

**This is the preprint version of the contribution published as:**

**Rode, M., Völker, J., Grau, T., Borchardt, D., Trepel, M., Ollesch, G. (2018):**  
Evaluierung von Nährstoffbilanzmodellen für die zukünftige Flussgebietsbewirtschaftung  
*Wasser und Abfall* **20** (3), 41 – 48

**The publisher's version is available at:**

<http://dx.doi.org/10.1007/s35152-018-0031-6>

Michael Rode, Jeanette Völker, Thomas Grau, Dietrich Borchardt, Michael Trepel & Gregor Ollesch

## **Evaluierung von Nährstoffbilanzmodellen für die zukünftige Flussgebietsbewirtschaftung**

Es bestehen hohe Anforderungen an Nährstoffbilanzmodelle: eine ausreichende räumliche und zeitliche Auflösung der Prozessbeschreibung, eine umfassende Darstellung von Managementmaßnahmen und ein hohes Maß an Modellsicherheit. Die bisher verwendeten Modelle bilden den Status quo von Nährstoffpfaden ab. Sichere, langfristige Vorhersagen und Szenarioanalysen zu Auswirkungen von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Nährstoffbelastung scheinen eingeschränkt zu sein.

### **1. Einleitung und Zielsetzung**

Im Rahmen der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) ist es erforderlich, die Nährstoffbelastung von Grund- und Oberflächengewässern für größere Einzugsgebiete zu quantifizieren. Hierbei ist eine Abschätzung der Belastung hinsichtlich der wichtigsten Eintragspfade aus diffusen und punktuellen Quellen erforderlich. Darüber hinaus sind die Wechselwirkungen zwischen Bodennutzungsstrukturen und der Nährstoffbelastung der Gewässer zu analysieren, um hierauf aufbauend Maßnahmen zur Reduzierung schädlicher Nährstoffbelastungen abzuleiten. Die Auswertung von Monitoringdaten allein ist für die Untersuchung von Eintragspfaden nicht hinreichend, vielmehr ist die Entwicklung und Anwendung von Nährstoffbilanzmodellen erforderlich, die eine kausale Beziehung zwischen Landnutzung und Nährstoffbelastung der Grund- und Oberflächengewässer herstellen.

Daher hat die Flussgebietsgemeinschaft (FGG) Elbe beschlossen, die bisherigen Modellansätze zu prüfen und deren Eignung für die Aufstellung von zukünftigen Nährstoffmanagementkonzepten für große Flussgebiete zu bewerten. Bisher fehlt eine systematische Definition der Anforderungen an die Nährstoffmodellierung, die mit dem Bewirtschaftungszyklus der WRRL verbunden ist. Ziel der vorliegenden Studie war es daher, die wichtigsten, derzeit in Deutschland und den europäischen Nachbarstaaten eingesetzten Nährstoffbilanzansätzen zu analysieren und unter Einbeziehung neuer wissenschaftlicher Ergebnisse zu bewerten. Hierzu wurden die Informationen aus den nationalen und internationalen Bewirtschaftungsplänen sowie weitergehende Planungen der Länder zugrunde

gelegt und die betrachteten Modelle anhand von Fachliteratur strukturiert ausgewertet. Zudem wurden die Anforderungen an die Nährstofftransportmodellierung aus Sicht der behördlichen Praxis anhand einer Fragebogenerhebung erhoben. Aufbauend auf den vorliegenden Modellanalysen und des definierten Anforderungsprofils wurden Empfehlungen für die zukünftige Nährstoffmodellierung abgeleitet. Diese Empfehlungen sind Gegenstand eines folgenden Artikels in *Wasser und Abfall*.

## **2. Verwendete Modelle und Methoden**

Für die Modellbeschreibung und -bewertung wurden zehn Nährstoffbilanzmodelle zugrunde gelegt. Diese Modelle lassen sich hinsichtlich der Prozessbeschreibung in empirisch, konzeptionell, physikalisch basiert und hinsichtlich der Abbildung der räumlichen Einheiten in Blockmodelle, semi-distributed oder räumlich verteilte Modelle gliedern. In Deutschland werden vorwiegend die empirischen Modelle MONERIS (z.B. [1], [2]), MoRe [3], das Modellpaket GROWA-WEKU-DENUZ-MEPHos [4] und STOFFBILANZ [5] genutzt. Diese empirischen Modelle basieren auf Bilanzansätzen und zeichnen sich dadurch aus, dass funktionale Zusammenhänge durch Messdaten anhand statistischer Verfahren - häufig Regressionsansätze - hergestellt werden. Dabei ist die zeitliche Auflösung gering, wohingegen die räumliche Auflösung sehr hoch sein kann.

Konzeptionelle Modelle beschreiben Prozesse in vereinfachter Form mit hoher zeitlicher Auflösung, wobei Parameter oftmals empirisch hergeleitet oder kalibriert werden, wie die Modelle HYPE [6], SWAT [7], SWIM und INCA [8]. Physikalisch basierte Modelle beschreiben hydrologische Prozesse und Nährstofftransportprozesse umfangreich, physikalisch basiert und flächendifferenziert, wie die Modelle MIKE SHE (gekoppelt mit dem Nährstoffmodell DAISY) [9] und STONE [10]. Diese Modelle werden flächendeckend in Dänemark (MIKE SHE) bzw. sollen gekoppelt mit einem Grundwassermodell ebenfalls flächendeckend in den Niederlanden (STONE) angewendet werden.

