

Ralf Kunkel, Hans-Eberhard Kape, Luise Keller, Franka Koch, Björn Tetzlaff und Frank Wendland

# Szenarien für die Reduzierung von Stickstoffeinträgen zum Erreichen der Grundwasser- und Meeresschutzziele in Mecklenburg-Vorpommern

Scenarios for the reduction of nitrogen inputs to achieve the groundwater and marine protection goals in Mecklenburg-Vorpommern

Mit dem Modellpaket GROWA-DENUZ-WEKU wurde für Mecklenburg-Vorpommern eine flächendeckende und zugleich räumlich hoch aufgelöste eintragspfaddifferenzierte Quantifizierung der Stickstoffeinträge in das Grundwasser, die Oberflächengewässer und die Küstengewässer der Ostsee bzw. die Nordseezuflüsse durchgeführt. Im Rahmen einer Ist-Zustandsanalyse wurden zunächst räumliche Schwerpunkte der Stickstoffbelastung und damit prioritäre Bereiche für die Maßnahmendurchführung zur Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) identifiziert. Es zeigte sich, dass gegenwärtig ca. 95 % der N-Einträge in die Oberflächengewässer (ca. 32.270 t N/a) aus diffusen Quellen stammen, wobei die Einträge über Dränung eindeutig dominieren. Die Summe der N-Einträge in die Oberflächengewässer aus Punktquellen macht dagegen nur ca. 5 % der Gesamteinträge (ca. 1.470 t N/a) aus. Der erforderliche Stickstoffminderungsbedarf zur langfristigen Erreichung des Grundwasserschutzziels von 50 mg NO<sub>3</sub>/l liegt aktuell bei ca. 41.500 t N/a. Szenarioanalysen zur Prognose der Auswirkung von Maßnahmen zur Reduktion des landwirtschaftlichen N-Bilanzsaldos zeigten, dass selbst bei einer flächendeckenden Begrenzung auf 50 kg N/(ha-a) noch ein Reduktionsbedarf von ca. 21.000 t N/a besteht, um das Grundwasserschutzziel zu erreichen. Die Schutzziele für die Nordsee (2,8 mg N/l) und die Ostsee (2,6 mg N/l) würden bei einer Reduktion in dieser Größenordnung jedoch bereits beinahe erreicht. Die landesweite Umsetzung von N-Reduktionsmaßnahmen zum Grundwasserschutz sollte deshalb auch bei der Umsetzung von Maßnahmen für die Erreichung der Meeresschutzziele eine hohe Priorität haben.

**Schlagwörter:** Grundwasser, Mecklenburg-Vorpommern, Meeresschutzziele, Reduzierung Stickstoffeintrag

The GROWA-DENUZ-WEKU model system has been used to simulate nitrogen (N) inputs into groundwater, surface waters and the coastal waters in Mecklenburg-Vorpommern. Area-wide model analyses have been performed in high spatial resolution (100 m x 100 m) for six diffuse and four point-source input pathways. Within the framework of a status quo analysis, "hotspot-areas" of N pollution and priority areas for the implementation of N reduction measures according to the requirements of the EU Water Framework Directive (EU-WFD) have been identified. It becomes apparent that presently 95 % of all N-inputs into surface waters originate from diffuse sources with N inputs from drainage systems as the dominating input pathway. The sum of all N-inputs from point sources accounts for just 5 % of all N-inputs (ca. 1,470 t N/a). The displaceable N inputs into soil would have to be reduced by ca. 41,500 t N/a in order to comply with the EU target value for groundwater (50 mg NO<sub>3</sub>/l) on the long run. Scenario analyses to forecast the impact of measures to reduce the agricultural N-balance show that further efforts are necessary to reach the target value for groundwater. Even the introduction of an area-covering limit of 50 kg N/(ha-a) for the agricultural N-balance would entail a further reduction by ca. 21,000 t N/a in order to reach the EU target value for groundwater. However, the target values for the North Sea (2.8 mg N/l) and the Baltic Sea (2.6 mg N/l) would already almost be reached when reducing the agricultural N-balance in this magnitude. Therefore, the area-wide implementation of N reduction measures for groundwater protection should also have a high priority in the implementation of measures to reach the target values for the marginal sea.

**Keywords:** Groundwater, Mecklenburg-Vorpommern, marine protection goals, reduction of nitrogen input

## 1 Einleitung

Der Eintrag von Stickstoff (N) in Grund- und Oberflächenwasserkörper stellt auch in Mecklenburg-Vorpommern ein wesentliches Problem für den Gewässerschutz dar (BORCHARDT et al. 2005, MLUV 2011). Die dadurch verursachte Eutrophierung ist nach wie vor eines der größten ökologischen Probleme der Nord- und Ostsee (ARGE BLMP 2011, BLANO 2014, FGG WESER 2013, HIRT et al. 2012). Ursache für die Eutrophierung sind vor allem die hohen Nährstoffeinträge über die Flüsse. Heute sind noch immer etwa 80 % des Stickstoffs in den deutschen Küstenbereichen anthropogenen Ursprungs (FUCHS et al. 2010). Dies lässt in zahlreichen Fällen befürchten, dass die in der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL 2000) festgelegten Umweltqualitätsziele nicht eingehalten werden können. Die weitere Reduzierung der Nährstoffeinträge

durch effiziente Maßnahmen bleibt deshalb eines der zentralen Bewirtschaftungsziele, damit bis spätestens 2027 ein „guter Zustand“ in den Grund-, Oberflächen- und Küstengewässern der Nord- und Ostsee erreicht wird.

Die Identifizierung möglichst effizienter Maßnahmen wird durch zahlreiche Probleme erschwert. So ist oft nicht klar, welche Stickstoffmengen in einem bestimmten Gebiet über die unterschiedlichen Eintragspfade in die Wasserkörper gelangen. Gerade dies ist aber wichtig, um räumliche Belastungsschwerpunkte (Hotspot-Gebiete) identifizieren und Maßnahmen verorten zu können. Eine weitere Frage ist die Prognose der Wirksamkeit der Maßnahmen und der Zeitspanne, in der diese Wirkungen messbar sind. So führt z.B. eine Verringerung der N-Bilanzsalden auf landwirtschaftlichen Flächen unter Umstän-

den nur sehr langfristig zu einer Verbesserung der Grundwasserqualität.

Um diese Fragen zu beantworten, werden in Deutschland schon seit längerer Zeit Simulationsmodelle eingesetzt. Auf der Ebene von Flussgebieten und Bundesländern werden häufig die Modelle MONERIS (BEHRENDT et al. 1999), STOFF-BILANZ (HALBFAß et al. 2009), GROWA-DENUZ-WEKU (KUNKEL et al. 2006, KUHR et al. 2013, WENDLAND et al. 2010) sowie der AGRUM-Modellverbund (HEIDECKE et al. 2014, KREINS et al. 2010) eingesetzt.

Für Mecklenburg-Vorpommern wurden N-Einträge in die Oberflächengewässer bislang im Rahmen von kleinräumigen Studien ermittelt. In diesen Studien wurden Einzelaspekte der Nitratproblematik, wie z.B. der N-Austrag aus dränierten Gebieten (KAHLE et al. 2013) in einem lokal begrenzten Raum untersucht. Im Rahmen eines naturschutzorientierten Projektes zur Verringerung von Risikopotenzialen aufgrund landwirtschaftlicher Nutzung für den Naturschutz im Peenetal wurde der Versuch einer Quantifizierung diffuser Nährstoffausträge landwirtschaftlicher Nutzflächen mit dem Schwerpunkt Erosion hinsichtlich der Risikobetrachtung für die angrenzenden Naturschutzflächen unternommen (SCHEER & PANCKOW 2010).

Großräumig existieren für Mecklenburg-Vorpommern bislang Studien zu N-Einträgen in die Oberflächengewässer aus bundesweiten Modellierungsprojekten (BEHRENDT et al. 1999, FUCHS et al. 2010) oder auf der Ebene von großen Einzugsgebieten (FGG ELBE 2015a, RADOST-VERBUND 2014), in denen die Nährstoffeintragsmodelle MONERIS bzw. MoRE zum Einsatz kamen. Diese sind in ihrer räumlichen Auflösung auf die Ebene von Teileinzugsgebieten beschränkt, was die Identifizierung von Hotspot-Gebieten für die Weiterentwicklung von Minderungsmaßnahmen erschwert. Zudem bilden diese Modelle den N-Eintrag in das Grundwasser sowie die Nitratkonzentration im Sickerwasser nicht ab.

Durch den Einsatz des Modellpakets GROWA-DENUZ-WEKU liegt für Mecklenburg-Vorpommern erstmals ein mesoskaliger landesweiter Überblick über die N-Einträge sowie die dahinter stehenden Abbau- und Transportvorgänge in hoher räumlicher Auflösung unter Verwendung von Datengrundlagen in einem Maßstabsbereich von 1:25.000–1:100.000 vor (WENDLAND et al. 2015). In dem vorliegenden Beitrag wird vor allem dargestellt, in welcher Weise hierauf aufbauend Belastungsschwerpunkte identifiziert und Potentiale von N-Reduzierungsmaßnahmen abgeschätzt worden sind.

## 2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Im Rahmen der Umsetzung des Konzepts zur Minderung der diffusen Nährstoffeinträge aus der Landwirtschaft in die Oberflächengewässer und das Grundwasser in Mecklenburg-Vorpommern (MLUV 2011) wurde das Forschungszentrum Jülich (FZJ) vom Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG) beauftragt, das Modellpaket GROWA-DENUZ-WEKU auf Mecklenburg-Vorpommern anzuwenden. In erster Linie sollten die Nährstoffeinträge ins Grundwasser und in die Oberflächengewässer flächendeckend für das Bundesland und in hoher räumlicher Auflösung (100 m x 100 m Raster) quantifiziert werden. Darüber hinaus sollten die

N-Minderung zur Erreichung der Schutzziele für das Grundwasser und die Küstengewässer sowie die Auswirkungen von landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsszenarien prognostiziert werden. Das Projekt wurde durch die „AG Wasserrahmenrichtlinie & Landwirtschaft“ unter Beteiligung des LUNG, der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei (LFA) sowie der Zuständigen Stelle für landwirtschaftliches Fachrecht und Beratung (LFB bei der LMS Agrarberatung GmbH) begleitet.

In diesem Beitrag sollen die folgenden Fragen beantwortet werden:

1. Wie hoch ist aktuell der Gesamtumfang der Stickstoffeinträge ins Grundwasser, in die Oberflächengewässer und die Küstengewässer?
2. Welche Relevanz besitzen die einzelnen Eintragspfade? Lassen sich Hotspot-Gebiete für die Weiterentwicklung von Minderungsmaßnahmen identifizieren?
3. Wie hoch ist der Stickstoff-Minderungsbedarf für die Erreichung der Qualitätsziele für das Grundwasser und die Küstengewässer?
4. In welchem Umfang können Anpassungen in der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung zur Erreichung der Qualitätsziele für das Grundwasser und die Küstengewässer beitragen?

## 3 Das Modellpaket GROWA-DENUZ-WEKU

Die flächendifferenzierte Modellierung der diffusen und punktförmigen Stickstoffeinträge ins Grundwasser und in die Oberflächengewässer erfolgte mit dem Modellpaket GROWA-DENUZ-WEKU. Bei der Simulation werden sechs diffuse Eintragspfade (Bodenerosion, Abschwemmung, Dränung, natürlicher Zwischenabfluss, grundwasserbürtiger Abfluss, atmosphärische Deposition auf Wasserflächen) und vier punktförmige Eintragspfade (kommunale Kläranlagen, industriell-gewerbliche Direkt-einleiter, Trennkanalisation, Kleinkläranlagen) berücksichtigt.

Für detaillierte Beschreibungen der einzelnen Teilmodelle wird auf die einschlägige Literatur verwiesen, z.B. WENDLAND & KUNKEL (1999) und KUNKEL et al. (2006) für GROWA, KUNKEL & WENDLAND (2006) und WENDLAND et al. (2010) für DENUZ und WENDLAND et al. (2011) und KUNKEL et al. (2004) für WEKU sowie TETZLAFF et al. (2013) für die Berücksichtigung der punktförmigen N-Einträge. An dieser Stelle seien daher nur der Verfahrensgang (Abb. 1) und das Zusammenspiel der Modelle kurz beschrieben.

