veränderung infolge von Nutzungseingriffen und Änderungen in der Baumartenzusammensetzung
- flächendifferenzierten Bilanzierungen der Wasserhaushaltskomponenten, um Veränderungen der Wasserflüsse durch Maßnahmen auf der Planungsebene (Forsteinrichtung) quantifizieren zu können
- der Bewertung waldbaulicher Maßnahmen unter den Vorgaben der EG-WRRL

Die Ergebnisse von Wasserhaushaltssimulationen in Hessen zeigen, dass Wälder positiv für den Gewässerschutz anzusehen sind, da sie eine ausgleichende Wirkung auf den Wasserhaushalt ausüben (SUTMÖLLER et al. 2009). Wie die Szenariensimulationen zu unterschiedlichen Waldbehandlungsstrategien jedoch auch belegen, können forstliche Maßnahmen zu mehr oder weniger starken Veränderungen des Wasserhaushalts führen (MEESENBURG et al. 2010, SUTMÖLLER u. MEESENBURG, in diesem Band). Insbesondere die Baumartenwahl und die Bestandesbehandlung können eine nachhaltige Veränderung im Wasserhaushaltsgefüge bewirken, wie die hier untersuchten Waldentwicklungsszenarien belegen.

Aus wasserwirtschaftlichen Gründen sollten Waldumbaumaßnahmen nach den Bewirtschaftungsrichtlinien ökologischer Waldbaukonzepte langfristig angelegt werden, um nachhaltige Wirkungen zu erzielen. Aus hydrologischer Sicht stellen die beiden Waldentwicklungsszenarien LÖWE und PNV gemäßigte Varianten dar, da bei beiden Bewirtschaftungskonzepten aufgrund der moderaten Nutzungseingriffe und Waldumbaumaßnahmen keine übermäßigen Veränderungen im Wasserhaushalt des Untersuchungsgebietes zu erwarten sind (SUTMÖLLER u. MEESENBURG, in diesem Band). Das Szenario ERTRAG und insbesondere das PROZESS-Szenario führen dagegen im Vergleich zum Status quo zu stärkeren Veränderungen im Wasserhaushalt. Eine Verminderung der Grundwasserneubildung (PROZESS) bzw. eine Zunahme des Hochwasserrisikos (ERTRAG) kann demnach nicht ausgeschlossen werden.

Aus dem Vergleich der Wasserbilanzen bei unterschiedlichen forstlichen Bewirtschaftungsstrategien lässt sich die Empfehlung nach ausgewogenen Bestandesdichten ableiten. Zu lichte Bestände begünstigen das verstärkte Aufkommen der Bodenvegetation, deren Konkurrenz um Licht und die Bodenwasservorräte die natürliche Verjüngung behindern kann (SUTMÖLLER et al. 2009). Zu dichte Bestände führen infolge erhöhter Interzeption und Transpiration zur Verminderung der Grundwasserneubildung (FIEBIGER et al. 2008). Generell ist der Aufbau und Erhalt stabiler Bestände anzustreben, die auch gegenüber zukünftigen Klimaänderungen widerstandsfähig sind (SPELLMANN et al. 2007).

Die Untersuchungen zum Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Oker, „Teilbereich Nordharz“ konnten zeigen, wie forstliche Bewirtschaftung den Gewässerhaushalt verändern kann. Unter Berücksichtigung der Zielsetzung der EG-WRRL können für das Untersuchungsgebiet Empfehlungen für das forstliche Management gegeben werden, die einen nachhaltig guten Zustand der Gewässer im wasserwirtschaftlichen Sinn gewährleisten. Mit dem gewählten Modellansatz lassen sich ohne weiteres Fragen des Klimawandels klären und auf dieser Basis Anpassungsstrategien für die Forstwirtschaft ableiten (SUTMÖLLER et al. 2009, MEESENBURG et al. 2010).

3 Optimierung der Nachhaltigkeit der Stoffkreisläufe

Ein zentrales Ziel der EG-WRRL ist die Reduzierung von Schadstoffbelastungen des Grundwassers und der Oberflächengewässer. Schadstoffeinträge in die Gewässer können entweder als direkte (punktuelle Einträge) oder aber als diffuse Einträge erfolgen (WIENHAUS et al. 2008). Bei den Stoffeinträgen aus den Wäldern und infolge der forstlichen Bewirtschaftung handelt es sich fast ausschließlich um diffuse Eintragungspfade. In den letzten Dekaden des vorigen Jahrhunderts galt das Augenmerk besonders der depositionsbedingten Boden- und Gewässerversauerung. Hierbei stand insbesondere die Sorge vor erhöhten Mangan- und Aluminiumbelastungen des Grundwassers im Fokus (JANKOWSKI et al. 2007). Auch

wenn Emissionsminderungsmaßnahmen zu einer drastischen Reduktion der Säuredepositionen geführt haben, schreitet die Versauerung der Sickerwasserleiter z. T. immer noch voran, da zusammen mit den Schwefeldepositionen auch die Depositionen basischer Kationen stark zurückgegangen sind und remobilisierter Schwefel zu einer zusätzlichen Säurebelastung führt (ALEWELL et al. 2000). Somit ergibt sich die Notwendigkeit, Kompensationsmaßnahmen wie z. B. Kalkungen für die entsprechenden Standorte zu prüfen (JANSEN et al. 2007).

Neben der starken Säurebelastung unserer Waldökosysteme wurde in den letzten Jahrzehnten beobachtet, dass die Stickstoffausträge in das Grundwasser z. T. deutlich zugenommen haben. In einigen Regionen werden aktuell die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung in den Sickerwässern unter Wald überschritten (HORVATH et al. 2005, HORVATH et al. 2009, MELLERT et al. 2005). Da die Critical Loads für Stickstoff in Mitteleuropa weiterhin weiträumig überschritten werden, ist auch in Zukunft mit einer zunehmenden Stickstoffsättigung der Wälder und einem damit erhöhten Risiko von unerwünschten Nitratausträgen zu rechnen (MACDONALD et al. 2002).