Blockmodelle beschreiben räumlich Teileinzugsgebiete als eigenständige Berechnungseinheiten (MONERIS) während flächendifferenzierte Modelle möglichst detailliert räumliche Eigenschaften in georeferenzierten Rastereinheiten rekonstruieren (GROWA-WEKU-DENUZ-MEPHos, STOFFBILANZ, MIKE SHE, STONE). Mit semi-distributed-models werden Teileinzugsgebiete und innerhalb dieser Teileinzugsgebiete Flächen mit gleichen hydrologischen Charakteristiken zu kleineren Einheiten (response unit)

zusammengefasst (HYPE, SWAT, SWIM, INCA). Innerhalb der Teileinzugsgebiete sind die response units nicht verortet.

Eine Übersicht der betrachteten Modelle und deren Eigenschaften gibt Tabelle. Ausführliche Übersichten zu den Modelleigenschaften und deren Maßnahmenabbildung sowie zu Literaturhinweisen finden sich in [11].

### **Tabelle 1.**

Die Modellbeschreibung erfolgte für alle Modelle in gleicher Form entsprechend dem Modellaufbau, Umfang der abgebildeten Maßnahmen sowie Umfang und Güte der Modellkalibrierung, -validierung und Unsicherheitsanalysen. Hinsichtlich der für Deutschland wichtigsten Nährstoffbilanzmodelle MONERIS, MoRe, GROWA-DENUZ-WEKU-MEPhos und STOFFBILANZ wurde ein zusätzlicher Vergleich hinsichtlich der wichtigsten Prozessbeschreibungen durchgeführt [11].

Die Modellbewertung erfolgte anhand eines Anforderungsprofils. Dieses wurde auf Basis eines Fragebogens mit insgesamt 52 Fragen abgeleitet, welcher von den Mitgliedern der ad-hoc Arbeitsgruppe „Nährstoffe“ der FGG Elbe und weiterer Teilnehmer aus der wasserwirtschaftlichen Praxis beantwortet wurde. Wesentliche Kriterien hierfür waren die Abbildbarkeit von Maßnahmen und Basisszenarien, die räumliche und zeitliche Diskretisierung, Ist-Zustandsanalyse, Prognosefähigkeit, Datenbedarf und Datenverfügbarkeit, Prozesstiefe und Validität der Ergebnisse.

## **3. Ergebnisse**

### **3.1 Anforderungsprofil**

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse des Fragebogens zeigt Tabelle 2 die an Nährstoffmodelle bestehenden Anforderungen sowie einige Erläuterungen zu den spezifischen Zielen.<sup>1</sup> Szenarien bilden hierbei die Wirkung von unterschiedlichen Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen stationär ab. Unter Prognose wird hingegen die Abschätzung einer zukünftigen Entwicklung verstanden, die auch die veränderte Auswirkung im Zeitverlauf berücksichtigt, wie z.B. die zeitlich verzögerte Wirkung von Düngungsreduktionsmaßnahmen aufgrund der Fließzeit im Grundwasser. Insgesamt wurden 19 Fragebögen ausgewertet. Das Ergebnis ist daher nicht repräsentativ für die bundesweite

---

<sup>1</sup> Die in Tabelle 2 aufgeführten Anforderungen übersteigen zum Teil die durch die Länder an die bestehenden Modelle gestellten Anforderungen.

wasserwirtschaftliche Einschätzung, da wichtige Akteure wie der Bund oder das UBA nicht beteiligt waren. Es bietet aber ein Meinungsbild für die Spezifizierung der Anforderungen im Elbegebiet.

## **Tabelle 2**

Aus den in Tabelle 2 dargestellten Ergebnissen ergeben sich für das Anforderungsprofil an Nährstoffbilanzmodelle insgesamt 15 unterschiedliche Kriterien (Tabelle 4).

### **3.2 Beurteilung der Modelle**

Auf der Basis von Bewertungsmaßstäben für jede der Kriterien erfolgte eine Beurteilung der Modelle hinsichtlich des Anforderungsprofils. Eine Übersicht über die Bewertungsmaßstäbe ist in Tabelle 3 aufgeführt. Grundsätzlich ist anzumerken, dass die Einstufung „+“ die im Anforderungsprofil geforderte Bedingung erfüllt, „++“ einer Übererfüllung entspricht, „0“ den Anforderungen nicht entspricht und bei einer Einstufung mit „-“ das Kriterium im betrachteten Modell zumeist keine Berücksichtigung findet. Die Bewertung der Modelle erfolgte zudem auf Basis der Recherche vorhandener Literatur und Berichte (Tabelle 4).

## **Tabelle 3**

## **Tabelle 4**

Abbildung 1 zeigt zusammenfassend für die einzelnen Modelle die Anzahl der Einstufungen „+“ und „++“ für die insgesamt 15 Anforderungen.