Grundlage zur Ermittlung der N-Austräge aus dem Boden sind die verlagerbaren N-Mengen im Boden. Zu deren Ermittlung wird auf dem N-Bilanzsaldo landwirtschaftlicher Flächen aufgesetzt, welches von BIOTA (2013) auf Basis der in WIEBENSOHN (2008) beschriebenen und weiterentwickelten Vorgehensweise berechnet wurde. Die von BIOTA (2013) feldblockscharf für die landwirtschaftlichen Nutzflächen berechneten N-Bilanzsalden des Zeitraums 2005–2010 wurden über die kleinsten ausgewiesenen Einzugsgebiete (Gebiete mit 10-stelliger LAWA-Fließgewässerkennzahl) gemittelt und nach einer Plausibilitätsprüfung und Validierung an Realbilanzen der landwirtschaftlichen Praxis durch die LFB um 10 kg/(ha-a) reduziert. Es muss darauf hingewiesen werden, dass es sich – wie in allen Modellierungsprojekten – auch hier um modellierte N-Bilanzen handelt. Einzelbetrieblich können die N-Bilanzsalden erheblich abweichen, da bei der Modellierung von mittleren Angaben für den Mineräldüngereinsatz

zu den einzelnen Kulturen ausgegangen wurde. Als weitere N-Zufuhr werden die atmosphärische Deposition nach GAUGER et al. (2008), als N-Entzug die durch Immobilisierungsprozesse im Boden zurückgehaltenen N-Mengen (vgl. WENDLAND et al. 2015) berücksichtigt.

Die so berechneten verlagerbaren N-Mengen im Boden entsprechen nicht dem N-Austrag aus dem Boden, da es in der Wurzelzone des Bodens zu einem Nitratabbau kommen kann. Dieser wird mit dem reaktiven N-Transportmodell DENUZ (Denitrifikation in der ungesättigten Zone, KUNKEL & WENDLAND 2006) auf der Basis einer Michaelis-Menten-Kinetik quantifiziert. Die Abbauraten hängen dabei von der Bodenart und anderen physikalisch-chemischen Einflussgrößen (u.a. Wassergehalt und Gehalt an organischem Kohlenstoff) im Boden ab.

Für eine nach den Abflusskomponenten differenzierende Quantifizierung der diffusen N-Einträge ins Grundwasser und in die Oberflächengewässer werden die modellierten N-Austräge aus dem Boden an das Wasserhaushaltsmodell GROWA (WENDLAND & KUNKEL 1999) gekoppelt. Vor dem Hintergrund, dass die Modellierung eine mittlere langjährige – und damit regional typische – hydrologische Situation abbilden soll, erfolgte die GROWA-Modellrechnung in Mecklenburg-Vorpommern für eine 30-jährige hydrologische Referenzperiode (1971–2000).

Im Projekt wurde angenommen, dass der Nitratabbau in der ungesättigten Zone unterhalb des durchwurzelten Bereichs vernachlässigbar ist. Damit sind die N-Einträge in die Oberflächengewässer über die Direktabflusskomponenten natürlicher Zwischenabfluss und Dränabfluss an dieser Stelle bereits bestimmt. Anders verhält es sich mit dem Teil des Nitrataustrags aus dem Boden, der mit der Grundwasserneubildung in den Grundwasserleiter gelangt. Die in den Grundwasserleiter eingetragene Nitratmenge kann dort bei Vorherrschen eines reduzierenden Milieus und ausreichend langer Fließzeit einem weiteren Abbau unterliegen, welcher hier mit dem reaktiven Stickstofftransportmodell WEKU (KUNKEL et al. 2004) abgebildet wird.

Um die gesamten N-Einträge in die Oberflächengewässer zu quantifizieren, werden zusätzlich die diffusen Eintragspfade Erosion, Abschwemmung und atmosphärische Deposition auf Gewässerflächen analog zu der in TETZLAFF et al. (2011, 2013) für den Phosphoreintrag beschriebenen Vorgehensweise bestimmt. Die Berücksichtigung der punktuellen N-Einträge erfolgt auf Basis der in TETZLAFF et al. (2007, 2013) beschriebenen Methode. Die gewässerinterne Retention wurde nach dem Ansatz von BEHRENDT & OPITZ (2000) abgeschätzt.

Die N-Gesamtfracht im Oberflächengewässer ergibt sich somit aus der Summe der über die Einzelpfade aufsummierten N-Einträge in die Oberflächengewässer abzüglich der N-Retention im Oberflächengewässer. Diese N-Gesamtfracht wurde mit den zur Verfügung stehenden Messdaten des LUNG zur Frachtberechnung (Gütedaten und Abflussmessungen) an Gebietspegeln abgeglichen (OSPAR 1998).

Im Anschluss an die Modellierung des Ist-Zustands wurde das Modellpaket GROWA-DENUZ-WEKU für Szenarioanalysen eingesetzt. In diesem Zusammenhang erfolgten eine Abschätzung des zur Erreichung der Schutzziele für das Grundwasser und die Küstengewässer notwendigen N-Minderungsbedarfs sowie eine

Prognose der Auswirkungen von konkreten landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen.

### 3.1 Räumliche Auflösung der Modellierung und Datenbasis

Alle Modellierungen wurden für die Gesamtfläche Mecklenburg-Vorpommerns durchgeführt, welche etwas mehr als 23.000 km<sup>2</sup> umfasst. Die Modellierungen erfolgten in einem 100 m x 100 m-Raster, so dass Modellrechnungen für jeweils ca. 2,3 Mio. Rasterzellen durchgeführt wurden.

Die erforderlichen Datengrundlagen wurden vom LUNG zur Verfügung gestellt. Im Wesentlichen handelt es sich um mittelmaßstäbige, landesweit konsistent vorliegende digitale hydrologische, klimatische, pedologische, topographische und hydrogeologische Datensätze. Darüber hinaus gingen Daten zu landwirtschaftlichen N-Bilanzsalden sowie Informationen aus statistischen Datenbanken des Bundeslandes ein. In Tabelle 1 sind die verwendeten Datengrundlagen zusammenfassend aufgeführt.

### 3.2 Stickstoffeinträge ins Grundwasser und in die Oberflächengewässer für den Ausgangszustand 2010

Abbildung 1 zeigt den Verlauf der GROWA-DENUZ-WEKU-Modellierung und zugleich die Ergebnisse für jeden Modellierungsschritt als Gesamttonnagen in t N/a bezogen auf die Landesfläche Mecklenburg-Vorpommerns. Die Angaben in blau stellen die aufsummierten N-Einträge für die Einzelpfade sowie wichtige Zwischenschritte dar. Die Angaben rot kennzeichnen die N-Mengen, die dem hydrologischen System durch Denitrifikation und Retentionsprozesse (Sedimentation, Bioakkumulation, Immobilisierung etc.) dauerhaft oder zeitweilig entzogen werden. Zur Ermittlung der Mengen für die diffusen N-Eintragspfade wurden die im 100 m x 100 m-Raster vorliegenden Modellergebnisse aufsummiert. Die Gesamttonnagen für die punktförmigen N-Einträge ergeben sich aus den anlagenbezogenen bzw. auf die Siedlungsflächen bezogenen Einzelwerten.

In die Ermittlung der auswaschbaren (verlagerbaren) N-Menge im Boden geht auf landwirtschaftlich genutzten Flächen (Acker und Grünland) der modellierte N-Bilanzsaldo, der sich vereinfacht aus der Differenz von N-Zufuhr durch Mineraldünger bzw. organischem Dünger und der N-Abfuhr mit der Erntesubstanz ergibt, ein. Der N-Bilanzsaldo der landwirtschaftlichen Flächen in Mecklenburg-Vorpommern liegt bei insgesamt ca. 91.100 t N/a.

Des Weiteren geht die atmosphärische N-Deposition in die Ermittlung der auswaschbaren (verlagerbaren) N-Menge im Boden ein. Bei landwirtschaftlich genutzten Flächen ist die atmosphärische N-Deposition damit eine zweite N-Quelle, bei Wald- und Siedlungsflächen dagegen die einzige N-Quelle. Landesweit werden über die atmosphärische N-Deposition ca. 42.000 t N/a in die Böden eingetragen. Dies entspricht etwa 46 % des N-Bilanzsaldos der landwirtschaftlichen Flächen.

Für Grünland sowie bewaldete Flächen wird unterstellt, dass ein Teil der N-Zufuhren im Boden gespeichert wird und zum Aufbau der organischen Bodensubstanz beiträgt. Diese N-Immobilisierung wurde in Anlehnung an MÜLLER & RAISSI (2002) für Grünland bei 57 % der Summe aus N-Bilanzüberschüssen aus der Landwirtschaft und atmosphärischer N-Deposition angesetzt. Für Nadelwald wurden 50 % und für Laubwald bei 71 % der atmo-

**Tabelle 1**

Datengrundlagen für die GROWA-DENUZ-WEKU-Modellierung in Mecklenburg-Vorpommern  
*Data base for GROWA-DENUZ-WEKU model application in the Federal State of Mecklenburg-Vorpommern*

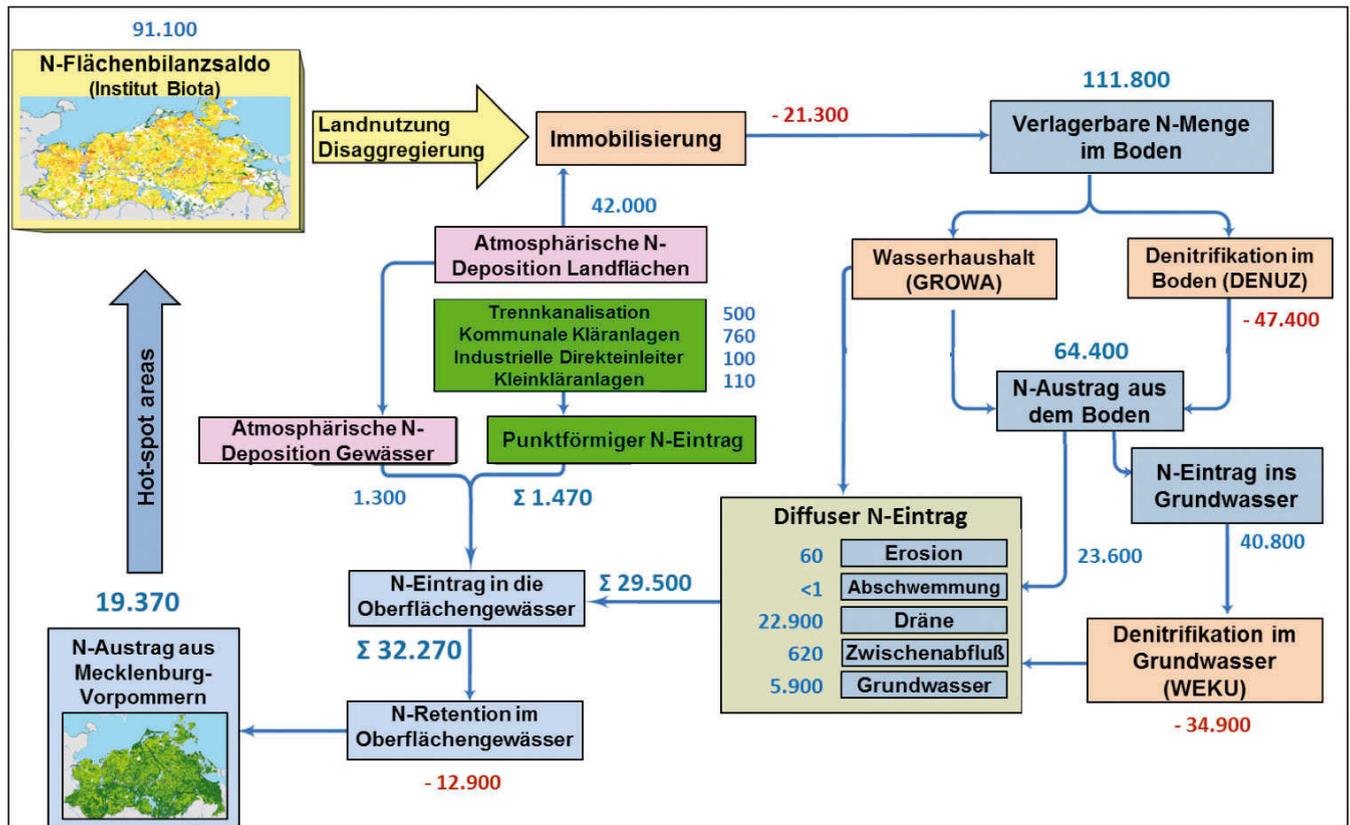
Themengebiet	Datengrundlage	Quelle
Grunddaten	Verwaltungsgrenzen	Landesamt für innere Verwaltung
Hydrographie	Fließgewässer, Seen	Digitales Landschaftsmodell (DLM25W)
	Oberflächenwasserkörper	
	Grundwasserkörper	
Klima	Sommerniederschlag	Deutscher Wetterdienst und LUNG
	Winterniederschlag	
	Potenzielle Verdunstung (Wendling)	
Boden	effektive Durchwurzelungstiefe	Konzeptbodenkarte 1:25000; Normalprofile der Konzeptbodeneinheiten LUNG
	nutzbare Feldkapazität	
	Grundwasserstufe	
	Staunässegrad	
	kapillare Aufstiegshöhe	FZJ
Landnutzung	Bodenbedeckungskategorien	Verschneidung aus DLM 25, CORINE 2006, Feldblockkataster 2010, Forstgrundkarte, DLM25w_f
Hydrogeologie	Grundwasserflurabstände	HYDOR GmbH (2010)
	Verweilzeit in der ungesättigten Zone	HYDOR GmbH (2011)
	Durchlässigkeitsklassen	Hydrogeologische Übersichtskarte von Deutschland (HÜK200), Hydrogeologische Karte 1:50000 (HK50)
Relief	Digitales Geländemodell	Digitales Geländemodell (DGM25), LAIV
Dränung	Dränierte landwirtschaftliche Flächen	BIOTA (2010)
Hydrogeochemie	Grundwassergütedaten	LUNG
Validierung	Einzugsgebietsgrenzen	DLM25W
	Tagesmittel der Abflüsse	Langzeitdatenspeicher Oberflächenwasser (LUNG)
Punktförmige N-Einträge	Kläranlagen industriell-gewerbliche Direkteinleiter Anlagentyp und Größe von Kleinkläranlagen Mischwasserentlastungen (berechnet)	LUNG, Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern
Landwirtschaft	Landwirtschaftliche N-Flächenbilanzsalden	BIOTA (2013)
Atmosphärische N-Deposition	trockene und nasse N-Deposition	GAUGER et al. (2008)