Im EG-WRRL Pilotprojekt SILVAQUA wurde ein flächenhaft anwendbarer modularer Modellansatz zur Simulation der Wirkungen forstlicher Maßnahmen auf diffuse Stoffausträge aus Wäldern entwickelt (AHRENDTS, in diesem Band S. 95 ff. und AHRENDTS, in diesem Band S. 115 ff.). Dabei werden die wesentlichen Stoffumsatzprozesse in bewaldeten Einzugsgebieten wie Stoffeinträge und -austräge, Nährstoffaufnahme des Bestandes, Silikatverwitterung und Immobilisation berücksichtigt. Die Parametrisierung erfolgt auf der Basis verfügbarer Bestandes- und Standortskenngrößen. In dem Modellansatz sind zahlreiche Modelle (VSD, MAKEDEP, PROFILE, A2M), Verfahren (DEPOSILVA) und Methoden des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS[®]) miteinander gekoppelt, so dass zu den Fragestellungen der EG-WRRL für Waldflächen flächendeckende Aussagen getroffen und mögliche zukünftige Entwicklungen aufgezeigt werden können. So ermöglicht z. B. der Regionalisierungsansatz zur Schätzung der atmosphärischen Deposition eine verbesserte räumliche Differenzierung der Stickstoffeinträge auf Bestandesebene (AHRENDTS et al. 2007). Der Modellansatz ermöglicht die Lokalisierung von prioritären Suchgebieten für eine Maßnahmenoptimierung im Sinne der EG-WRRL und ermöglicht, waldbauliche Maßnahmen hinsichtlich ihrer Auswirkungen und Erfolgsaussichten für den Gewässerschutz zu bewerten. Dieses wurde beispielhaft für die Baumartenwahl, die Umtriebszeit und Nutzungsvarianten durchgeführt (AHRENDTS et al. 2010).

Für die Forstwirtschaft sollen die Modellrechnungen den Rahmen vorgeben, in dem sich die Planungen forstlicher Maßnahmen bewegen können, um eine Minimierung der stofflichen Belastung des Sickerwassers zu erreichen. Dabei sollen forstliche Bewirtschaftungseinheiten identifiziert werden, die durch ein erhöhtes Versauerungs- und Auswaschungsrisiko von Nitrat gekennzeichnet sind (AHRENDTS et al. 2008, 2009). In diesen Gebieten können in Zukunft anstehende

waldbauliche Maßnahmen im Hinblick auf ihre Wirkung auf die Gewässerqualität bewertet und ausgewählt werden (AHRENDTS et al. 2010).

Die Stoffhaushaltssimulationen ermöglichen in Bezug auf die EG-WRRL folgende Abschätzungen:

- Die Lokalisierung und Einschätzung der Belastungssituationen durch Stickstoff- und Säureeinträge (vgl. EG-WRRL, Anhang II, 1.4)
- Die Ausweisung von Einzugsgebieten mit erhöhtem Grundwassergefährdungspotenzial durch Abschätzung der mittleren Stickstofffrachten im Sickerwasser für forstwirtschaftlich genutzte Flächen (vgl. EG-WRRL, Anhang II, 2.1)
- Die Einschätzung der Auswirkungen forstlicher Maßnahmen auf die Grundwasserqualität und damit auch indirekt die Auswirkungen anthropogener Landnutzungsänderungen auf die Qualität der Grundwasserneubildung (vgl. EG-WRRL, Anhang II, 2.2g)
- Die Bewertung von forstlichen Maßnahmen (Baumartenwahl, Bestandesstruktur, Nutzungsintensität, Kalkung, Kahlschlag, usw.) in Hinblick auf die Gewässerqualität

Hinsichtlich der atmosphärischen Stoffeinträge lässt sich das Okereinzugsgebiet „Teilbereich Nordharz“ in drei Bereiche untergliedern: einen relativ gering belasteten Bereich im Nord-Osten und an den nördlichen Grenzen des Untersuchungsgebietes, den nördlichen und mittleren Teil mit mittleren Belastungen und den Süden des Gebietes mit stärksten Beeinträchtigungen durch atmosphärische Stickstoffeinträge. Auf den nährstoffarmen Standorten ist mit einer weiteren Versauerung der Böden und in deren Folge mit dem Risiko einer Versauerung des Grundwassers zu rechnen. Auf diesen Standorten können bereits geringe Nutzungsintensitäten langfristig zu kritischen Situationen hinsichtlich der Baumernährung führen, so dass hier weitere Kalkungen zum Ausgleich der versauerungsbedingten Nährstoffverluste notwendig erscheinen.

Entsprechend der Belastungssituation zeigen auch die modellierten Stickstoffausträge für die Waldflächen des Untersuchungsgebietes vorwiegend auf den südlichen und zentral gelegenen Flächen erhöhte Stickstofffrachten im Sickerwasser (AHRENDTS, in diesem Band S. 115 ff.). Die Simulationen für die verschiedenen Waldentwicklungsszenarien lassen für die Zukunft im Mittel leicht abnehmende Stickstoffausträge erwarten. Eine positive Entwicklung der Stickstofffrachten ist im Wesentlichen aufgrund von zwei Faktoren zu erwarten: zum einen durch die Reduzierung der Stickstoffdeposition aufgrund von Emissionsminderungsmaßnahmen, zum anderen aus der Erwartung einer auch zukünftig hohen Stickstoffimmobilisation im Auflagehumus und Oberboden. Diese Annahme ist jedoch mit großen Unsicherheiten belastet. Sollte sich die N-Retention durch veränderte Umweltbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit) zukünftig abschwächen, so ist mit einer zunehmenden flächenhaften Belastung der Gewässer mit mineralischen Stickstoff zu rechnen. Daher sind die Ergebnisse der Simulationen keinesfalls als

Entwarnung für die zukünftige Entwicklung der Sickerwasserqualität anzusehen, da die zunehmende Anreicherung von Stickstoff im Boden ein langfristiges Gefährdungspotenzial darstellt.