Demnach erfüllt das Modell HYPE am nächsten das Profil mit 12 von insgesamt 15 erfüllten bzw. übererfüllten Anforderungen. Die derzeit in Deutschland verwendeten Modelle MONERIS und STOFFBILANZ erfüllen etwas weniger, das Modellpaket GROWA-WEKUDENUZ-MEPHos erfüllt etwas mehr als 50 % des Anforderungsprofils. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass keine Wichtung der 15 Anforderungen durchgeführt wurde. Eine Wichtung der Anforderungen kann zu Verschiebungen bei der Beurteilung führen.

## **Abbildung 1**

Zusätzlich wurden die Modelle hinsichtlich anwendungsspezifischer Fragestellungen und ihrer Eignung eingestuft. Die Fragestellungen werden folgend beschrieben:

*Modelle zur Quantifizierung von Eintragspfaden*

Die Modelle betrachten die Beschreibung der verschiedenen, durch Fließwege entstehenden Eintragspfade. Wichtige Modelleigenschaften sind eine hohe Modellsicherheit, geringe Unsicherheiten, sowie die Abbildung aller wesentlichen Eintragspfade.

#### *Modelle zur Abbildung der räumlichen Belastung (Hotspots)*

Die Modelle dienen der Identifizierung von stark nährstoffbelasteten- und/oder sensiblen Gebieten. Die Bewertung erfolgt zumeist auf Basis der kleinsten räumlichen Modelleinheit. Modelleigenschaften sind ein räumlich differenzierter Ansatz (Raster), aber auch die räumliche Auflösung der Eingangsdaten (z.B. Boden- und Geologie-, sowie Landnutzungsdaten).

#### *Modelle zur Abbildung des Ist-Zustands und der Entwicklung von Nährstofffrachten*

Die Modelle beschreiben die Entstehung der Nährstoffbelastung vergangener Jahre (keine Prognosen!). Die Ergebnisse sind damit auf Basis von Messwerten validierbar. Modelleigenschaften sind eine hohe Modellsicherheit und geringe Unsicherheiten.

#### *Modelle zur Abbildung von Nährstoffprognosen*

Im Gegensatz zum Ist-Zustand bilden diese Modelle die zukünftige Entwicklung von Nährstoffkonzentrationen unter Berücksichtigung der Prognosesicherheit ab. Dementsprechend sind wichtige Modelleigenschaften eine hohe Modellsicherheit und mindestens monatliche Zeitschritte der Modellergebnisse. Die Umsetzung von Maßnahmen und Basisszenarien wird durch die Sicherheit bei Prognosen begünstigt. Sichere Nährstoffprognosen sind mit gegenwärtig vorliegenden Daten nicht validierbar.

#### *Modelle zur Abbildung von Maßnahmen (Maßnahmenumfang)*

Diese Kategorie umfasst die Anzahl (Quantität) der abgebildeten Maßnahmen. Wichtige Modelleigenschaft ist die Abbildung von Maßnahmen aus unterschiedlichen Belastungsbereichen (diffuse Quellen, Punktquellen, Hydromorphologie).

Die Eignungsbeurteilung erfolgt nach folgender Einstufung:

(-) für die Fragestellung ungeeignet

(0) für die Fragestellung eingeschränkt geeignet (z.B. Anforderungen teilweise nicht erfüllt oder durch geringe Prozessbeschreibung innerhalb des Modells nicht valide)

(+) für die Fragestellung geeignet

(++) für die Fragestellung uneingeschränkt geeignet

Tabelle 5 fasst die Beurteilung der Modelle hinsichtlich der unterschiedlichen Fragestellungen zusammen.

### **Tabelle 5**

Wie aus Tabelle 5 ersichtlich, erreicht keines der beurteilten Modelle alle Anforderungen an die fünf Fragestellungen. Für die Fragestellung hinsichtlich der Quantifizierung von Eintragspfaden wurden die Modelle MONERIS, STOFFBILANZ sowie GROWA-WEKU-DENUZ-MEPHOS mit einem „+“ beurteilt, während HYPE, SWAT und SWIM eher für die Abbildung von Nährstoffprognosen und Szenarien geeignet sind. Das Modell STOFFBILANZ sowie GROWA-WEKU-DENUZ-MEPHOS sind zudem für die Abbildung der räumlichen Belastungen (Hotspots) mit „geeignet“ eingestuft. Es zeigt sich, dass für die Betrachtung des Ist-Zustandes alle Modelle ähnlich gut geeignet sind, allerdings für Vorhersagen große Unterschiede existieren. Während in den für Berichtspflichten genutzten Modellen (MONERIS, GROWA-WEKU-DENUZ-MEPHOS, STOFFBILANZ) eine umfangreiche Liste an Maßnahmen implementiert ist, bilden die konzeptionellen Modelle auf Grund der zeitlichen Schrittweite von einem Tag und der guten Prozessbeschreibung Nährstoffprognosen besser, d.h. mit höherer Vorhersagesicherheit ab. Die drei empirischen Modelle bilden die meisten Eintragspfade ab. Der Grund hierfür ist, dass die konzeptionellen Modelle Einträge aus Punktquellen bisher nur eingeschränkt berücksichtigen.