sphärischen N-Deposition angenommen. Die Immobilisierung unter Wald- und Grünlandflächen liegt dadurch auf Landesebene bei ca. 21.300 t N/a. Für ackerbaulich genutzte Böden wird davon ausgegangen, dass die Böden durch die jahrelange Düngung eine N-Sättigung aufweisen, so dass es zu keiner nennenswerten N-Immobilisierung kommt. Die auswaschbare (verlagerbare) N-Menge ackerbaulich genutzter Böden entspricht somit der Summe aus N-Bilanzüberschüssen aus der Landwirtschaft und atmosphärischer N-Deposition. Insgesamt verbleiben damit auf Landesebene ca. 111.800 t N/a als verlagerbare N-Menge im Boden. Vereinfachend wird bei der weiteren Modellierung davon ausgegangen, dass die gesamte verlagerbare N-Menge als Nitrat vorliegt.

Die Modellanalysen haben gezeigt, dass die Eintragspfade Erosion und Abschwemmung, über die Stickstoff an der Erdoberfläche in die Oberflächengewässer gelangt, in Mecklenburg-Vorpommern eine nur untergeordnete Rolle spielen, da der Anteil von Landwirtschaftsflächen auf bindigen Böden mit einer Hangneigung > 2 % und direktem Gewässeranschluss relativ gering ist.

Obwohl nach den Modellergebnissen rd. 47.400 t N/a der verlagerten N-Menge in den Böden Mecklenburg-Vorpommerns denitrifiziert werden, liegt die aus dem Boden ausgetragene N-Menge immer noch bei 64.400 t N/a. Über den Dränabfluss und den natürlichen Zwischenabfluss gelangt ein Teil des N-Austrags aus dem Boden ohne weitere Denitrifikation direkt in die Oberflächengewässer. Hierbei zeigt sich die große Bedeutung von Dränsystemen für den N-Austrag in die Vorfluter Mecklenburg-Vorpommerns. Der modellierte N-Austrag über Dränung beträgt ca. 22.900 t N/a, was mehr als 70 % der gesamten N-Einträge in die Oberflächengewässer entspricht. Der N-Austrag über den natürlichen Zwischenabfluss ist dagegen mit etwa 620 t N/a bedeutend geringer.

Ein Teil des N-Austrags aus dem Boden sickert über die Grundwasserneubildung in den Grundwasserleiter. Mit ca. 40.800 t N/a ist dieser Anteil fast doppelt so hoch wie die N-Menge, die über den Dränabfluss in die Oberflächengewässer gelangt. Aus dem Grundwasser fließen jedoch nur ca. 5.900 t N/a über den grundwasserbürtigen Abfluss in die Oberflächengewässer, da berech-



**Abbildung 1**  
 Ergebnisse der Modellierung der diffusen und punktförmigen N-Einträge in die Oberflächengewässer Mecklenburg-Vorpommerns mit dem Modellpaket GROWA-DENUZ-WEKU (in t N/a)  
 Model results of GROWA-DENUZ-WEKU model application in Mecklenburg-Vorpommern (in t N/a)

net wird, dass mehr als 80 % (ca. 34.900 t N/a) der ins Grundwasser eingetragenen Nitratmenge in den reduzierten Grundwasserleitern Mecklenburg-Vorpommerns abgebaut werden.

Abbildung 2 zeigt die Summe der modellierten N-Einträge in die Oberflächengewässer Mecklenburg-Vorpommerns für die sechs diffusen N-Eintragspfade für den Ist-Zustand. Insgesamt werden über diese ca. 29.500 t N/a in die Oberflächengewässer eingetragen. Die standortbezogene Variabilität ist jedoch recht hoch und liegt zwischen < 10 kg N/(ha-a) und > 75 kg N/(ha-a).

Die punktförmigen N-Einträge in die Oberflächengewässer sind aufgrund des hohen Stands der Abwasserbehandlung in Mecklenburg-Vorpommern mit insgesamt ca. 1.470 t N/a eher gering (Abb. 1) und belaufen sich auf nur etwa 5 %. Durch Retentionsprozesse auf der Fließstrecke im Oberflächengewässer wird die N-Fracht um weitere ca. 12.900 t N/a reduziert.

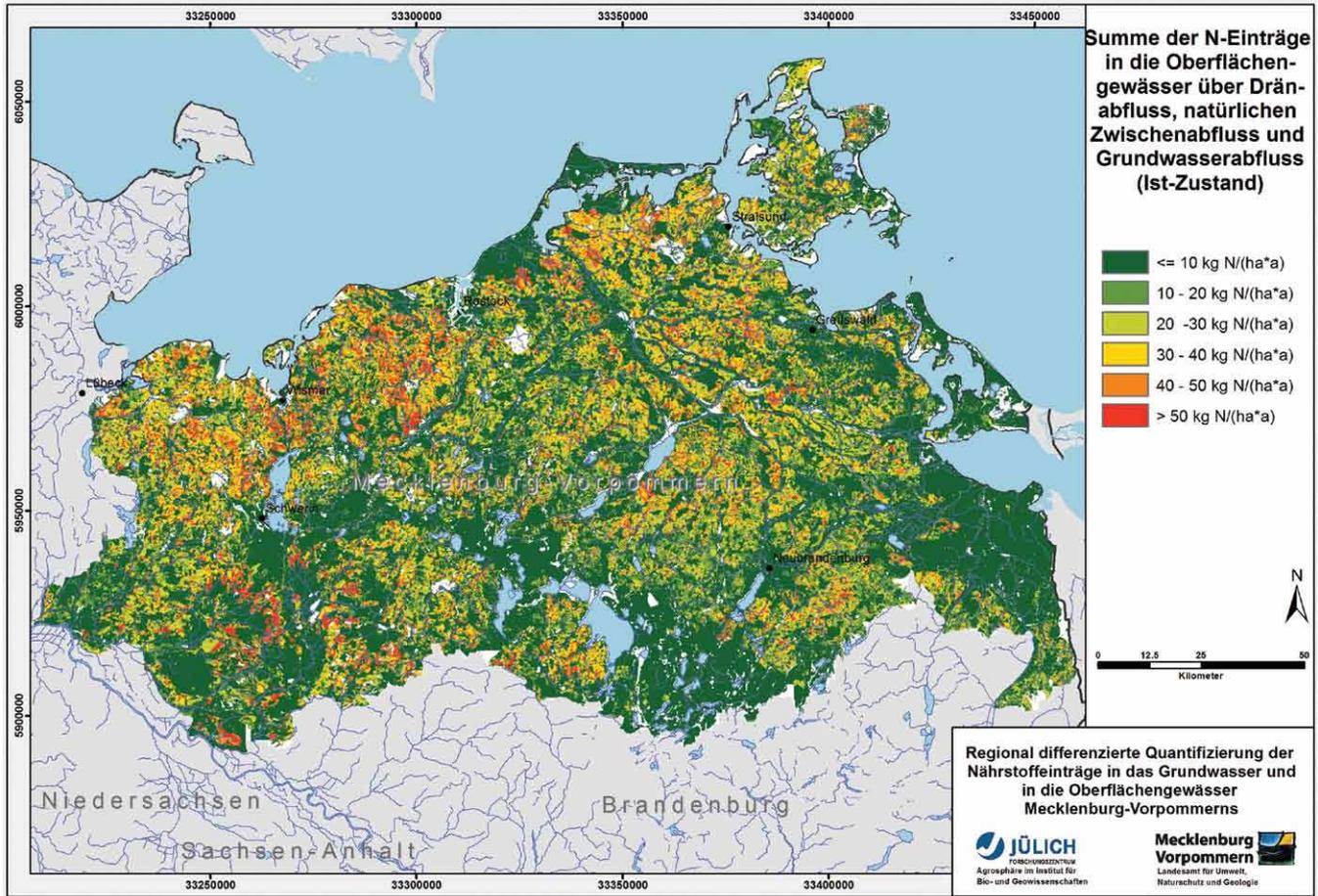
Für die Validierung der mittleren langjährigen N-Frachten in den Oberflächengewässern standen pegelbezogene Messwerte (Abflussmenge und N-Konzentration) von 92 Gütemessstellen aus dem Zeitraum 2000–2010 zur Verfügung (Abb. 3). Der Vergleich der modellierten N-Frachten mit den Messwerten an den verwendbaren pegelbezogenen Einzugsgebieten zeigte ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,95$ . Vor dem Hintergrund der großen Anzahl der Einzugsgebiete stellt dies eine gute Übereinstimmung

der modellierten mit den aus Messwerten abgeleiteten Frachten dar. Dies war zugleich eine Grundvoraussetzung für die Durchführung der Szenario-Analysen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben sind.

### 3.3 N-Minderungsbedarf zur Erreichung des Grundwasserschutzziels

Für einen „guten chemischen Zustand“ darf die Nitratkonzentration im Grundwasser 50 mg  $\text{NO}_3/\text{l}$  nicht überschreiten (EU-GWR 2006). Damit dieser Schwellenwert langfristig eingehalten werden kann, sollte bereits die Nitratkonzentration im Sickerwasser diesen Wert nicht überschreiten. Ausgehend vom Vorsorgegrundsatz und dem Verschlechterungsverbot werden mögliche Abbauprozesse in den Grundwasserdeckschichten und im Grundwasserleiter dabei nicht berücksichtigt. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass die Nitratkonzentration im Grundwasser oxidierter Grundwasserleiter dauerhaft 50 mg/l einhalten kann und das Denitrifikationspotenzial reduzierter Grundwasserleiter über einen möglichst langen Zeitraum erhalten bleibt (WENDLAND et al. 2010).