Durch die Verknüpfung der ermittelten Stickstofffrachten mit den Abflussmengen können zusätzlich Aussagen hinsichtlich einer Veränderung der chemischen Qualität der Oberflächengewässer durch forstliche Maßnahmen getroffen werden.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, dass Baumartenwechsel nach Erreichen der ökonomisch optimalen Umtriebszeit insgesamt nur geringe Auswirkungen hinsichtlich der Gewässerqualität haben. Bei einem Wechsel von fichten- zu buchendominierten Beständen stehen geringere Nitratausträge aus Buchenaltbeständen erhöhten Austrägen im Zeitraum nach dem Umbau gegenüber. Diese Erhöhung resultiert überwiegend aus der geringen Stickstoffaufnahme von jungen Buchen. Der Bestandesstruktur kommt im Vergleich zum Baumartenwechsel eine größere Bedeutung hinsichtlich der Gewässerqualität zu. Nach den Ergebnissen der Simulationen hat die Bestandeshöhe als strukturbeschreibende Größe einen größeren Einfluss auf die Stickstoffdeposition als die Baumart. So liegen die Stickstoffeinträge in Altbeständen je nach Baumart etwa um den Faktor 2 höher als in Jungbeständen.

Auf nährstoffarmen Standorten sind, soweit noch nicht geschehen, zusätzliche Kalkungen notwendig, um die Basensättigung in den Böden wieder anzuheben und somit der Gefahr einer Versauerung des Grundwassers zu begegnen. Damit können gleichzeitig kritische Situationen hinsichtlich der Baumernährung vermieden werden. Nach Untersuchungen in der „Steilen Bramke“ ergeben sich selbst bei einer hochdosierten Kalkung von 16 t ha^{-1} keine zusätzlichen Gewässerbelastungen durch mobilisierten Stickstoff (MEESENBURG et al. 2002).

Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass es in den ersten Jahren nach Kahlschlägen häufig zu starken Anstiegen der Stickstoffbelastungen im Sickerwasser kommt (PARDO et al. 1995, ROTHE u. MELLERT 2004). Daher sollte diese Hiebsform, wie auch starke Störungen der Humusaufgaben, auf bestimmte waldbauliche Ausgangssituationen beschränkt bleiben.

Durch die zusätzliche Nutzung weiterer Biomassekompartimente wie z. B. Astholz und Reisig wird die Gefahr des Stickstoffaustrags reduziert (ASCHE et al. 2007). Da sich jedoch bei einer solchen Maßnahme auch der Export anderer Nährstoffe (z. B. K, Mg, Ca, P) erhöht, sollte diese Maßnahme nur auf nährstoffreichen Standorten oder in Kombinationen mit Kalkungen – evtl. mit Beigabe von P – durchgeführt werden.

4 Forstliche Maßnahmen zur Erreichung eines guten ökologischen Zustands der Gewässer

Neben forstlichen Maßnahmen zur Minderung von diffusen Stoffeinträgen in Gewässer sind insbesondere Maßnahmen zur Entwicklung der Gewässerstruktur geeignet, den ökologischen Zustand kleinerer Waldbäche und ihrer Quellgebiete sowie wasserabhängiger Waldökosysteme zu verbessern. Eine wesentliche Komponente ist dabei der Umbau von als naturfern einzustufenden Waldbeständen in Gewässernähe in naturnähere Bestockungen (BMU 2007, UMWELTBUNDESAMT 2008). Für den niedersächsischen Landeswald sind entsprechende Maßnahmen bereits durch das LÖWE-Waldbauprogramm vorgesehen (NIEDERSÄCHSISCHE LANDESFORSTEN 2006).

Einen bedeutsamen Einfluss auf den ökologischen Gewässerzustand haben dabei Waldbestände im unmittelbaren Gewässerrandbereich und in den Auenbereichen der Fließgewässer. Positive Wirkungen sind insbesondere zu erwarten, wenn ausreichender Raum für eine eigendynamische oder gelenkte Gewässerentwicklung vorhanden ist. Der Aufbau naturnaher Bestandesstrukturen, eine angepasste Bewirtschaftungsintensität und ein erhöhtes Totholzaufkommen können den ökologischen Gewässerzustand verbessern, zumal sich Maßnahmen auch auf die unterliegenden Gewässerabschnitte auswirken (BMU 2007). Bei allen Maßnahmen sind allerdings mögliche forstliche Mindererträge zu beachten.

Im Sinne eines Maßnahmenkonzeptes sollten in die Planung auch strukturelle Beeinflussungen durch Waldwegebau, Befahrung, Gewässerausbau und Unterhaltung einbezogen werden. Der forstliche Wegebau kann effektive Beiträge zum Erosionsschutz leisten, indem die Befestigungen so durchgeführt werden, dass keine Einträge von gebietsfremden oder gewässerschädigenden Stoffen erfolgen. Gewässerquerungen müssen so ausgeführt werden, dass die Durchgängigkeit langfristig sichergestellt ist.

Für einen kosteneffizienten Mitteleinsatz im Sinne der EG-WRRL sind prioritär solche Gewässerabschnitte auszuwählen, in denen eine hohe ökologische Wirkung erzielt werden kann (INTERWIES et al. 2004). Je höher der Anteil naturferner Baumarten ist, desto höher ist das Potenzial, durch einen ökologischen Waldumbau zu einer Verbesserung der Gewässerqualität beizutragen. Da Teile der Oker als überregional bedeutsame Wanderrouden für die Fischfauna ausgewiesen sind, sollten Waldumbaumaßnahmen prioritär im Bereich der – potenziellen – Laich- und Entwicklungshabitate stattfinden.

Die Untersuchung spezieller forstlicher Maßnahmen zum Gewässerschutz ermöglichen in Bezug auf die EG-WRRL folgende Abschätzungen:

- Die Identifizierung von naturfernen Bestockungen im Gewässerrand- bzw. Auenbereich der Gewässer
- Vorschläge für den zeitlichen Ablauf von möglichen Waldumbaumaßnahmen im Gewässerrandbereich

- Eine Abschätzung der ökonomischen Kosten von Waldumbaumaßnahmen im Gewässerrandbereich
- Die Abschätzung der Relevanz forstlicher Maßnahmen für den Gewässerschutz

Für die Waldgewässer im Okereinzugsgebiet „Teilbereich Nordharz“ wurden im Rahmen von SILVAQUA mit einem GIS-gestützten Modellierungsansatz der Umbau von Gewässerrandstreifen mit naturfernen Waldbeständen zu naturnahen Bestockungen simuliert. Auf der Basis eines Modells der potenziell natürlichen Vegetation wurden zunächst die Flächen identifiziert, die für einen Umbau in Frage kommen. Darauf aufbauend wurde schrittweise ein Umbau dieser Flächen im Umfang von 506 ha in naturnahe Gewässerrandstreifen mit Erlenbestockung simuliert. Naturnah bestockte Gewässerrandstreifen sind insbesondere für kleinere Fließgewässer ökologisch wertvolle Pufferbereiche. Neben ihrer Filterfunktion verbessern sie die Gewässerstruktur und dienen zudem der Habitatvernetzung.