### **4. Fazit und Ausblick**

Im Rahmen der Studie wurden die bisher im Flussgebiet der Elbe und weiterer Flussgebiete eingesetzten Nährstoffbilanzmodelle bewertet und hinsichtlich eines identifizierten Anforderungsprofils auf deren Eignung untersucht. Derzeit in der Praxis im Elbegebiet eingesetzte Modelle bilden den Ist-Zustand hinsichtlich der Nährstoffeintragspfade für große Einzugsgebiete zufriedenstellend anhand von Jahresbilanzen ab. Hinsichtlich der Abbildung von Maßnahmeneffekten und längerfristigen Prognosen zeigen sich jedoch Defizite durch die stark vereinfachte Berechnung des hydrologischen Kreislaufs. Da der Nährstofftransport und -

umsatz im Fließkontinuum von der Landfläche über das Gewässernetz entscheidend von der quantitativen Hydrologie geprägt wird, ist eine möglichst genaue Abbildung des Wasserhaushalts und seiner zeitlichen Variabilität erforderlich.

Durch die in der Regel durchgeführte Aggregation insbesondere von Zeitreihendaten werden die Informationsgehalte der vorhandenen Daten bisher nicht vollständig ausgeschöpft. Den betrachteten empirischen Modellen ist gemein, dass bei der Status quo Analyse Modellunsicherheiten mit abnehmender Gebietsgröße deutlich zunehmen, was bei der Bewertung räumlich hoch aufgelöster Ergebnisse berücksichtigt werden sollte.

Die Anforderungen an Nährstoffbilanzmodelle beziehen sich insbesondere auf die zentralen Elemente zur Erreichung der Wasserbewirtschaftungsziele gemäß der Umsetzung der WRRL: hohe zeitliche und räumliche Diskretisierung, Modellsicherheit und die genaue Abbildung von Maßnahmen für die Planung und Umsetzung. Eine hohe Modellsicherheit ist notwendig für die Akzeptanz bei Maßnahmenträgern, insbesondere dann, wenn es sich um freiwillige Maßnahmen handelt.

In Anlehnung an die Bewirtschaftungszyklen und die damit einhergehenden Berichtspflichten (alle sechs Jahre) gemäß der Umsetzung der WRRL sollten Aussagen für mindestens sechs oder auch 12 Jahre möglich sein. Insbesondere für die Ableitung von Umweltzielen und die Inanspruchnahme von Ausnahmetatbeständen ist dies wichtig, denn eine Zielerreichung für alle Wasserkörper wird bis 2027 kaum erreichbar sein. Hierfür werden Nährstoffmodelle für die Entscheidungsunterstützung notwendig. Eine hohe Validität von Modelergebnissen muss auch auf kleineren räumlichen Skalen gegeben sein. Dies erfordert jedoch auch eine höhere Datenverfügbarkeit und erfordert daher zukünftig ein strategisch ausgerichtetes Monitoring.

Es hat sich gezeigt, dass trotz zahlreicher Maßnahmen zur Verringerung der Nährstofffrachten in den Oberflächengewässern sich in der Elbe keine hinreichende Änderung in den Nährstoffkonzentrationen einstellt bzw. Nährstofffrachten in den letzten Jahren stagnieren, da das durch die Landwirtschaft belastete Grundwasser die Oberflächengewässer weiter mit Nährstoffen belastet [12]. Dieses Phänomen tritt in der überwiegenden Anzahl deutscher Flussgebiete auf. Auch vor dem Hintergrund des laufenden Vertragsverletzungsverfahrens der EU zur nicht konformen Umsetzung der Nitratrichtlinie in Deutschland werden zukünftig die Belastungen der Gewässer durch die Landwirtschaft immer mehr in den Fokus rücken. Zudem ist eine integrale Betrachtung der Nährstoffflüsse zwischen Binnenland und Randmeeren für



Prognosen zur Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie notwendig, um langfristig die Schutzziele der Meere zu sichern.

Aufbauend auf den vorliegenden Modellanalysen und des definierten Anforderungsprofils wurden Empfehlungen für die zukünftige Nährstoffmodellierung abgeleitet. Diese Empfehlungen sind Gegenstand eines folgenden Artikels in *Wasser und Abfall*.

## **Literatur**

[1] Venohr M., Gadegast M., Kulb I., Mahnkopf J., Wetzig A. (2014): Modellierung von Nährstoffflüssen für die deutschen Flusseinzugsgebiete mit MONERIS auf Basis aktualisierter Daten für den Zeitraum 2006-2008 und Berechnung von Szenarien; Bericht für Umweltbundesamt im Rahmen „des Vorhabens Eutrophierungsbewertung von Ökosystemen in Nord- und Ostsee im Rahmen von Oslo-Paris-Konvention, Helsinki-Konvention, EG-Wasserrahmenrichtlinie und Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie“.

[2] Gericke A., Venohr M. (2015): Further Development of the MONERIS Model with Particular Focus on the Application in the Danube Basin; Final Report for International Commission for the Protection of the Danube River.