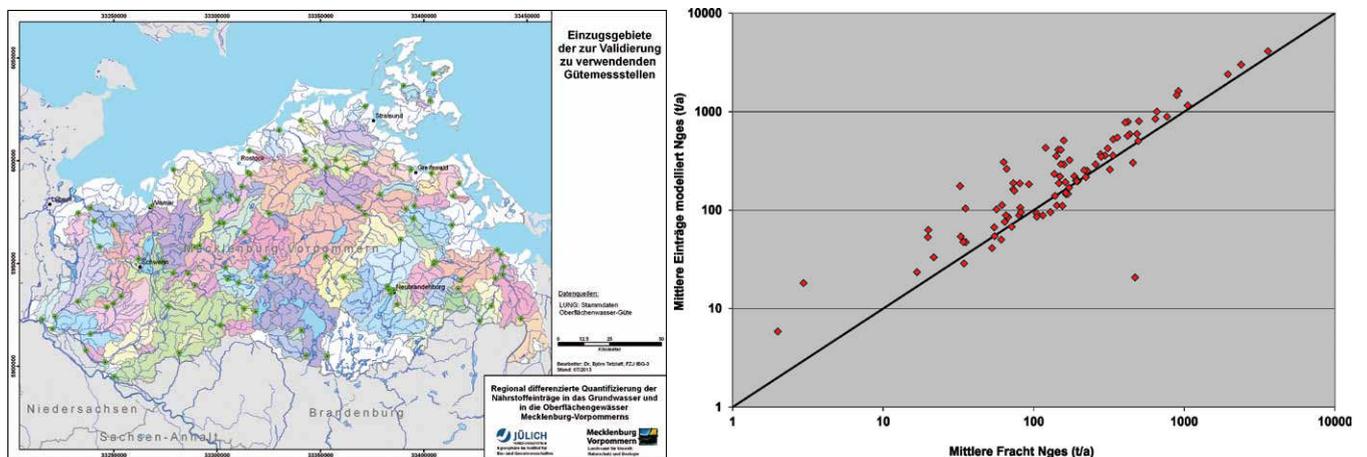
Ausgangsgröße zur Ermittlung des N-Minderungsbedarfs ist die modellierte Nitratkonzentration im Sickerwasser (Abb. 4), welche mit Werten zwischen < 10 mg  $\text{NO}_3/\text{l}$  und > 150 mg  $\text{NO}_3/\text{l}$  eine regional große Variabilität zeigt. Weite Landesteile liegen oberhalb von 50 mg  $\text{NO}_3/\text{l}$ . Diese Hotspot-Gebiete stellen den Referenz-



**Abbildung 2**

Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der GROWA-DENUZ-WEKU-Ist-Zustandsmodellierung für die sechs diffusen N-Eintragspfade in einer räumlichen Auflösung von 100 m x 100 m

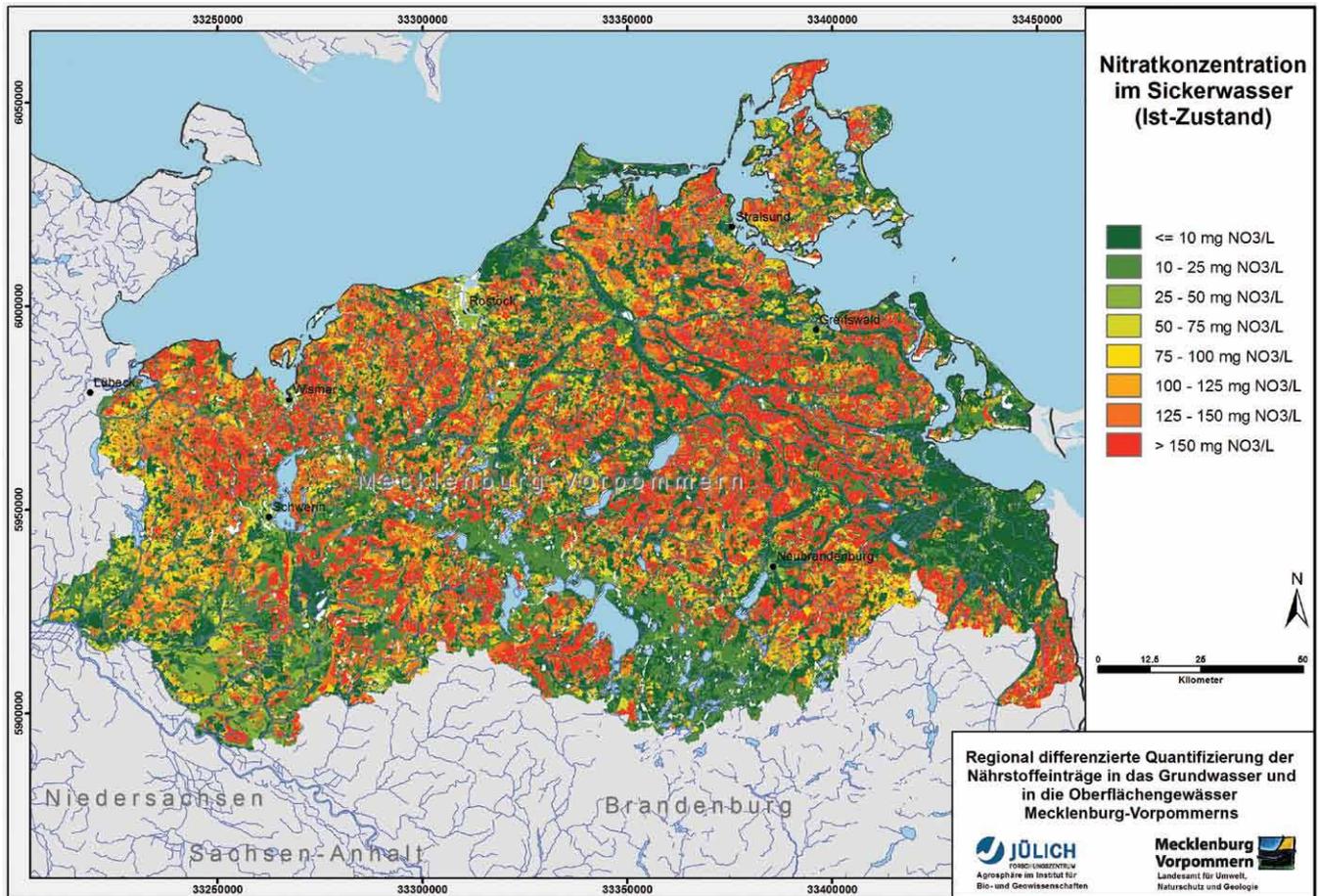
Results of status quo GROWA-DENUZ-WEKU model application for all six diffuse N-input pathways in a spatial resolution of 100 m x 100 m



**Abbildung 3**

Validitätsüberprüfung der modellierten N-Frachten in Oberflächengewässern an gemessenen Frachten in 92 Einzugsgebieten

Validity check of modelled N-loads in surface waters of 92 gauged catchments

**Abbildung 4**

Nitratkonzentration im Sickerwasser  
Nitrate concentration in the leachate

rahmen für die Ermittlung des N-Reduktionsbedarfs dar, der zur Erreichung des Grundwasserschutzziels notwendig ist.

Durch eine Rückwärtsrechnung mit dem DENUZ-Modell kann der Minderungsbedarf der N-Einträge in den Boden abgeschätzt werden. Dieser erfolgte unter der Prämisse einer konstanten mittleren Sickerwasserrate, einer konstanten atmosphärischen Deposition, eines konstanten Denitrifikationspotenzials im Boden sowie einer konstanten N-Immobilisierung im Boden (WENDLAND et al. 2009).

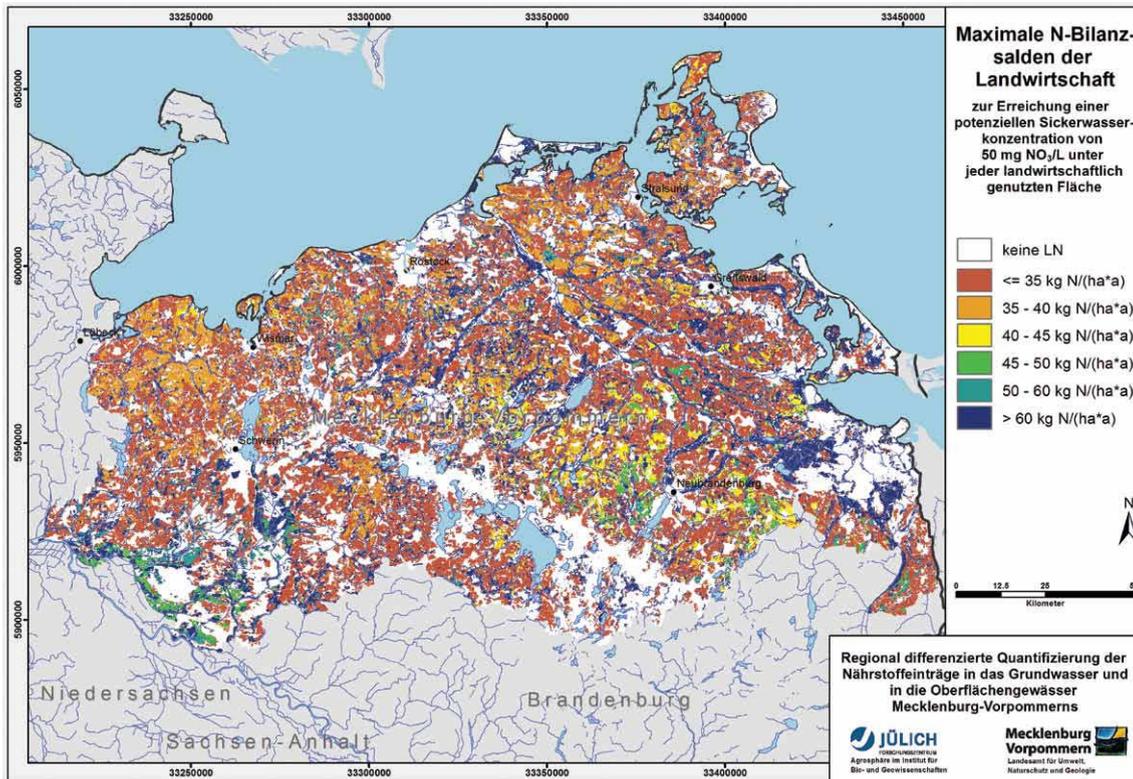
Bei der Ermittlung des N-Minderungsbedarfs wurde in einem ersten Schritt zunächst der maximal zulässige N-Bilanzsaldo bestimmt, der zu einer Sickerwasserkonzentration von höchstens 50 mg NO<sub>3</sub>/l führen würde (Abb. 5).

Da die aktuellen N-Bilanzsalden modelliert sind, stellt diese Karte eine wichtige Datengrundlage für die landwirtschaftliche Praxis und die Beratung in den Regionen dar. In einem zweiten Schritt wurde der N-Minderungsbedarf ermittelt. Dieser ergibt sich aus der Differenz der aktuellen N-Bilanzsalden und dem maximal zulässigen landwirtschaftlichen N-Bilanzsaldo (Abb. 6).

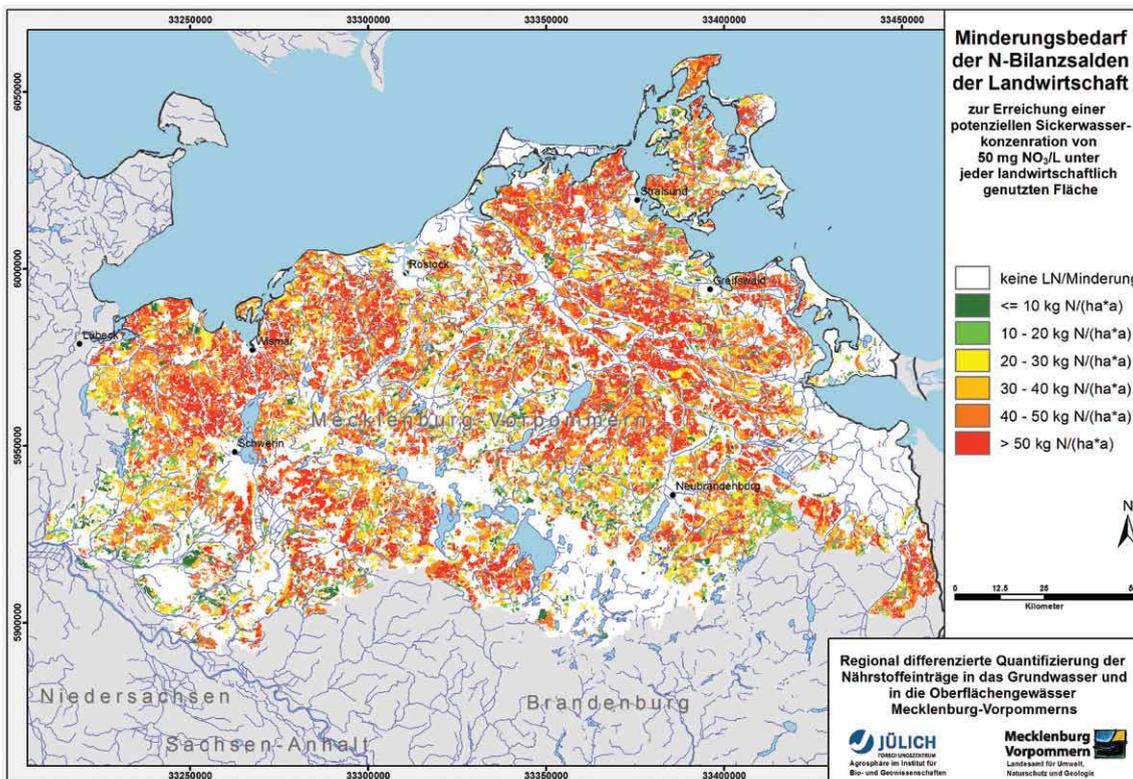
Es sei darauf hingewiesen, dass bei der Ermittlung des N-Minderungsbedarfs unterstellt wurde, dass die gesamte Verminderung

der verlagerbaren N-Menge im Boden von der Landwirtschaft zu erbringen ist, obwohl der landwirtschaftliche N-Flächenbilanzsaldo nur eine von mehreren Größen ist, die einen Einfluss auf die Höhe der verlagerbaren N-Menge im Boden und damit auf die Höhe der Nitratkonzentration im Sickerwasser hat. Hierzu gehören z.B. die atmosphärische Deposition sowie die Denitrifikationsbedingungen und die Verweilzeit im Boden. Der landwirtschaftliche N-Bilanzsaldo ist jedoch als eine Schlüsselgröße anzusehen und sollte daher einen entsprechenden Beitrag zur Reduktion von hohen verlagerbaren N-Mengen im Boden liefern (LAWA 2014).