5 Einsatz ökonomischer Instrumente

Die EG-WRRL ist eine der ersten umweltpolitischen Richtlinien der EU, die explizit auf ökonomische Instrumente verweist, um die von ihr gesetzten Ziele zu erreichen. Ökonomische Instrumente umweltrechtlicher Steuerung sind dadurch gekennzeichnet, dass für ein bestimmtes gewünschtes Verhalten ein wirtschaftlicher Vorteil in Aussicht gestellt und schließlich auch gewährt wird. Der Einzelne kann nunmehr – anders als im ordnungsrechtlichen gesteuerten Umweltrecht – zwischen verschiedenen Varianten legalen Verhaltens unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eigenverantwortlich wählen (HENDLER 2001). Grundlagen dafür werden in der von der EG-WRRL geforderten wirtschaftlichen Analyse geschaffen (INTERWIES u. KRAEMER 2002).

Durch die Bestandsaufnahme für alle Wasserkörper wurden der Zustand, die signifikanten Belastungen und die Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung der EG-WRRL bis 2015 festgestellt. Darauf aufbauend müssen Maßnahmen identifiziert werden, die zur Erreichung der Umweltziele oder zum Erhalt des guten Zustands führen können. Bis Ende 2009 waren für jede Flussgebietseinheit Maßnahmenprogramme aufzustellen. Die Maßnahmen müssen bis spätestens Ende 2012 in die Praxis umgesetzt sein. Das Geschehen in den Flussgebietseinheiten wird über umfassende Bewirtschaftungspläne (Art. 13 und Anhang VII EG-WRRL) gesteuert. Die Richtlinie nennt Qualitätsziele, die auf Flusseinzugsgebiete bezogene Bewirtschaftungspläne erfordern. Die Bewirtschaftungspläne waren bis Ende 2009 zu erstellen und zu veröffentlichen (vgl. Art. 13 EG-WRRL). Diese müssen u. a. Maßnahmenprogramme (Art. 11 EG-WRRL) als zentrale Elemente zur Erreichung dieser Qualitätsziele beinhalten.

Waldbewirtschaftung kann in besonderem Maße der Zielsetzung der EG-WRRL dienen. Gezielte und effiziente Maßnahmen der Waldbewirtschaftung im

Sinne der EG-WRRL, die die Anforderungen an eine ordnungsgemäße Forstwirtschaft übersteigen, begründen jedoch einen Anspruch auf Ausgleich der zusätzlichen Kosten bzw. Ertragsverluste (RÜPING u. MÖHRING 2008). Das im Rahmen des Projektes SILVAQUA entwickelte ökonomische Bewertungskonzept schafft die Voraussetzungen für die Quantifizierung forstlicher Wasserschutzleistungen und dient damit insbesondere zur Herleitung der kosteneffizientesten Kombination der in das Maßnahmenprogramm aufzunehmenden forstlichen Maßnahmen.

Ziel des ökonomischen Teilprojektes war die Entwicklung eines Bewertungsverfahrens, mit dem forstliche Wasserschutzmaßnahmen und alternative Bewirtschaftungsstrategien der Forstwirtschaft, die unterschiedliche Auswirkungen auf die Quantität und Qualität der Gewässer haben, betriebswirtschaftlich quantifiziert werden (MÖHRING u. RÜPING 2006). Mit Hilfe des entwickelten Bewertungsmodells können speziell auf den Gewässerschutz ausgerichtete waldbauliche Maßnahmen der Forstwirtschaft, hinsichtlich der Maßnahmenkosten, Mehraufwendungen bzw. Mindererträge des Forstbetriebes bewertet werden. Das forstliche Bewertungskonzept bildet eine Grundlage für eine leistungsorientierte kosteneffiziente Honorierung von Gewässerschutzmaßnahmen bei einer nutzungsübergreifenden Betrachtung. Somit können die bereits etablierten und standardisierten landwirtschaftlichen Gewässerschutzmaßnahmen (s. sog. Blaubuch der LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN 2008) um forstliche Maßnahmen ergänzt werden, so dass eine Herleitung einer kosteneffizienten Maßnahmenkombination für gesamte Einzugsgebiete möglich wird.

Weiterhin lassen sich aus den Ergebnissen einer Untersuchung von institutionellen Regelungen zur Umsetzung von forstlichen Gewässerschutzmaßnahmen Instrumente ableiten, die die Umsetzung von Maßnahmen zur Erreichung der Ziele der Wasserrahmenrichtlinie unterstützen (GUTSCHE 2008, RÜPING 2009, RÜPING et al., in diesem Band S. 189 ff.).

In Bezug auf die EG-WRRL ermöglichen das SILVAQUA-Teilprojekt „Ökonomische Bewertung“ sowie das Projekt SILVAQUAplus „Untersuchungen institutioneller Regelungen und deren Instrumente zur effizienten Umsetzung nachhaltiger Wasserschutzleistungen der Forstwirtschaft“ insbesondere:

- Die Herleitung der Kosten der forstlichen Wasserschutzleistungen (forstliche Maßnahmen wie u. a. Baumartenwahl, waldbauliche Behandlungsstrategie, Steuerung der Nutzungsintensität, Kalkung, Gewässerstrukturmaßnahmen) und damit Berücksichtigung des Grundsatzes der Deckung der Kosten nach Artikel 9 EG-WRRL
- Einen Beitrag zur Herleitung einer kosteneffizienten Kombination (Anhang III, b) der in das Maßnahmenprogramm nach Artikel 11 EG-WRRL aufzunehmenden forstlichen Maßnahmen

- Die Darstellung von institutionellen Regelungen zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie und Beschreibung lokal angepasster marktkonformer Instrumente zur Steigerung der Effizienz umweltpolitischer Maßnahmen