[3] Fuchs, S.; ,Dimitrova, S.; Kittlaus, S., Tettenborn, F.; Hillenbrand, T. (2013): Methodenpapier Regionalisierte Pfadanalyse mit dem Modellinstrument MoRE; Entwicklung europäischer Leitlinien für die Bestandsaufnahme der Emissionen, Einleitungen und Verluste gemäß Art.5(1) und 5(6) der Tochterrichtlinie zu prioritären Stoffen.

[4] Wendland F., Keller L., Kuhr P., Kunkel R., Tetzlaff B. (2015): Regional differenzierte RefsgaarQuantifizierung der Nährstoffeinträge in das Grundwasser und in die Oberflächengewässer Mecklenburg- Vorpommerns unter Anwendung der Modellkombination GROWA–DENUZ– WEKU–MEPhos; Forschungszentrum Jülich.

[5] Gebel M., Halbfaß S., Bürger S., Uhlig M. (2012): STOFFBILANZ – Modellerläuterung; Gesellschaft für angewandte Landschaftsforschung bR.

[6] Lindström G., Pers C., Rosberg J., Strömqvist J., Arheimer B. (2010): Development and testing of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) water quality model for different spatial scales; Hydrology Research, 41(3–4) 295-319.

- [7] Hesse C., Krysanova V., Voß A. (2012): Implementing In-Stream Nutrient processes in Large-Scale Landscape Modeling for the Impact Assessment on Water quality; Environmental Model Assessment, 17, 589-611.
- [8] Wade A.J., Durand P., Beaujouan V., Wessel W.W., Raat K.J., Whitehead P.G., Butterfield D., Rankinen K., Lepisto A. (2002a): A nitrogen model for European catchments: INCA, new model structure and equations; Hydrology and Earth System Sciences, 6(3), 559–582.
- [9] Henriksen H.J., Trolborg L., Nyegaard P., Sonnenborg T.O. (2003): Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark; Journal of Hydrology 280 (2003) 52–71.
- [10] Wolf J., Beusen A.H.W., Groenendijk P., Kroon T., Rötter R., van Zeijts H. (2003): The integrated modeling system STONE for calculating nutrient emissions from agriculture in the Netherlands; Environmental Modelling & Software 18 (2003) 597–617.
- [11] Rode M., Grau T., Völker J. (2017): Vorstudie: Nährstoffbilanzierungsmodell in der FGG Elbe, 81 S.
- [12] Völker, J., Dietrich, D., Richter, S., Borchardt, D. (2015). Analyse und Bewertung der Instrumente zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie sowie Verknüpfung zu den institutionellen Rahmenbedingungen – Wasserfachliche Aspekte. Im Auftrag des Sachverständigenrats für Umweltfragen. Materialien zur Umweltforschung 46. SRU, Sachverständigenrat für Umweltfragen, Berlin, 117 S.

## **Danksagung**

Die Autoren danken der Flussgebietgemeinschaft Elbe für die Förderung des Projektes als Beitrag zur Weiterentwicklung der in der Elbe verwendeten Nährstoffbilanzmodelle.

Wir möchten uns ebenso bedanken bei den Mitgliedern der ad-hoc Arbeitsgruppe „Nährstoffe“ der FGG Elbe.

## **Autoren**

Prof. Dr. Michael Rode, Thomas Grau, Dr. Jeanette Völker, Prof. Dr. Dietrich Borchardt

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ; Department Aquatische Ökosystemanalyse;  
Brückstraße 3a, 39114 Magdeburg; Michael.rode@ufz.de; thomas.grau@ufz.de;  
jeanette.voelker@ufz.de; dietrich.borchardt@ufz.de

PD Dr. Michael Trepel

Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des  
Landes Schleswig-Holstein ; Referat Schutz der Binnengewässer, Anlagenbezogener  
Gewässerschutz; Mercatorstraße 3; 24106 Kiel; [michael.trepel@melund.landsh.de](mailto:michael.trepel@melund.landsh.de)

PD Dr. Gregor Ollesch

Flussgebietsgemeinschaft Elbe; Otto-v.-Guericke-Straße 5; 39104 Magdeburg;  
gregor.ollesch@fgg-elbe.de

## **Tabellen- und Bildunterschriften**

Tabelle 1: Übersicht über die betrachteten Modelle und die Modelleigenschaften.

Tabelle 2: Übersicht über die Ziele, die Anforderungen und Zusatzinformationen an  
Nährstoffmodelle auf Basis einer Abfrage und Expertenwissen.

Tabelle 3: Kriterien für die Beurteilung der Nährstoffmodelle unter Berücksichtigung des  
Anforderungsprofils.

Tabelle 4: Zusammenfassende Beurteilung der Modelle auf Basis des Anforderungsprofils .

Tabelle 5: Beurteilung der Modelle hinsichtlich anwendungsspezifischer Fragestellungen.

Abbildung 1: Zusammenfassende Darstellung der Anzahl an „+“ (Anforderung erfüllt) und  
„++“ (Anforderung übererfüllt) der beurteilten Modelle.