Etwa 69 % der landwirtschaftlich genutzten Flächen Mecklenburg-Vorpommerns weisen nach dieser Berechnung einen N-Minderungsbedarf auf. Für etwa 39 % dieser Flächen liegt dieser zwischen 30 und 50 kg N/(ha·a). Ein Minderungsbedarf von weniger als 30 kg N/(ha·a) wurde für etwa 26 % der landwirtschaftlich genutzten Flächen mit einem N-Minderungsbedarf ermittelt und ist vor allem an Standorte mit günstigen Denitrifikationsbedingungen im Boden gebunden. Die etwa 35 % der Flächen mit einem N-Minderungsbedarf von mehr als 50 kg N/(ha·a) sind vor allem für Standorte mit ungünstigen Denitrifikationsbedingungen im Boden typisch. Für das gesamte Bundesland ergibt sich daraus ein N-Minderungsbedarf von ca. 41.500 t N/a der landwirtschaftlichen N-Überschüsse.



**Abbildung 5**  
 Maximal zulässige N-Bilanzsalden der Landwirtschaft zur Gewährleistung einer Nitratkonzentration im Sickerwasser von höchstens 50 mg NO<sub>3</sub>/l  
 Permissible upper limit of displaceable N-input into soil for guaranteeing a nitrate concentration of 50 mg NO<sub>3</sub>/l in the leachate



**Abbildung 6**  
 Minderungsbedarf der N-Bilanzsalden der Landwirtschaft zur Erreichung einer Nitratkonzentration im Sickerwasser von 50 mg NO<sub>3</sub>/l bezogen auf die der N-Bilanzsalden  
 N-reduction requirement for displaceable N-input into soil for guaranteeing a nitrate concentration of 50 mg NO<sub>3</sub>/l in the leachate

### 3.4 N-Minderungsbedarf zur Erreichung der Schutzziele von Nord- bzw. Ostsee

Nach dem aktuellen Entwurf der Oberflächengewässerverordnung soll die mittlere Konzentration an gelöstem Gesamtstickstoff 2,8 mg N/l für die in die Nordsee bzw. 2,6 mg N/l für die in die Ostsee mündenden Fließgewässer nicht überschreiten (BLMP 2011, BLANO 2014). Als Gebietskulisse für die Abschätzung des N-Minderungsbedarfs zur Erreichung der Schutzziele von Nord- bzw. Ostsee wurden die Einzugsgebiete mit dreistelliger LAWA-Fließgewässerkennzahl verwendet. Auf diese Weise ergaben sich 18 Teilgebiete mit Flächengrößen zwischen 7 und 5.080 km<sup>2</sup>. Analog zu der im vorherigen Kapitel beschriebenen Vorgehensweise zur Ermittlung des N-Minderungsbedarfs für die Erreichung des Grundwasserschutzziels wurde der N-Minderungsbedarf für den Meeresschutz ermittelt. Das Ergebnis zeigt Abbildung 7.

Abbildung 7 zeigt, dass der N-Minderungsbedarf für den Meeresschutz im Bereich von etwa 10 bis mehr als 50 kg N/(ha·a) liegt. In der Summe müssten ca. 29.000 t N/a gemindert werden, um die Zielkonzentrationen für die Nord- und Ostsee in den Einzugsgebieten mit dreistelliger LAWA-Fließgewässerkennzahl zu erreichen.

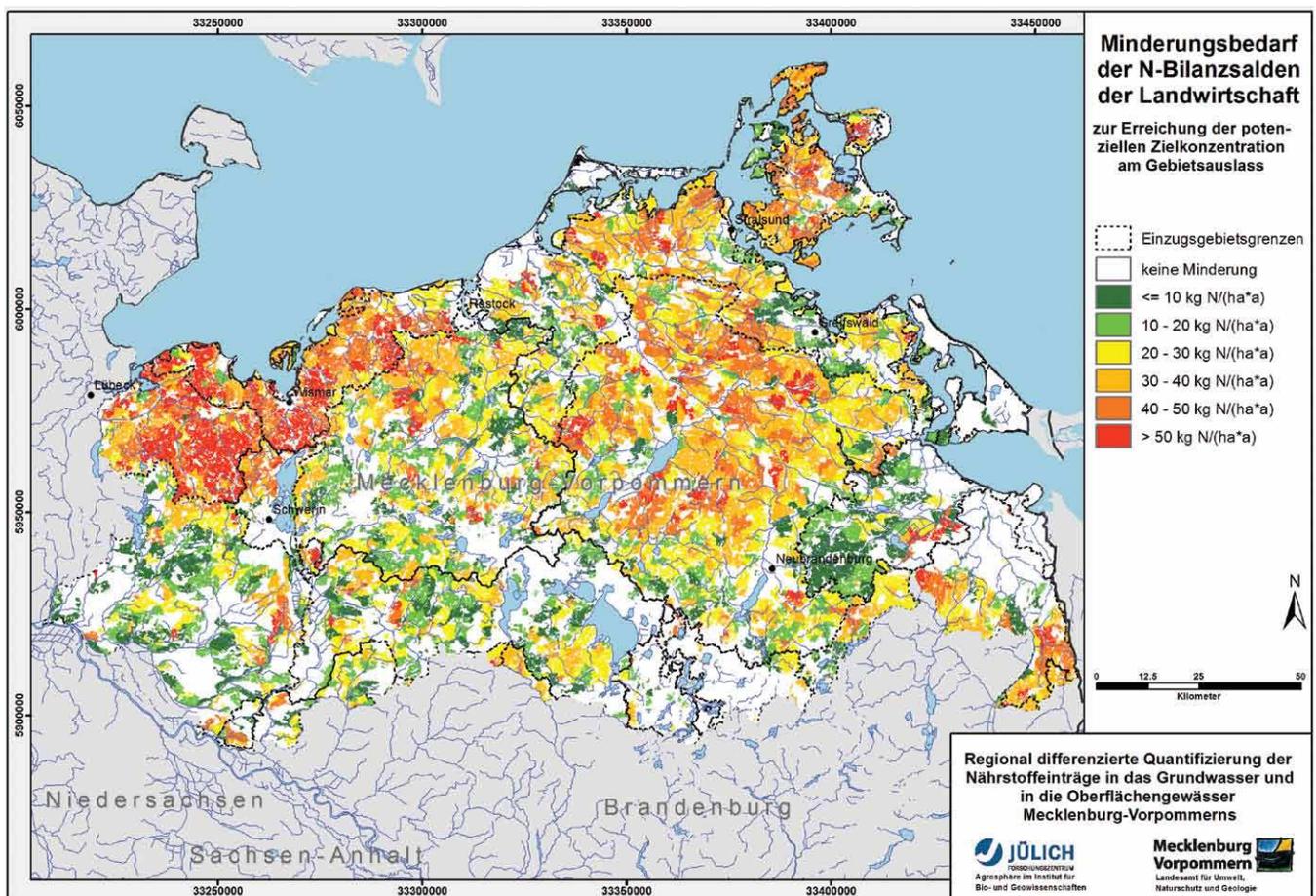
Im Hinblick auf eine effiziente, räumlich zielgerichtete und in ihrer Höhe angemessene Dimensionierung von N-Minderungsmaßnahmen ergeben sich aus Abbildung 7 wichtige Ansatzpunkte.

Hohe Minderungen von 40 kg N/ (ha·a) und mehr sind danach vor allem in den Teilgebieten Stepenitz und Wallensteingraben im Nordwesten Mecklenburg-Vorpommerns erforderlich. In den anderen Teilgebieten ist der Minderungsbedarf mit weniger als 30 kg N/ (ha·a) meist deutlich geringer.

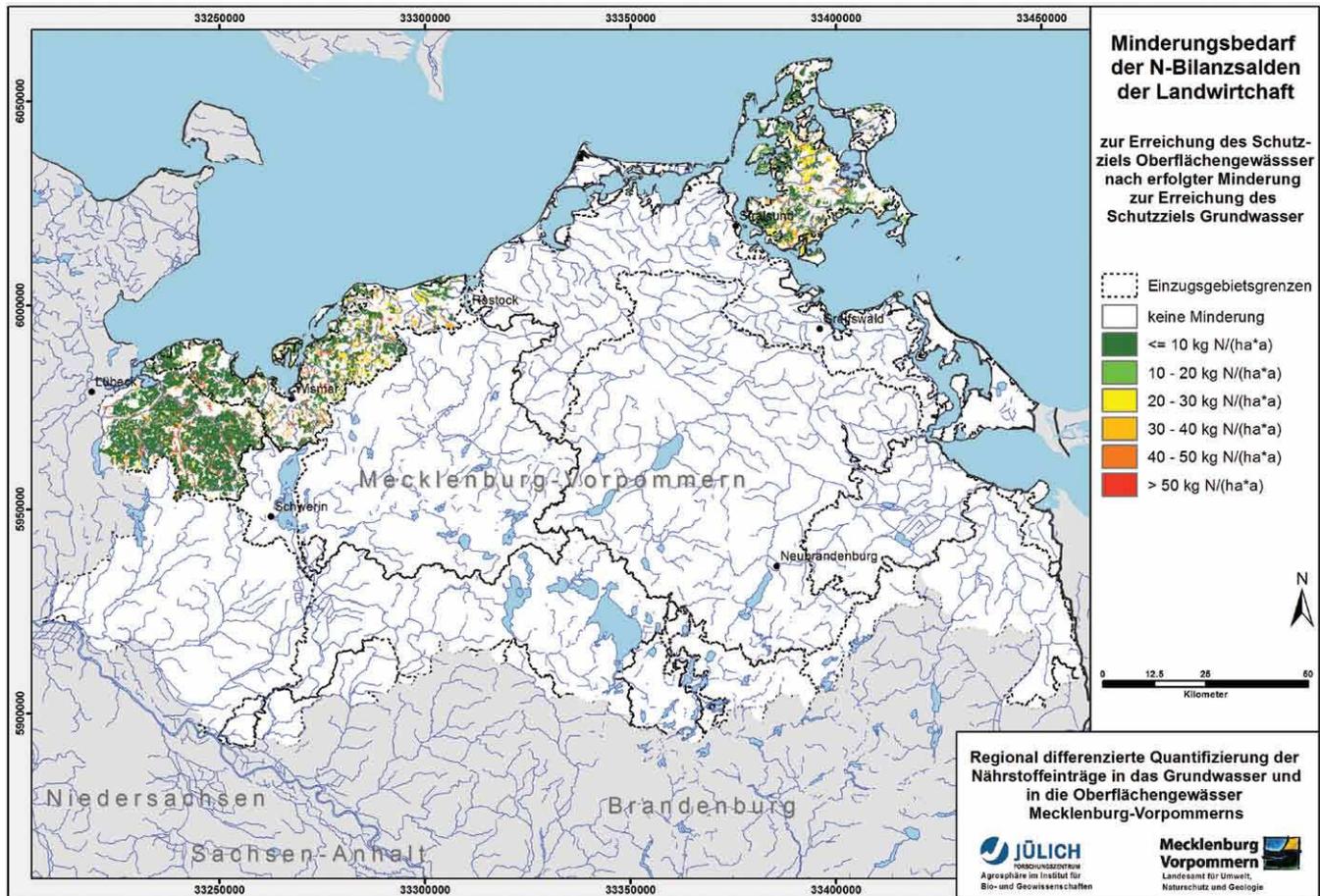
### 3.5 N-Minderungsbedarf bei kombiniertem Grundwasser- und Meeresschutzziel

Neben der für das Grundwasser und die Küstengewässer getrennten Ermittlung des N-Minderungsbedarfs wurde untersucht, welche Konsequenzen ein kombiniertes Grundwasser- / Meeresschutzziel hätte. Hierbei wurde entsprechend der in HIRT et al. (2012) beschriebenen Vorgehensweise davon ausgegangen, dass zunächst das Schutzziel für das Grundwasser zu erreichen ist, um danach zu untersuchen, ob ggf. weiterer Minderungsbedarf für das Erreichen der Meeresschutzziele besteht. Der auf diese Weise ermittelte N-Minderungsbedarf ist in Abbildung 8 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die N-Bilanzsalden nach der Minderung zur Erreichung des Grundwasserschutzziels in den Teilgebieten Stepenitz, Wallensteingraben und Rügen zusätzlich reduziert werden müssen, um auch das Schutzziel für die Ostsee-Küstengewässer zu erreichen. Insgesamt handelt es sich um eine erforderliche zusätzliche N-Reduktion in der Größenordnung von ca. 1.000 t N/a.