Speziell auf den Gewässerschutz ausgerichtete forstliche Maßnahmen führen meistens zu Abweichungen von der planmäßigen forstlichen Bewirtschaftung und demzufolge zu zusätzlichen Maßnahmenkosten oft in Verbindung mit zukünftigen Mindererträgen für die Forstbetriebe, also zu Ertragsverlusten für die Forstbetriebe, die als Grenzpreise für die wasserwirtschaftlichen Leistungen der Forstwirtschaft interpretiert werden können. Ein Vergleich der durchschnittlichen Ertragsverluste, die sich im Einzugsgebiet der Oker „Teilbereich Nordharz“ aufgrund von unterschiedlichen Bewirtschaftungsstrategien ergeben, verdeutlicht, dass ein vorzeitiger Umbau der Nadelbaumbestände (Verkürzung der Produktionszeit) und der anschließende Baumartenwechsel zu Buche zu den größten Ertragsverlusten führt. Auch ein Baumartenwechsel von Fichte zu Buche nach Erreichen der ökonomischen Umtriebszeit führt zu hohen Ertragsverlusten für den Forstbetrieb. Geringere Ertragsverluste entstehen, wenn sich die Umtriebszeiten verschieben (wie z. B. eine 10 %ige Verlängerung der Umtriebszeiten oder auch 20 %ige Verkürzung der Umtriebszeiten). Eine Umstellung auf Vollbaumnutzung im gesamten Untersuchungsgebiet führt im Vergleich zu den anderen Bewirtschaftungsszenarien zu mittleren Ertragsverlusten (RÜPING 2009).

Die Ergebnisse der ökonomischen Betrachtung einer Gewässerstrukturmaßnahme im Einzugsgebiet der Oker „Teilbereich Nordharz“ zeigen, dass ein sofortiger Waldumbau in einen naturnahen Uferbewuchs auf einem 30 m breiten Gewässerrandstreifen zu relativ hohen Ertragsverlusten führt. Dabei wurde unterstellt, dass die derzeitigen noch nicht hiebsreifen Nadelbaumbestände vorzeitig genutzt werden. Die Ertragsverluste für den Forstbetrieb würden sich um den Ertragsverlust aufgrund vorzeitiger Ernte reduzieren, wenn die entsprechenden Nadelbaumbestände erst bei Erreichen der ökonomischen Umtriebszeit in Erlenbestände umgewandelt werden. Auch würde sich der Ertragsverlust verringern, wenn der Forstbetrieb die gepflanzten Erlen auch zukünftig weiter nutzen würde. Bei Umwandlung nach Erreichen der Umtriebszeit und extensiver Nutzungen der Erlenbestände würden sich beispielsweise die Kosten für den Umbau der 506 ha Gewässerränder im Einzugsgebiet der Oker im Nordharz auf ca. 2,1 Mio. € belaufen. Das entspricht einem jährlichen Ertragsverlust für den Forstbetrieb von 84 €/ha für einen Zeitraum von 90 Jahren. Wenn der Forstbetrieb die Kulturkosten von 2.500 €/ha z. B. im Rahmen einer forstlichen Förderung oder aus Mitteln der Wasserentnahmegebühr erstattet bekommt, dann reduziert sich der Ertragsverlust aufgrund des Erlenanbaus auf den 30 m breiten Gewässerrandstreifen auf ca. 830.000 €.

Hinsichtlich der Umsetzung von wasserwirtschaftlichen Leistungen im Wald ist davon auszugehen, dass Forstbetriebe diese anbieten, wenn sie dafür eine ent-

sprechende Vergütung erhalten. In Niedersachsen bietet die Wasserentnahmegebühr eine wichtige Finanzierungsquelle für Wasserschutzmaßnahmen. Der größte Anteil wird derzeit für die Finanzierung des Niedersächsischen Kooperationsmodells Trinkwasserschutz verwendet, wobei die Mittelvergabe auf der Grundlage der landwirtschaftlichen Nutzfläche innerhalb der Kooperation erfolgt. RÜPING (2009) leitete aus der Untersuchung der institutionellen Regelungen mithilfe des Transaktionskostenansatzes ab, dass Wasserschutzkooperationen zur Umsetzung der wasserwirtschaftlichen Leistungen der Forstwirtschaft als geeignet erscheinen. Für die strategische Positionierung der Forstwirtschaft im Bereich des Wasserschutzes ist es daher erstrebenswert, dauerhafte Kooperationen zwischen Forst-, Land- und Wasserwirtschaft zu gründen. Für bestimmte Regionen (Wasserschutzgebiete bzw. Wassereinzugsgebiete) können durch die Einbeziehung forstlicher Wasserschutzleistungen und Optimierung auf Raumbene Kombinationen aus forst- und landwirtschaftlichen Maßnahmen gefunden werden, die im Verhältnis zu den Kosten die höchste ökologische Wirkung erzielen. Damit kann die Finanzierung der Wasserschutzmaßnahmen aus der Wasserentnahmegebühr unter den Aspekten der wasserwirtschaftlichen Effektivität und betriebswirtschaftlichen Effizienz erfolgen.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ergebnisse der Modellrechnungen im Rahmen von SILVAQUA zeigen, dass bei anhaltend hohen atmosphärischen Stoffeinträgen die waldbaulichen Möglichkeiten zum Schutz und Erhalt der Gewässerqualität beschränkt sind. Eine langfristige Reduzierung der Stickstoffeinträge kann nur durch entsprechende Emissionsminderungen erreicht werden. Durch forstliche Maßnahmen (Baumartenwahl, Nutzungsintensität) besteht allerdings die Möglichkeit, die Einträge zu begrenzen und die Stickstoffentzüge durch angepasste Nutzungsintensitäten zu erhöhen und somit das Stickstoffretentionspotenzial möglichst langfristig zu nutzen und Austragsspitzen im Abfluss zu mildern.

Das Modellkonzept schließt eine integrierte Kalkungsplanung ein (JANSEN et al. 2007), die eine flächendifferenzierte Bestimmung des Kalkungsbedarfes ermöglicht, weil sie an die Standortbedingungen und die bestandsspezifischen Bewirtschaftungsmaßnahmen angepasst ist, um die Nachhaltigkeit der Stoffkreisläufe zu erhalten.