**Tabelle 1: Übersicht über die betrachteten Modelle und die Modelleigenschaften.**

Eigenschaften		MONERIS	GROWA-DENUZ- WEKU-MEPhos	STOFFBILANZ	AGRUM(+)	HYPE	SWAT	SWIM	INCA	MIKESHE&DAISY	STONE 2.0
		J (M)	J [T]	J [T]	J	T	T	T	T	T	T
zeitliche Diskretisierung		J (M)	J [T]	J [T]	J	T	T	T	T	T	T
räumliche Abbildung		TEZG	Ras- ter	Ras- ter	Ras- ter	HRU				Raster	
Eintrags- pfade	Erosion	x	x	x	x	x	x	x		x	
	Abschwemmung	x	x	x	x						
	Grundwasser	(x)*	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Dränagen	x	x	x	x	x	x		(x)	x	x
	Interflow	(x)*	x	x	x	x	x	x	(x)	x	
	Atmosphärisch Dep.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Trenn- und Mischkanalisation	x	x	x	x						
	Kanalisation, ohne Kläranlage	x	x	x	x	x					
	punktueller Einträge (kom. Ind.)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Prozesse	Evapo-transpiration			(x)		x	x	x		x
Pflanzenaufn./ Wurzelzone				(x)		x	x	x	x	x	x
Stoffumsatz in Boden / Fluss		(x)	(x)	(x)	(x)	x	x	x	x		x

J: Jahre, M: Monate, T: Tage, ( ): Jahresdatenerlegung, [ ]: möglich für einzelne Prozesse, TEZG: Teileinzugsgebiete, MIX: Raster und Teileinzugsgebiete, HRU: Hydrologic Response Unit, Raster: Rasterbasiert, (x): vereinfacht; \*: Eintragspfade GW und Interflow zusammengefasst

**Tabelle 2: Übersicht über die Ziele, die Anforderungen und Zusatzinformationen an Nährstoffmodelle auf Basis einer Abfrage und Expertenwissen.**

Ziel	Anforderung	Zusatzinformation
Welche Gewässerkategorien sollen abgebildet werden?	Integrative Betrachtung (Oberflächengewässer und Grundwasser)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abbildung der zeitlichen und räumlichen Verzögerung im Wasserhaushalt, das heißt Berücksichtigung der unterschiedlichen Verweilzeiten (instationäre Betrachtung) des Wassers in Flüssen, Seen, Grundwasser und der Bodenzone.</li> <li>- Auch bei der Anwendung verschiedener Modelle oder Modellansätze für Oberflächengewässer und Grundwasser müssen eine einheitliche Berechnungsgrundlage sowie eine Einheitlichkeit der Eingangsdaten vorliegen.</li> </ul>
Welche <ul style="list-style-type: none"> <li>• kleinste räumliche Modelleinheit,</li> <li>• kleinste validierbare Einzugsgebietsgröße und</li> <li>• Gesamteinzugsgebietsgröße</li> </ul> sollten abgebildet werden?	<ul style="list-style-type: none"> <li>50 - 100 km<sup>2</sup></li> <li>1.000 km<sup>2</sup></li> <li>100.000 km<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zur Vereinfachung und Kompatibilität gemäß den Berichtspflichten nach WRRL sollte bei der kleinsten räumlichen Modelleinheit auf das Flächenverzeichnis der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) zurückgegriffen werden (z.B. sechste oder siebte Stelle, die der Gewässerkennzahl entspricht; ca. 50 km<sup>2</sup>).</li> </ul>
Welche zeitliche Auflösung sollte bei der Modellberechnung abgebildet werden?	Monat	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Für die Berichterstattung können höher aufgelöste Modellberechnungen und Ergebnisse auf Jahreswerte aggregiert werden.</li> </ul>
Welche Vorhersagen sollten abgebildet werden?	Ist-Zustand und Prognose von sechs Jahren	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Festlegung spezifischer Zeitintervalle ist nicht erforderlich.</li> <li>- Die Prognose sollte eine längerfristige Entwicklung abbilden (z.B. Baseline Szenarien).</li> </ul>
Welche Unsicherheiten sind noch akzeptabel für: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Jahresdurchfluss</li> <li>• Jahresfrachten (Stickstoff, Phosphor)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>10 - 30 %</li> <li>30 %</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eine Differenzierung der Unsicherheiten nach Gebietsgröße ist anzustreben (z.B. große Einzugsgebiete: 10 %; kleinere Teileinzugsgebiete: 30 %).</li> </ul>