**Abbildung 7**  
 Erforderliche Minderung der N-Bilanzsalden der Landwirtschaft zur Erreichung der N-Zielkonzentrationen für die Nord- bzw. Ostsee in den Einzugsgebieten mit dreistelliger LAWA-Fließgewässerkennzahl  
*N-reduction requirement for guaranteeing compliance with the environmental targets for North Sea (2.8 mg N/l) and Baltic Sea (2.6 mg N/l)*



**Abbildung 8**

Minderungsbedarf der N-Bilanzsalden der Landwirtschaft zur Erreichung des Schutzziels für die Oberflächengewässer in den Teilgebieten nach erfolgter N-Minderung zur Erreichung des Grundwasserschutzziels

*N-reduction requirement to reach the N quality targets for the North Sea and the Baltic Sea by applying a combined groundwater - surface water approach*

Für weite Teile Mecklenburg-Vorpommerns ergibt sich nach Annahme der erfolgten N-Minderung zur Erreichung des Grundwasserschutzziels kein weiterer Minderungsbedarf für Nord- und Ostsee. Durch das Erreichen des Grundwasserschutzziels können also auch die Schutzziele von Nord- bzw. Ostsee (fast) erreicht werden. Die landesweite Umsetzung von N-Reduktionsmaßnahmen zum Grundwasserschutz sollte deshalb auch bei der Umsetzung von Maßnahmen für die Erreichung der Meeresschutzziele eine hohe Priorität haben.

#### 4 Szenariorechnungen zu den Auswirkungen von landwirtschaftlichen Anpassungsmaßnahmen auf die N-Einträge ins Grundwasser und in die Oberflächengewässer

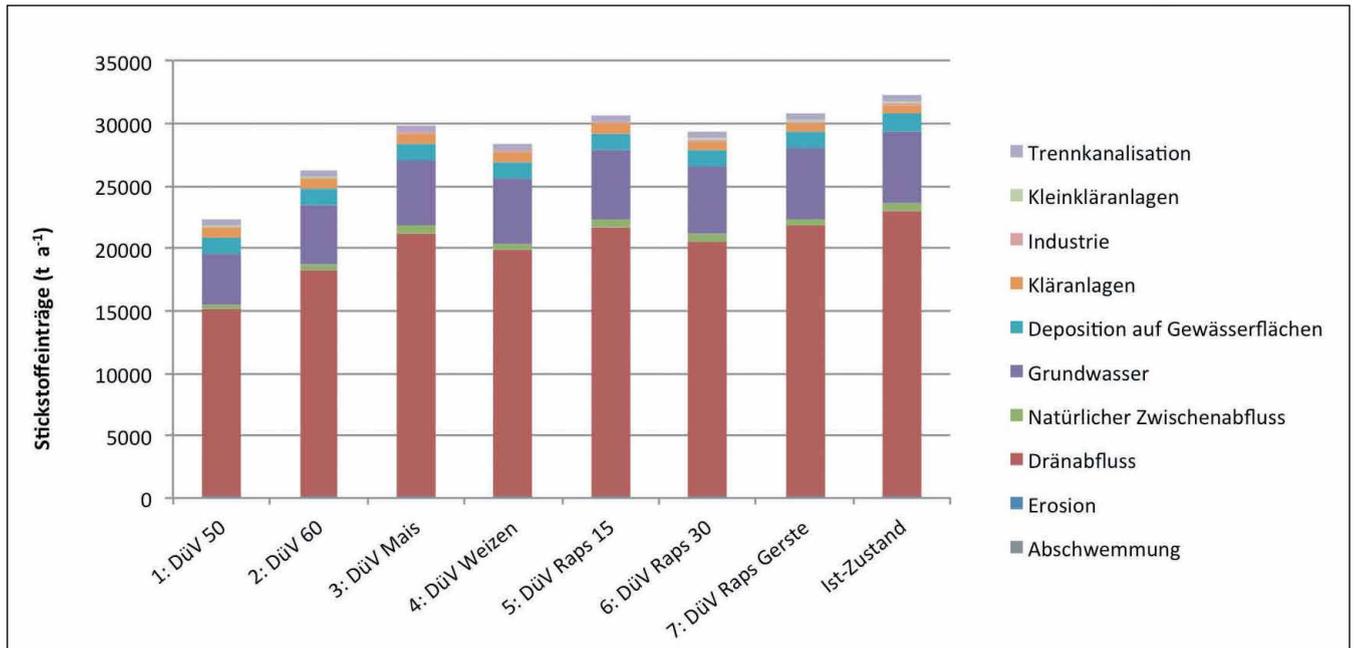
Zentrale und wichtigste grundlegende Maßnahme zur Minderung der diffusen Nährstoffbelastungen in Deutschland ist die Düngeverordnung (DüV 2012). Nährstoffbilanzen sind dabei ein allgemein anerkannter Schlüsselindikator zur Dokumentation, Analyse und Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Produktionssysteme hinsichtlich der Nährstoffausträge in Gewässer. In zwei Szenarien wurde die Auswirkung von flächendeckend eingehaltenen N-Bilanzsalden auf die N-Einträge in das Grundwasser und die Oberflächengewässer analysiert:

- Szenario 1 (DüV 60): Begrenzung aller N-Bilanzsalden der Landwirtschaft auf 60 kg/(ha-a)

- Szenario 2 (DüV 50): weitere Absenkung der N-Bilanzsalden der Landwirtschaft auf 50 kg/(ha-a).

Von der LFB wurden darüber hinaus die Auswirkungen möglicher landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsanpassungen auf die N-Überschüsse bestimmter Kulturarten bzw. auf Betriebsebene abgeschätzt. Diese basieren auf langjährigen Erfahrungswerten im Umgang mit der aktuellen DüV (2012) und der fachlichen Einschätzung voraussichtlicher Auswirkungen der DüV-Novelle, welche mit Stand des Referentenentwurfs vom 14. August 2014 vorlag (DüV 2014). Hieraus wurden fünf weitere Szenarien abgeleitet:

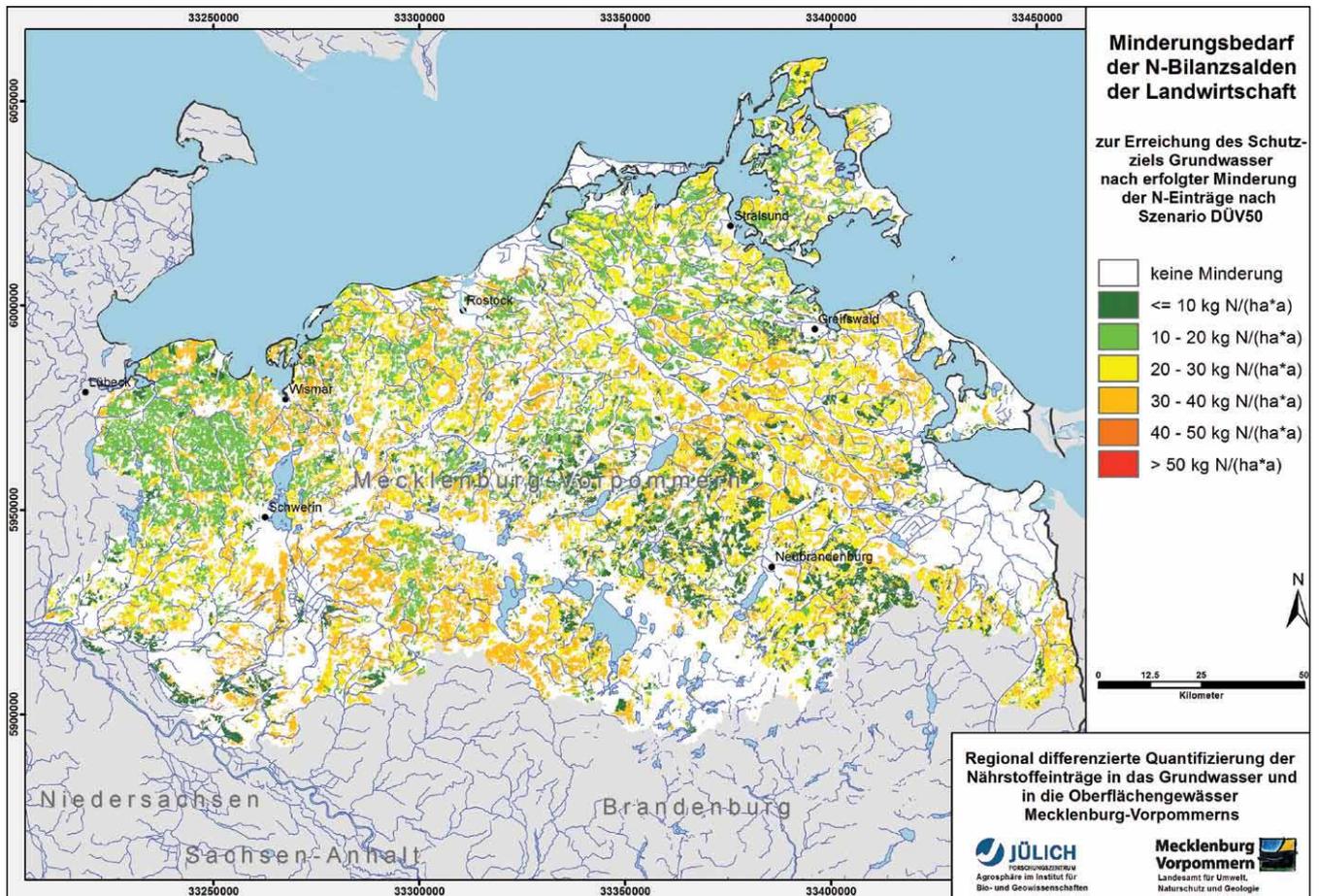
- Szenario 3 (DüV Mais): Reduktion der N-Bilanzsalden auf allen Maisflächen um 40 kg N/(ha-a),
- Szenario 4 (DüV Weizen): Reduktion der N-Bilanzsalden auf allen Weizenflächen um 12 bzw. 27 kg N/(ha-a) nach Raps,
- Szenario 5 (DüV Raps 15): Reduktion der N-Bilanzsalden auf allen Rapsflächen um 15 kg N/(ha-a) in Abhängigkeit von der N-Aufnahme im Herbst und Berücksichtigung bei der 1. Frühjahrsgabe bzw.
- Szenario 6 (DüV Raps 30): Reduktion der N-Bilanzsalden auf allen Rapsflächen um 30 kg N/(ha-a) in Abhängigkeit von der N-Aufnahme im Herbst und Berücksichtigung bei der 1. Frühjahrsgabe,
- Szenario 7 (DüV Raps Gerste 30): Reduktion der N-Bilanzsalden nur auf den Rapsflächen um 30 kg N/(ha-a), die dem Umfang des Wintergersteanbaus entsprechen.



**Abbildung 9**

Summen der N-Einträge in die Oberflächengewässer Mecklenburg-Vorpommerns für verschiedene landwirtschaftliche Anpassungsmaßnahmen zur Verringerung des N-Bilanzsaldos

*N-input into the surface waters in Mecklenburg-Vorpommern after applying different agricultural adaption measures to reduce agricultural N-balance surpluses*



**Abbildung 10**

Erforderliche Minderung des N-Bilanzsaldos zur Erreichung des Grundwasserschutzziels nach Umsetzung von Szenario 2 (DüV 50)

*Additional N-reduction required to reach groundwater quality target after limitation of agricultural N-balance surplus to 50 kg N/(ha-a)*

Mit den modifizierten N-Bilanzsalden der Szenarien 1-7 wurde jeweils ein kompletter GROWA-DENUZ-WEKU-Modelllauf durchgeführt, wobei alle anderen Modellparameter konstant gehalten wurden. Die Ergebnisse der 7 Rechengänge sind in Abbildung 9 nach Eintragspfaden differenziert gegenübergestellt.

Eine konsequente Umsetzung der geltenden DüV ergäbe einen Rückgang der N-Einträge in die Vorfluter von ca. 32.000 t N/a auf ca. etwas über 26.000 t N/a bei Szenario 1 (DüV 60) und auf ca. 22.500 t N/a bei Szenario 2 (DüV 50). Bei Umsetzung der Szenarien 3 – 7 wären die Effekte – einzeln betrachtet – deutlich geringer. Dieser Sachverhalt legt den Schluss nahe, dass in vielen Regionen vermutlich in erster Linie durch eine stringente Umsetzung der (novellierten) DüV ein effizienter Rückgang der N-Einträge in die Oberflächengewässer erreicht werden kann.