Die wasserwirtschaftlichen Maßnahmen sollten immer in Bezug auf die konkrete Fläche bzw. den konkreten Bestand ausgerichtet werden. In Abhängigkeit standörtlicher und waldbaulicher Gegebenheiten sowie der Lage im Einzugsgebiet können die Maßnahmen unterschiedliche Auswirkungen auf die Gewässerqualität und Grundwasserneubildungsrate haben (LORZ et al. 2007). Die Auflistung von forstbetrieblichen Wasserschutzleistungen (s. o.) kann insofern nur als potenzieller Handlungsrahmen gesehen werden. Die Integration von ökonomischen und öko-

logischen Kennwerten des Stoff- und Wasserhaushaltes sowie eine räumliche Optimierung ermöglichen die Herleitung von kosteneffizienten Wasserschutzmaßnahmen im Wald.

Die Planung forstlicher Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerqualität sollte sich nicht nur an dem von der EG-WRRL vorgegebenen Zeitrahmen orientieren, sondern auch längerfristige Planungsziele beinhalten. Aufgrund der langen Produktionszeiträume der Forstwirtschaft und der ebenfalls langen Wirkzeiträume von Eingriffen in den Stoffhaushalt von Waldökosystemen lassen sich viele Maßnahmen nur langfristig ökonomisch sinnvoll umsetzen (BfN 2008). Insbesondere die flächenhaften Maßnahmen des ökologischen Waldumbaus wirken sich erst auf einer längerfristigen Zeitskala aus. Die Integration spezieller Maßnahmen zum Gewässerschutz in die zukünftige betriebliche Planung der Forstbetriebe wird empfohlen, um Synergieeffekte zu ermöglichen.

Durch den modularen Bearbeitungsansatz in SILVAQUA ist es möglich, einzelne Modellbausteine sowie den vollständigen Untersuchungsansatz sowohl räumlich auf andere Untersuchungsgebiete als auch thematisch auf zusätzliche Fragestellungen zum Wasser- und Stoffhaushalt von Wäldern zu übertragen. Eine Anwendung in anderen Einzugsgebieten in Niedersachsen erscheint für das Bergland wie für das Tiefland möglich. Zusätzliche Aspekte wie beispielsweise Auswirkungen des Klimawandels sowie daran ausgerichtete Anpassungsstrategien oder naturschutzfachliche Fragestellungen lassen sich in das Modellsystem integrieren.

Literatur

- AHRENDTS, B.; DÖRING, C.; JANSEN, M. u. MEESENBERG, H. (2008): Unterschiedliche Nutzungsszenarien und ihre Auswirkungen auf die Basensättigung im Wurzelraum - Ergebnisse von Szenarienvergleichen in Teileinzugsgebieten der Großen Bramke. *Forst u. Holz*, 63, 32-36
- AHRENDTS, B.; DÖRING, C.; JANSEN, M.; MEESENBERG, H. u. BEESE, F. (2007): Kopplung dynamischer Modelle für die flächenhafte Abschätzung der Stoffdeposition im Wald. *Mitt. Deutsche Bodenkundl. Ges.*, 110, 421-422
- AHRENDTS, B.; MEESENBERG, H.; DÖRING, C. u. JANSEN, M. (2009): Assessment of forest management effects on N-cycling at three basins in the Upper Harz Mountains, Germany. *Landschaftsökologie und Umweltforschung*, 50, 3-7
- AHRENDTS, B.; MEESENBERG, H.; DÖRING, C. u. JANSEN, M. (2010): A spatio-temporal modelling approach for assessment of management effects in forest catchments. *IAHS Publ.*, 336, 32-37
- ALEWELL, C.; MANDERSCHIED, B.; MEESENBERG, H. u. BITTERSÖHL, J. (2000): Is acidification still an ecological threat? *Nature*, 407, 856-857
- ASCHE, N.; DOHMEN, H.; DAME, G.; NOLTE, N. u. HUSEMANN, T. (2007): Grundwasserschutz durch intensivierete Biomassenutzungen: Ein Praxisversuch zum Stickstoffexport aus dem Klever Reichswald. *AFZ/DerWald*, 11, 594-597
- BfN (Hrsg.) (2008): Ökonomische Effizienz im Naturschutz. BfN, Bonn, 216 S.
- BISS, R.; KÜBLER, P.; PINTER, I. u. BRAUKMANN, U. (2002): Leitbildbezogenes biozönotisches Bewertungsverfahren für Fließgewässer in der Bundesrepublik Deutschland. *Texte*, 62/02, 162 S.