<b>Ziel</b>	<b>Anforderung</b>	<b>Zusatzinformation</b>
<p>Welche Maßnahmen sollten abgebildet werden?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diffuse Quellen (Landwirtschaft)</li> <li>• Punktquellen</li> <li>• Hydromorphologie</li> </ul>	<p>Maßnahmen zu:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(a) Düngung (Optimierung, Reduktion, Ausbringung)</li> <li>(b) Fruchtfolge</li> <li>(c) Dränage</li> <li>(d) Landnutzungsänderung <ul style="list-style-type: none"> <li>(a) Ausbau großer und kleiner Kläranlagen</li> <li>(b) Verminderung der Einträge durch RÜB</li> <li>(a) Uferrandstreifen</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Landwirtschaftliche Maßnahmen könnten mit einem prozessbasierten, eindimensionalen Modell oder einem Extramodul berechnet werden.</li> <li>- Viele Maßnahmen können noch nicht oder bislang nur sehr vereinfacht berechnet werden; hier besteht noch Forschungsbedarf.</li> </ul>
<p>Welche weiteren Modellanforderungen sind zu beachten?</p>	<p>Hohe Modellsicherheit</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hierfür sollten umfängliche Validierungen und Kalibrierungen geliefert werden, welche zur Erhöhung der Prognosesicherheit und damit auch der Akzeptanz bei den Nutzern notwendig sind.</li> </ul>

**Tabelle 3: Kriterien für die Beurteilung der Nährstoffmodelle unter Berücksichtigung des Anforderungsprofils.**

<b>Einstufung</b>	<b>Kriterium</b>
<b>Integrative Betrachtung der Gewässerkategorien</b>	
( - )	Getrennte Berechnung der Gewässerkategorien
( 0 )	„Kein Kriterium vorhanden“
( + )	Gewässerkategorien werden als direkte Folgenkette über die im Modell verknüpften Prozesse beschrieben
( ++ )	Zusätzlich zum vorangegangenen Punkt werden beidseitige Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Gewässerkategorien abgebildet
<b>Kleinste räumliche Modelleinheit (50-100 km<sup>2</sup>)</b>	
( - )	> 1000 km <sup>2</sup>
( 0 )	100 km <sup>2</sup> – 1000 km <sup>2</sup>
( + )	50 – 100 km <sup>2</sup>
( ++ )	Rasterzellen ( $\leq 1$ km <sup>2</sup> )
<b>Kleinstes validiertes Einzugsgebiet (1000 km<sup>2</sup>)</b>	
( - )	> 2000 km <sup>2</sup>
( 0 )	1200 km <sup>2</sup> – 2000 km <sup>2</sup>
( + )	800 km <sup>2</sup> – 1200 km <sup>2</sup>
( ++ )	< 800 km <sup>2</sup>
<b>Einzugsgebiet Gesamt (100.000 km<sup>2</sup>)</b>	
( - )	< 10.000 km <sup>2</sup>
( 0 )	10.000 km <sup>2</sup> – 75.000 km <sup>2</sup>
( + )	75.000 km <sup>2</sup> – 150.000 km <sup>2</sup>
( ++ )	> 150.000 km <sup>2</sup>
<b>Zeitliche Auflösung des Modells (1 Monat)</b>	
( - )	gröber als Jahresschritte
( 0 )	Jahresschritte
( + )	Monatsschritte und/oder erlaubt die Berechnung einzelner Prozesse in Tagesschritten
( ++ )	Tagesschritte
<b>Abbildung Ist-Zustand</b>	
( - )	Keine Abbildung Ist-Zustand
( 0 )	Das Modell bildet Ist-Zustand ab, wobei wichtige Eintragspfade fehlen (z.B. Punktquellen)
( + )	Das Modell bildet Ist-Zustand ab (beruhen hauptsächlich auf Eingangsdaten)
( ++ )	Das Modell bildet Ist-Zustand ab (monatliche Nährstoffeinträge und sehr gute Validierungsergebnisse)
<b>Prognose 6 Jahre</b>	
( - )	Keine Abbildung von Prognosen
( 0 )	Prognosen von 6 oder mehr Jahren auf Basis von Jahresschritten
( + )	Prognosen von 6 oder mehr Jahren unter Berücksichtigung innerjähriger Variabilität
( ++ )	Valide, langjährige Prognosen auf unterschiedlichen Skalen
<b>Mittlere Abweichung Jahresdurchfluss: 10-30 %</b>	
( - )	> 50 %
( 0 )	10 – 30 % (zusätzlich viele Stationen mit > 30 %)
( + )	10 – 30 % (zusätzlich wenige Stationen mit > 30 %)
( ++ )	< 10 % (große EZG); < 30 % (kleine EZG)
<b>Mittlere Abweichung bis 30% für Jahresstickstoff- und Jahresphosphorfracht</b>	
( - )	> 70 %
( 0 )	30 – 50 % (zusätzlich viele Stationen mit > 50 %)
( + )	20 – 30 % (zusätzlich wenige Stationen mit > 30 %)
( ++ )	< 20 %
<b>Maßnahmenabbildung diffuse Quellen. Gruppen: 1. Dünger, 2. Dränung, 3.Fruchtfolge, 4.</b>	