#### 4.1 Szenariorechnungen zu den Auswirkungen von N-Minderungsmaßnahmen auf die Erreichung der Schutzziele

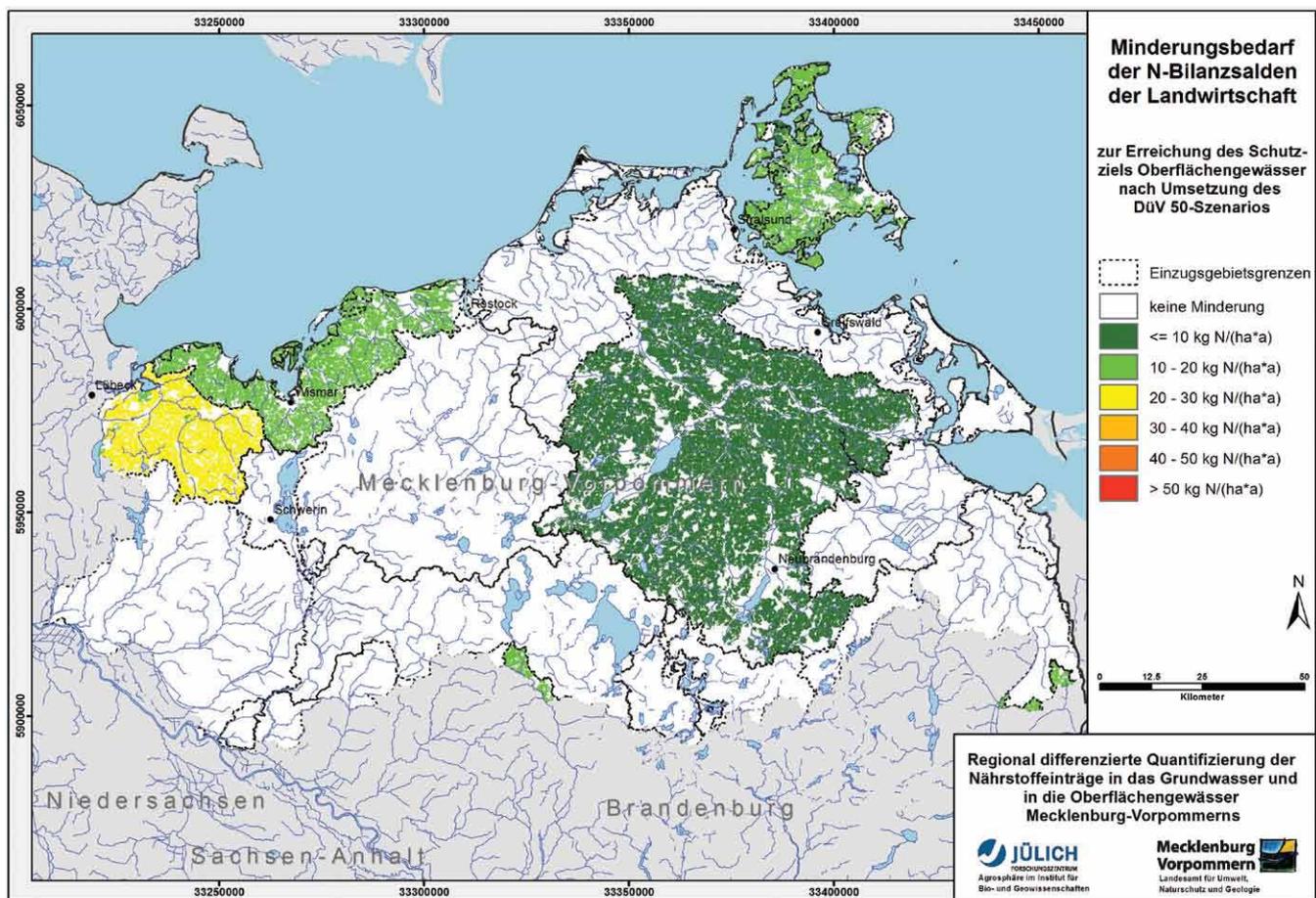
Um abzuschätzen, in welchem Maße die oben diskutierten Minderungsmaßnahmen ausreichend sind, um die Schutzziele zu erreichen, wurde ein Modelllauf durchgeführt, bei dem als Startgröße das restriktivste Szenario („DüV 50“) betrachtet wurde (Abb. 9).

Hierzu wurde in den Gebieten mit Flächenbilanzsalden über 50 kg N/a eine entsprechende Kappung auf 50 kg N/a vorgenommen.

Abbildung 10 zeigt, dass auch dieses Szenario nicht ausreichen würde, um flächendeckend für Mecklenburg-Vorpommern das Schutzziel Grundwasser zu erreichen.

Verglichen mit dem aktuellen Zustand würde sich der verbleibende N-Minderungsbedarf zwar auf etwa die Hälfte (ca. 20.500 t N/a) reduzieren, es würde sich für weite Teile Mecklenburg-Vorpommerns aber noch ein Minderungsbedarf ergeben.

Abbildung 11 zeigt den zusätzlichen Minderungsbedarf des N-Flächenbilanzsaldos, der sich ergäbe, wenn man nach Erreichung des Szenarios „DüV 50“ auch die Meeresschutzziele erreichen möchte. Es wird deutlich, dass die Meeresschutzziele durch eine konsequente und flächendeckende Umsetzung der „DüV 50“ für viele Teilgebiete erreicht werden können. Für einige Teilgebiete (Stepenitz, Wallensteingraben, Rügen und Peene) wären jedoch weitere Minderungen in einem Gesamtumfang von ca. 6.500 t N/a erforderlich.



**Abbildung 11**  
 Minderungsbedarf der N-Bilanzsalden der Landwirtschaft zur Erreichung des Schutzziels für die Oberflächengewässer in den Teilgebieten nach Umsetzung des „DüV 50“- Szenarios.  
 Additional N-reduction required to reach the quality targets for the coastal waters after area-covering limitation of agricultural N-balance surplus to 50 kg N/(ha-a)

## 5 Ausblick

Die vielfältigen im Projekt erarbeiteten Modellergebnisse, Daten und Karten der Ist-Zustandsanalyse fließen in die im LUNG erstellten Bewirtschaftungspläne, Maßnahmenprogramme und Hintergrundpapiere nach EG-WRRL (2000) und EU-MSRL (2008) ein. Sie werden über das LUNG den Wasser- und Landwirtschaftsbehörden bzw. der Fachöffentlichkeit zur Verfügung gestellt und sind Grundlage für weitere, detailliertere Auswertungen, z.B. auf Teileinzugsgebiets- oder Betriebsebene. Verwendungsmöglichkeiten bestehen beispielweise für Gutachten zur See-Einzugsgebietssanierung oder zu Projektgebieten von anderen WRRL-Maßnahmen, für raumordnerische und naturschutzrechtliche Planungen und in der Landwirtschaftsberatung für die Darstellung der Belastungssituation sowie des betrieblichen Gefährdungspotenzials und Minderungsbedarfs.

Die Größenordnung des N-Minderungsbedarfs zur Erreichung des Grundwasserschutzziels sowie die durchgeführten Szenariorechnungen zur Analyse der Auswirkung von landwirtschaftlichen Anpassungsmaßnahmen auf die N-Einträge ins Grundwasser und die Oberflächengewässer haben gezeigt, dass die Umsetzung von Einzelmaßnahmen nicht ausreichen wird, die entsprechenden Schutzziele zu erreichen. Hinter den Einzelmaßnahmen verbirgt sich aber ein N-Minderungspotenzial, das u.U. bei einer kombinierten Anwendung in der landwirtschaftlichen Praxis zur Zielwerterreichung beitragen kann. Diesbezügliche Szenariorechnungen unter Einbeziehung des GROWA-DENU-WEKU-Modellpakets werden empfohlen, zumal sich hierüber ggf. regional optimale angepasste Maßnahmenkombinationen ermitteln lassen.

In besonders sensiblen Gebieten sollte eine weitergehende Anpassung der Landbewirtschaftung erfolgen. Auch sind die Quellen der atmosphärischen Deposition wie z.B. Emissionen aus Industrieanlagen und Verkehr, aber auch die ebenfalls landwirtschaftlichen Quellen Bodenbearbeitung, Düngerausbringungsverluste und Tierhaltungsanlagen zu betrachten. Hierzu bedarf es aber einer bundesweiten Strategie, da Emissions- und Immissionsorte räumlich z.T. erheblich getrennt sind (SRU 2015). Parallel dazu sollten ergänzende Maßnahmen an weiteren „Stellschrauben“ des Stickstoffkreislaufs in Betracht gezogen werden, die zu einer Erhöhung des Nährstoffrückhalts durch landwirtschaftliches Wassermanagement beitragen, wie z.B. controlled drainage, Anlage von Retentionsflächen oder -teichen, Erhöhung der Strukturvielfalt in Fließgewässern (DWA 2012).

Vor dem Hintergrund der Novelle der Düngeverordnung (DÜV 2014) wird eine Weiterentwicklung der Methodik sowie die Verstärkung der landesweiten Berechnung von landwirtschaftlichen N-Bilanzsalden als erforderlich angesehen, die mögliche Veränderungen beim Düngeverhalten der Landwirte in besonders sensiblen Gebieten einbezieht. In diesem Zusammenhang sollte auch eine erneute GROWA-DENU-WEKU-Modellierung erfolgen, in die z.B. Erkenntnisse aus der Umsetzung von Ansätzen zum landwirtschaftlichen Wassermanagement (z.B. zur Erhöhung des Nährstoffrückhalts durch Dränteiche) einbezogen werden. Auf dieser Basis könnten dann weiter verfeinerte Prognosen und Empfehlungen für den 3. Bewirtschaftungszeitraum (2021-2027) der EG-WRRL bereitgestellt werden.

## Outlook

A compilation of state-wide data sets comprising all input parameters and model results has been submitted to LUNG, the state institution in Mecklenburg-Vorpommern taking control of the dissemination of the findings of the research project. LUNG itself has included several model results in the river basin management plans and programmes of measures according to the requirements of the EU Water Framework Directive EU-WFD (2000) and the Marine Strategy Framework Directive EU-MSFD (2008). Extracts of the data sets are made available by LUNG to regional water authorities and agricultural authorities. There, data sets are used for detailed analyses on the level of sub-basins, e.g. with regard to the identified hot-spot-areas of N pollution. Further institutions benefiting from the model input parameters and model results at regional level include regional and nature conservation planning agencies, e.g. for the restoration of lakes and their catchment areas. The same applies to institutions dealing at local level with the authorization procedures for the expansion of farms, e.g. in order to better understand, qualify, and quantify the effects of an increased livestock density.

The determined dimension of required N-reduction needed to reach the groundwater quality target and the scenario analyses carried out to assess the impact of agricultural adaptation strategies on the N-input into groundwater and the coastal waters indicate that the implementation of individual measures will not be sufficient to reach the corresponding environmental targets. The potential of the individual measures may be better exploitable, however, in case of a combined application taking the regionally prevailing site and cultivation conditions into account. Related scenario analyses should be carried out, especially since this may contribute to find regional optimized combinations of measures.

The implementation of far reaching adaptation measures is by all means recommended for very vulnerable soils. Additionally the sources contributing to atmospheric N deposition should be assessed in detail for both, the emissions from industry and traffic and the agricultural sources (soil cultivation, N volatilization from organic fertilizers and livestock facilities). This however requires the implementation of a German-wide strategy as the emission and imission of atmospheric N compounds are in different locations (SRU 2015). Due to the high N-reduction necessary to comply with the groundwater quality standard complementary measures should be taken into account increasing the N retention in catchments, e.g. by installing and expanding drainage ponds, initiating controlled drainage or developing natural structural diversity in rivers and lakes (DWA, 2012).

Against this background the limitation of agricultural N-balance surplus to 50 kg N/(ha-a) according to the upcoming amendment to the German Fertilizer Ordinance (DÜV 2014) has without any doubt a high potential. Its implementation is however associated with a sustainable change of the actual fertilization schemes as it implies tougher requirements in terms of the maximum permissible agricultural N-balance surplus. The desired positive impact on groundwater and surface water quality depends largely on a consistent area-covering enforcement into agricultural practice (LAWA 2014).

The forthcoming second management period (2015-2021) of EU-WFD (2000) should be accompanied by a repeated state-wide application of the GROWA-DENU-WEKU-model in Mecklenburg-Vorpommern. The consideration of on-going model improvements, e.g. concerning the higher temporal resolution of model analyses may contribute to refine conclusions and recommendations with regard to regionally adapted N-reduction requirements for the third management period (2021-2027). This also applies to the approach by BIOTA (2013) to determine agricultural N-balance surpluses and includes above all the consideration of adapted good-farming practices and the corresponding modified of fertiliser use in the model.