- BMU (2004): Die Wasserrahmenrichtlinie – Neues Fundament für den Gewässerschutz in Europa. Umweltpolitik, Kennnummer 3044. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), UBA, Paderborn, 119 S.
- BMU (2007): Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. Reihe Umweltpolitik, 1. Auflage. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, 178 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
- FIEBIGER, C.; SUTMÖLLER, J.; MEESENBURG, H. u. EICHHORN, J. (2008): Wald in der Rhein-Main-Ebene – Risiken und Anpassungsmaßnahmen für die Forstwirtschaft als Folge der prognostizierten Klimaveränderung in Hessen. Abschlussbericht INKLIM 2012 Baustein II plus, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 46 S.
- GURTZ, J.; ZAPPA, M.; JASPER, K.; LANG, H.; VERBUNT, M.; BADOUX, A. u. VITVAR, T. (2003): A comparative study in modelling runoff and its components in two mountainous catchments. *Hydrol. Process.*, 17, 297-311
- GUTSCHE, C. (2008): Untersuchung institutioneller Regelungen zur effizienten Umsetzung nachhaltiger Wasserschutzleistungen in der Forstwirtschaft. Masterarbeit, Georg-August-Universität Göttingen
- HENDLER, R. (2001): Ökonomische Instrumente des Umweltrechts unter besonderer Berücksichtigung der Umweltabgaben. In: DOLDE, K.-P. (Hrsg.) (2001): *Umweltrecht im Wandel: Bilanz und Perspektiven aus Anlass des 25jährigen Bestehens der Gesellschaft für Umweltrecht (GfU)*. Berlin: Schmidt
- HORVÁTH, B.; MEESENBURG, H. u. MEIWES, K.J. (2005): Bestandesspezifische Nitratversickerung unter Wald im Raum Weser-Ems. *Freiburger Forstl. Forschung*, 62, 47-52
- HORVÁTH, B.; MEIWES, K.J. u. MEESENBURG, H. (2009): Die Bedeutung von Baumart und Bestandesalter für die Nitratversickerung unter Wald in der Region Weser-Ems. *Forstarchiv*, 80, 35-41
- INTERWIES, U. u. KRAEMER, R.A. (2002): Ökonomische Aspekte der EU-Wasserrahmenrichtlinie. von Keitz, S. u. Schmalholz, M. (Hrsg.): *Handbuch der EU-Wasserrahmenrichtlinie*. Berlin: Schmidt, 293-319
- INTERWIES, E.; KRAEMER, R. A.; KRANZ, N.; GÖRLACH, B.; DWORAK, T.; BORCHARDT, D.; RICHTER, S. u. WILLECKE, J. (2004): Grundlagen für die Auswahl der kosteneffizientesten Maßnahmenkombinationen zur Aufnahme in das Maßnahmenprogramm nach Artikel 11 der Wasserrahmenrichtlinie. *Texte - Umweltbundesamt*, 02/04, Berlin, 250 S.
- JANKOWSKI, A.; SCHÜLTKEN, H.; HÖLSCHER, J.; WALTHER, W.; CRAMER, T.; REINSTORF, F.; HEBBLACK, K.; MEESENBURG, H.; MEIWES, K.J.; BÖTTCHER, J.; MÜLLER, U.; MALESSA, V. u. AHRENDS, B. (2007): Grundwasserversauerung: Methoden zur Gefährdungsabschätzung und Möglichkeiten zu Gegenmaßnahmen. *Grundwasser* 7, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, 39 S.
- JANSEN, M.; DÖRING, C.; AHRENDS, B.; MEESENBURG, H.; MEIWES, K.J. u. BEESE, F. (2007): Kopplung dynamischer Modelle für die Bodenschutzkalkung im Wald. *Mitt. Deutsche Bodenkundl. Ges.*, 110, 483-484
- JASPER, K. u. KAUFMANN, P. (2003): Coupled runoff simulations as validation tools for atmospheric models at the regional scale. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, 129, 673–692
- KRAUSE, S. u. BRONSTERT, A. (2005): An advanced approach for catchment delineation and water balance modelling within wetlands and floodplains. *Adv. Geosci.*, 5, 1–5

- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN (2008): Blaubuch Erntejahr 2007: Teil I: Ausgleichsleistungen in Wasserschutzgebieten gemäß § 51a NWG; Teil II: Katalog der freiwilligen Vereinbarungen und die Berechnungsgrundlagen. Berechnungsgrundlagen der Landwirtschaftskammer Niedersachsen. Veröffentlicht unter <http://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/6/nav/197/article/10429.html>
- LORZ, C.; VOLK, M. u. SCHMIDT, G. (2007): Considering spatial distribution and functionality of forests in a modeling framework for river basin management. *Forest Ecology and Management*, 248, 17-25
- MACDONALD, J. A.; DISE, N. B.; MATZNER, E.; ARMBRUSTER, M. u. GUNDERSEN, P. (2002): Nitrogen input together with ecosystem nitrogen enrichment predict nitrate leaching from European forests. *Global Change Biol.*, 8, 1028-1033
- MEESENBURG, H.; JANSEN, M.; DÖRING, C.; BEESE, F.; RÜPING, U.; MÖHRING, B.; HENTSCHEL, S.; MEIWES, K.J. u. SPELLMANN, H. (2005): Konzept zur Beurteilung der Auswirkungen forstlicher Maßnahmen auf den Gewässerzustand nach den Anforderungen der EG-Wasserrahmenrichtlinie. In: Wasserversorgung in bewaldeten Einzugsgebieten, *Freiburger Forstliche Forschung*, 62, 171-180
- MEESENBURG, H.; MEIWES, K.J.; WAGNER, M. u. PRENZEL, J. (2002): Ecosystem effects after ameliorative liming of a catchment at the Harz mountains, Germany. Horst, W.J. et al. (eds.), *Plant nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems*. Kluwer, *Development Plant Soil Sci.*, 914-915
- MEESENBURG, H.; SUTMÖLLER, J. u. HENTSCHEL, S. (2010): Retrospective and prospective evaluation of water budgets at Lange Bramke, Harz Mountains, Germany: Effects of plant cover and climate change. *IAHS Publ.*, 336, 239-244
- MELLERT, K.-H.; GENSJÖR, A. u. KÖLLING, C. (2005): Nitratinventur Bayern offenbart zunehmende Stickstoffsättigung: Verbreitete Nitratbelastung des Waldsickerwassers. *AFZ/DerWald*, 4, 168-171
- MÖHRING, B. u. RÜPING, U. (2006): Bewertungskonzept für forstliche Nutzungsbeschränkungen, *Schriften zur Forstökonomie*, Band 32, J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main
- MÖHRING, B. u. RÜPING, U. (2008): A concept for the calculation of financial losses when changing the forest management strategy. *Forest Policy and Economics*, 10, 98-107
- NIEDERSÄCHSISCHE LANDESFORSTEN (2006): 15 Jahre langfristige ökologische Waldentwicklung. Das LÖWE-Programm, *Niedersächsische Landesforsten*, Braunschweig, 31 S.
- NIEDERSÄCHSISCHE LANDESFORSTVERWALTUNG (1991): Langfristige Ökologische Waldentwicklung in den Landesforsten. Programm der Landesregierung, *Niedersächsische Landesregierung Hannover*, 49 S.
- PARDO, L.H.; DRISCOLL, C.T. u. LIKENS, G.E. (1995): Patterns of nitrate loss from a chronosequence of clear-cut watersheds. *Water, Air, and Soil Pollution*, 85, 1659-1664
- ROTHER, A. u. MELLERT, K.H. (2004): Effects of Forest Management on Nitrate Concentrations in Seepage Water of Forests in Southern Bavaria, Germany. *Water, Air, and Soil Pollution*, 156, 337-355
- RÜPING, U. (2009): *Wasserschutz im Wald: Betriebswirtschaftliches Bewertungskonzept und institutionelle Umsetzungsinstrumente*. Frankfurt/M: J.D. Sauerländer's Verlag
- RÜPING, U. u. MÖHRING, B. (2008): A Concept for the Calculation of Financial Compensations caused by changing the Forest Management Strategy – particularly with regard to Water Protection. In: KHARAZIPOUR A.; SCHÖPPER C. u. MÜLLER, C. (Ed.): *Review of forests, wood products and wood biotechnology of Iran and Germany - Part II*. Universitätsdrucke Göttingen
- SCHÜLER, G. (2005): Auswirkungen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie auf den Wald und die Waldbewirtschaftung. *Forst u. Holz*, 60, 316-320
- SPELLMANN, H.; SUTMÖLLER, J. u. MEESENBURG, H. (2007): Risikovorsorge im Zeichen des Klimawandels: Vorläufige Empfehlungen der NW-FVA am Beispiel des Fichtenanbaus. *AFZ/Der Wald*, 23, 1246-1249

- SUTMÖLLER, J.; FIEBIGER, C. u. MEESENBURG, H. (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt von Wäldern – Modellgestützte Risikoabschätzung für ausgewählte Waldbestände im Hessischen Ried. Freiburger Forstl. Forschung, 82, 111-121
- SUTMÖLLER, J.; HENTSCHEL, S.; MEESENBURG, H. u. 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. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 20.07 (1), 235-246
- UMWELTBUNDESAMT (2008): Der „gute ökologische Zustand“ naturnaher terrestrischer Ökosysteme - ein Indikator für Biodiversität? Texte Umweltbundesamt, 29/08, 186 S.
- WIENHAUS, S.; HÖPER, H.; EISELE, M.; MEESENBURG, H. u. SCHÄFER, W. (2008): Nutzung bodenkundlich-hydrogeologischer Informationen zur Ausweisung von Zielgebieten für den Grundwasserschutz: Ergebnisse eines Modellprojektes (NOLIMP) zur Umsetzung der EG-Wasser-Rahmenrichtlinie. GeoBerichte, 9, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 56 S.

Korrespondierender Autor:

Dr. Henning Meesenburg
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Grätzelstr. 2
D-37079 Göttingen
E-Mail: henning.meesenburg@nw-fva.de
URL: www.nw-fva.de

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
Abs.	Absatz
Ake	Effektive Kationenaustauschkapazität
ALh	Anderes Laubholz mit hoher Umtriebszeit
ALn	Anderes Laubholz mit niedriger Umtriebszeit
Art.	Artikel
ATKIS	Amtlich Topographisches-Kartographisches Informationssystem
BHD	Brusthöhendurchmesser (Durchmesser in 1,3 m Höhe)
BMP	Best Management Practices
BT	Bestandestyp
CORINE	Coordinated Information on the European Environment
DGM	Digitales Geländemodell
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DWD	Deutscher Wetterdienst
Efm	Erntefestmeter ohne Rinde
EG	Europäische Gemeinschaft
ekfr.	erntekostenfrei
Ekl.	Ertragsklasse
EG-WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
ELER	Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
EU	Europäische Union
FAL-AOE	Bundesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie (jetzt: Johann Heinrich von Thünen-Institut)
GAK	Gemeinschaftsaufgabe zur Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes
GIS	Geographisches Informationssystem
ha	Hektar
IDW	Inverse Distance Weighting

LAI	Leaf Area Index (Blattflächenindex)
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
Lbh	Laubholz
lfm	Laufende Meter; Maßeinheit
LGN	Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen
LWG	Landeswassergesetz
Nds.	Niedersachsen
NFP	Niedersächsisches Forstplanungsamt
NIBIS [®]	Niedersächsisches Bodeninformationssystem
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
pF-Kurve	Wasserspannungskurve
PNV	Potenziell natürliche Vegetation
SAI	Stem Area Index (Stammflächenindex)
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
Vfm	Vorratsfestmeter
WBR	Waldbewertungsrichtlinie
WET	Waldentwicklungstyp
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
Z-Baum	Zukunftsbaum

Kontaktdaten der Autorinnen und Autoren

Dr. Bernd Ahrends

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt

Abt. Umweltkontrolle

Grätzelstraße 2

D-37079 Göttingen

bernd.ahrends@nw-fva.de

(normals:

Georg-August-Universität Göttingen

Abt. Ökopedologie der gemäßigten
Zonen)

Prof. em. Dr. Friedrich Beese

Georg-August-Universität Göttingen

Büsgen-Institut

Abt. Ökopedologie der gemäßigten
Zonen

Büsgenweg 2

D-37077 Göttingen

fbeese@gwdg.de

Claus Döring

Georg-August-Universität Göttingen

Büsgen-Institut

Abt. Ökopedologie der gemäßigten
Zonen

Büsgenweg 2

D-37077 Göttingen

cdoerin@uni-goettingen.de

Claudia Gutsche

Georg-August-Universität Göttingen

Burckhardt-Institut

Abt. Forstökonomie und
Forsteinrichtung

Büsgenweg 3

D-37077 Göttingen

cgutsch@gwdg.de

Dr. Swen Hentschel

Nordwestdeutsche Forstliche

Versuchsanstalt

Abt. Waldschutz

Grätzelstraße 2

D-37079 Göttingen

swen.hentschel@nw-fva.de

Dr. Martin Jansen

Georg-August-Universität Göttingen

Büsgen-Institut

Abt. Ökopedologie der gemäßigten
Zonen

Büsgenweg 2

D-37077 Göttingen

mjansen@gwdg.de

Dr. Henning Meesenburg

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
henning.meesenburg@nw-fva.de

Dr. Ursula Rüping

Ministerium für Landwirtschaft,
Umwelt und Verbraucherschutz
Mecklenburg-Vorpommern
Abt. 2 – Nachhaltige Entwicklung,
Forsten und Naturschutz
Paulshöher Weg 1
D-19061 Schwerin
u.rueping@lu.mv-regierung.de
(*vormals:*
Georg-August-Universität Göttingen
Abt. Forstökonomie und
Forsteinrichtung)

Johannes Sutmöller

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
johannes.sutmoeller@nw-fva.de

Prof. Dr. Bernhard Möhring

Georg-August-Universität Göttingen
Burckhardt-Institut
Abt. Forstökonomie und
Forsteinrichtung
Büsgenweg 3
D-37077 Göttingen
bmoecri@gwdg.de

Prof. Dr. Hermann Spellmann

Direktor
Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
hermann.spellmann@nw-fva.de