**Anschriften der Verfasser:**

Dr. R. Kunkel  
 Dipl.-Ing. L. Keller  
 Dr. B. Tetzlaff  
 Prof. Dr. F. Wendland  
 Forschungszentrum Jülich (FZJ)  
 Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre - Agrosphäre (ICG-4)  
 52425 Jülich  
 f.wendland@fz-juelich.de

Dr. H.-E. Kape  
 Zuständige Stelle für landwirtschaftliches Fachrecht und Beratung (LFB) bei der LMS Agrarberatung GmbH  
 Graf-Lippe-Str. 1, 18059 Rostock

Dipl.-Ing. F. Koch  
 Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG)  
 Goldberger Straße 12, 18273 Güstrow

**Literaturverzeichnis**

ARGE BLMP (2011): Konzept zur Ableitung von Nährstoffreduzierungszielen in den Flussgebieten Ems, Weser, Elbe und Eider aufgrund von Anforderungen an den ökologischen Zustand der Küstengewässer gemäß Wasserrahmenrichtlinie. – Bundesländer Messprogramm; www.blmp-online.de, 50 S.

BEHRENDT, H., P. HUBER, M. LEY, D. OPITZ, O. SCHMOLL, G. SCHOLZ & R. UEBE (1999): Nährstoffbilanzierung der Flussgebiete Deutschlands. – UBA-Texte 79/99, Berlin

BEHRENDT, H. & D. OPITZ (2000): Retention of nutrients in river systems: dependence of specific runoff and hydraulic load. – *Hydrobiologia* 410, 111–122

BIOTA (2013): Regionalisierte Flächenbilanzen für Stickstoff und Phosphor auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in Mecklenburg-Vorpommern. – Abschlussbericht zum Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Bützow, 196 S.

BLANO (2014): Harmonisierte Hintergrund- und Orientierungswerte für Nährstoffe und Chlorophyll-a in den deutschen Küstengewässern der Ostsee sowie Zielfrachten und Zielkonzentrationen für die Einträge über die Gewässer – Konzept zur Ableitung von Nährstoffreduktionszielen nach den Vorgaben der Wasserrahmenrichtlinie, der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie, der Helsinki-Konvention und des Göteborg-Protokolls. – Hrsg. Bund/Länder-Ausschuss Nord-

und Ostsee (BLANO) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 97 S.

BLMP (2011): Konzept zur Ableitung von Nährstoffreduzierungszielen in den Flussgebieten Ems, Weser, Elbe und Eider aufgrund von Anforderungen an den ökologischen Zustand der Küstengewässer gemäß Wasserrahmenrichtlinie. – Ad-hoc-AG Nährstoffreduzierung des Bund/Länder-Messprogramms Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie, 50 S.

BORCHARDT, D., U. BOSENIUS, R.D. DÖRR, H.P. EWENS, U. IRMER, H. JEKEL, L. KEPNER, V. MOHAUPT, S. NAUMANN, B. RECHENBERG, J. RECHENBERG, S. RICHTER, S. RICHTER, W. ROHRMOSER, T. STRATENWERTH, J. WILLECKE & R. WOLTER (2005): Die Wasserrahmenrichtlinie – Ergebnisse der Bestandsaufnahme 2004 in Deutschland. – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und Umweltbundesamt, 68 S.

DÜV (2012): Düngeverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S. 221), zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 36 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212)

DÜV (2014): Verordnung zur Neuordnung der guten fachlichen Praxis beim Düngen. – Verordnungsentwurf des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft vom 14. August 2014, 108 S.

DWA (2012): Reduktion der Stoffeinträge durch Maßnahmen im Drän- und Gewässersystem sowie durch Feuchtgebiete. – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, Themenheft T2/2012

EG-GWR (2006): Richtlinie 2006/118/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 2006 zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung

EG-WRRL (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 (Wasserrahmenrichtlinie)

EU-MSRL (2008): Richtlinie 2008/56/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt. – Amtsblatt der Europäischen Union L 164/19

FGG WESER (2013): Stand der Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie in der Flussgebietseinheit Weser 2012. – Flussgebietsgemeinschaft Weser, Hildesheim, 56 S.

FGG ELBE (2015): Anwendung des Nährstoffbilanzierungsmodells MONERIS – Gesamtbericht zum Projekt. – Unveröffentl. Berichtsentwurf Januar 2015, 102 S.

FUCHS, S., U. SCHERER, R. WANDER, H. BEHRENDT, M. VENOHR & D. OPITZ (2010): Berechnung von Stoffeinträgen in die Fließgewässer Deutschlands mit dem Modell MONERIS – Nährstoffe, Schwermetalle, und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe. – UBA-Texte 45/2010, 243 S.

GAUGER, T., H.-D. HAENEL, C. RÖSEMANN, U. DÄMMGEN, A. BLEEKER, J.W. ERISMAN, A.T. VERMEULEN, M. SCHAAP, R.M.A. TIMMERMANN, P.J.H. BUILTJES, J.H. DUYZER, H.-D. NAGEL, R. BECKER, P. KRAFT, A. SCHLUTOW, G. SCHÜTZE, R. WEIGELT-KIRCHNER & F. ANSHELM (2008): Erfüllung der Zielvorgaben

- der UNECE-Luftreinhaltkonvention (Wirkungen). – Abschlussbericht zum Ufoplan-Vorhaben FKZ 204 63 252. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Dessau-Rosslau
- HALBFAß, S., M. GEBEL, H. FRIESE, K. GRUNEWALD & M. MANNSFELD (2009): Atlas der Nährstoffeinträge in sächsische Gewässer. – Hrsg. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden (Nährstoffatlas Sachsen)
- HEIDECKE, C., U. HIRT, P. KREINS, P. KUHR, R. KUNKEL, J. MAHNKOPF, M. SCHOTT, B. TETZLAFF, M. VENOHR, A. WAGNER & F. WENDLAND (2014): Entwicklung eines Instrumentes für ein flussgebietsweites Nährstoffmanagement in der Flussgebietseinheit Weser. – Sonderheft Landbauforschung, vTI Braunschweig, 346 S.
- HIRT, U., P. KREINS, U. KUHN, J. MAHNKOPF, M. VENOHR & F. WENDLAND (2012): Management options to reduce future nitrogen emissions into rivers: A case study of the Weser river basin, Germany. – *Agricultural Water Management* 115, 118–131
- HYDOR (2011): Ermittlung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung nach der DIN 19732 für Mecklenburg-Vorpommern. – Projektbericht der Hydor Consult GmbH an das Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, 54 S.
- HYDOR (2010): Ermittlung grundwasserbeeinflusster oberirdischer Gewässer in Mecklenburg-Vorpommern. – Projektbericht der Hydor Consult GmbH an das Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, 49 S.
- KAHLE, P., S. SCHÖNEMANN & B. LENNARTZ (2013): Wirksamkeit von Gewässerrandstreifen auf Nitrateinträge in Oberflächengewässer gedränkter Tiefland Einzugsgebiete. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 57 (2) 60–68; DOI: 10.5675/HyWa\_2013,2\_2
- KREINS, P., H. BEHRENDT, H. GÖMANN, U. HIRT, R. KUNKEL, K. SEIDEL, B. TETZLAFF & F. WENDLAND (2010): Analyse von Agrar- und Umweltmaßnahmen im Bereich des landwirtschaftlichen Gewässerschutzes vor dem Hintergrund der EG-Wasserrahmenrichtlinie in der Flussgebietsgemeinschaft Weser. – *AGRUM Weser*. vTI, Braunschweig, Landbauforschung Sonderheft 336, 342 S.
- KUHR, P., J. HAIDER, P. KREINS, R. KUNKEL, B. TETZLAFF, H. VERECKEN & F. WENDLAND (2013): Model Based Assessment of Nitrate Pollution of Water Resources on a Federal State Level for the Dimensioning of Agro-environmental Reduction Strategies: The North Rhine-Westphalia (Germany) Case Study. – *Water Resources Management* 27 (3), 885–909
- KUNKEL, R., M. BACH, H. BEHRENDT & F. WENDLAND (2004): Groundwater-borne nitrate intakes into surface waters in Germany. – *Water Science and Technology* 49, 11–19
- KUNKEL, R., H. BOGENA, B. TETZLAFF & F. WENDLAND (2006): Digitale Grundwasserneubildungskarte von Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Hamburg und Bremen: Erstellung und Auswertungsbeispiele. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 50 (5), 212–219
- KUNKEL, R. & F. WENDLAND (1997): WEKU – A GIS-supported stochastic model of groundwater residence times in upper aquifers for the supraregional groundwater management. – *Environmental Geology* 30, 1–9
- KUNKEL, R. & F. WENDLAND (2006): Diffuse Nitrateinträge in die Grund- und Oberflächengewässer von Rhein und Ems. – *Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment* 62, 130 S.
- LAWA (2014): Prognose der Auswirkungen einer nach Gewässerschutzaspekten novellierten Düngeverordnung auf die Qualität der Oberflächengewässer in Deutschland. – Hrsg. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Kiel, 32 S.
- MLUV (2011): Konzept zur Minderung der diffusen Nährstoffeinträge aus der Landwirtschaft in die Oberflächengewässer und in das Grundwasser in Mecklenburg-Vorpommern. – Hrsg. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin, 102 S.
- MÜLLER, U. & F. RAISSI (2002): Arbeitshilfe für bodenkundliche Stellungnahmen und Gutachten im Rahmen der Grundwasser-ernutzung. – *Arbeitsheft Boden*, H. 2002/2, Hannover
- OSPAR COMMISSION (Hrsg.) (1998): Principles of the comprehensive study on riverine inputs and direct discharges (RID). – Reference 1998-05, o.O., 16 S.
- RADOST-VERBUND (2014): RADOST-Abschlussbericht. – Hrsg. Ecologic Institut, Berlin. RADOST-Berichtsreihe, Bericht Nr. 27
- SCHEER, C. & N. PANCKOW (2010): Verringerung von Risikopotenzialen aufgrund landwirtschaftlicher Nutzung für den Naturschutz im Peenetal – Quantifizierung diffuser Nährstoffausträge landwirtschaftlicher Nutzflächen und Risikobetrachtung für die angrenzenden Naturschutzflächen. – Projektbericht im Auftrag der Hochschule Neubrandenburg, 46 S., unveröffentl.
- SRU (2015): Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem. Sachverständigenrat für Umweltfragen – Sondergutachten. – Sachverständigenrat für Umweltfragen, Berlin, 564 S.
- TETZLAFF, B., K. FRIEDRICH, T. VORDERBRÜGGE, H. VERECKEN & F. WENDLAND (2011): Distributed modelling of mean annual soil erosion and sediment delivery rates to surface waters. – *Catena* 102, 13–20
- TETZLAFF, B., J. HAIDER, P. KREINS, P. KUHR, R. KUNKEL & F. WENDLAND (2013): Grid-based modelling of nutrient inputs from diffuse and point sources for the state of North Rhine-Westphalia (Germany) as a tool for river basin management according to EU-WFD. – *River Systems* 20 (3–4), 213–229
- TETZLAFF, B., P. KREINS, R. KUNKEL & F. WENDLAND (2007): Area-differentiated modelling of P-fluxes in heterogeneous macroscale river basins. – *Water Science and Technology* 55 (3), 123–131
- WENDLAND, F., H. BEHRENDT, H. GÖMANN, U. HIRT, P. KREINS, U. KUHN, R. KUNKEL & B. TETZLAFF (2009): Determination of nitrogen reduction levels necessary to reach groundwater quality targets in large river basins: the Weser basin case study, Germany. – *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 85 (1), 63–78

- WENDLAND, F., H. BEHRENDT, U. HIRT, P. KREINS, U. KUHN, P. KUHR, R. KUNKEL & B. TETZLAFF (2010): Analyse von Agrar- und Umweltmaßnahmen zur Reduktion der Stickstoffbelastung von Grundwasser und Oberflächengewässer in der Flussgebietseinheit Weser. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 54 (4), 231–244
- WENDLAND, F., G. BERTHOLD, J.-G. FRITSCHE, F. HERRMANN, R. KUNKEL & H.-J. VOIGT (2011): Konzeptionelles hydrogeologisches Modell zur Analyse und Bewertung von Verweilzeiten in Hessen. – *Grundwasser* 16 (3), 163–176
- WENDLAND, F., L. KELLER, P. KUHR, R. KUNKEL & B. TETZLAFF (2015): Regional differenzierte Quantifizierung der Nährstoffeinträge in das Grundwasser und in die Oberflächengewässer Mecklenburg-Vorpommerns unter Anwendung der Modellkombination GROWA-DENUZ-WEKU-MEPHos. – Projektabschlussbericht, Forschungszentrum Jülich, 233 S.
- WENDLAND, F. & R. KUNKEL (1999): Der Landschaftswasserhaushalt im Elbeinzugsgebiet (Deutscher Teil). – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 43 (5), 226–233
- WIEBENSOHN, J. (2008): Erprobung einer neuen Methodik zur Erstellung regionaler Stickstoff- und Phosphorflächenbilanzen für Mecklenburg-Vorpommern auf der Basis verfügbarer Daten der Agrarstatistik. – Masterarbeit, Universität Rostock, 68 S.