<b>Einstufung</b>	<b>Kriterium</b>
<b>Landnutzungsänderung</b>	
( - )	Keine Maßnahmen
( 0 )	Maßnahmen aus 2 Gruppen
( + )	Maßnahmen aus allen 4 Gruppen
( ++ )	Weitere Maßnahmen diffuse Quellen (z.B. diffuser Eintrag aus urbanen Gebieten)
<b>Maßnahmenabbildung punktuelle Quellen Gruppen: 1. Ausbau (kleiner und/oder großer) Kläranlagen, 2. Verminderung Einträge aus Regenüberläufen</b>	
( - )	Keine Maßnahmen
( 0 )	Maßnahmen aus 1 Gruppe
( + )	Maßnahmen aus 2 Gruppen
( ++ )	Maßnahmen aus mehr als 2 Gruppen
<b>Maßnahmenabbildung Hydromorphologie: Errichtung eines Uferrandstreifens</b>	
( - )	Keine Maßnahme
( 0 )	Andere hydromorphologische Maßnahme
( + )	Maßnahme Uferrandstreifen
( ++ )	Weitere hydromorphologische Maßnahmen
<b>Hohe Modellsicherheit</b>	
( - )	Modell basiert vorrangig auf Datenzerlegung und starker Datenmittelung
( 0 )	Validierung wird auf Basis von Mittelwerten durchgeführt, hohe Streuung der Ergebnisse
( + )	Validierung auf Basis von mehreren Kriterien, geringe Unsicherheiten
( ++ )	Zusätzliche Unsicherheitsanalysen, Sensitivitätsanalysen für zahlreiche Stationen
<b>Prozessbeschreibung<sup>2</sup></b>	
( - )	Empirische Zusammenhänge, Aggregation der Daten und Datengetriebene Analysen
( 0 )	Zahlreiche empirische Prozesse und starke Aggregation der Daten
( + )	Hydrologischer- und Stoffkreislauf werden umfänglich beschrieben
( ++ )	Prozesse sind in ihrer Beschreibung mit einer überschaubaren Anzahl an Parametern umfänglich beschrieben und ausgeglichen

<sup>2</sup> Die Prozessbeschreibung wurde im Rahmen des Fragebogens nicht abgefragt und ist im Anforderungsprofil nicht enthalten. Sie wurde für die Beurteilung integriert, da die Prozessbeschreibung für die Abbildung von Maßnahmen und die Prognosefähigkeit, insbesondere vor dem Hintergrund von Landnutzungsänderung und Klimawandel eine wichtige Modelleigenschaft darstellt.



**Tabelle 4: Zusammenfassende Beurteilung der Modelle auf Basis des Anforderungsprofils.<sup>3</sup>**

<b>Anforderung</b>	<b>MONERIS</b>	<b>GROWA-WEKU- DENUZ-MEPhos</b>	<b>STOFFBILANZ</b>	<b>HYPE</b>	<b>SWAT</b>	<b>SWIM</b>
Integrative Betrachtung der Gewässerkategorien	-	+	+	+	+	+
Kleinste räumliche Modelleinheit (50-100 km <sup>2</sup> )	+	++	++	+	+	+
Kleinste validiertes EZG (1.000 km <sup>2</sup> ) Einheit	++	++	++	+	++	+
EZG Gesamt (100.000 km <sup>2</sup> )	++	0	0	++	++	++
Zeitliche Auflösung (1 Monat)	0	0 <sup>4</sup>	0	++	++	++
Abbildung Ist-Zustand	+	+	+	+	+	0
Prognose 6 Jahre	0	+	0	+	+	+
Mittlere Abweichung 10-30 % Jahresdurchfluss	0 <sup>5</sup>	0	0	+	0 (+ <sup>6</sup> )	+ <sup>6</sup>
Mittlere Abweichung bis 30 % bei N	0	0	0	0	0 (+ <sup>6</sup> )	+ <sup>6</sup>
Mittlere Abweichung bis 30 % bei P	0	0	0	0	0 (+ <sup>6</sup> )	+ <sup>7</sup>
Maßnahmenabbildung diffus (Landwirtschaft)	++	++	++	-	0	0
Maßnahmenabbildung punktuell	+	+	+	+	0	0
Maßnahmenabbildung hydromorphologisch	++	+	+	+	++	0
Hohe Modellsicherheit	0	0	0	++	+	++
Prozessbeschreibung	-	0	0	++	+	+

<sup>3</sup> Die Modelle INCA (vorrangig für kleine Einzugsgebiete und zu starke Prozessvereinfachung), MIKE SHE/DAISY (Simulation Nährstofftransport nur in der Bodensäule; im Grundwasser auf Basis von Partikeltracking) und STONE (keine Zusammenführung verschiedener Eintragspfade zu Teileinzugsgebieten und Flüssen) wurden bei der Bewertung nicht berücksichtigt.

<sup>4</sup> Durch Nutzung von mGROWA ist eine Steigerung möglich was im Moment nur für den Wasserhaushalt gilt

<sup>5</sup> Kann durch Kopplung mit Wasserhaushaltsmodellen vermindert werden

<sup>6</sup> Geringe Abweichungen bei auf Tagesbasis validierten Studien, allerdings nur für wenige Stationen

<sup>7</sup> Geringe Abweichungen für Validierung für große Einzugsgebiete und langjährige Mittel

**Tabelle 5: Beurteilung der Modelle hinsichtlich anwendungsspezifischer Fragestellungen.**

<b>Modell</b>	<b>Quantifizierung der Eintragspfade</b>	<b>Abbildung räumlicher Belastung (Hotspots)</b>	<b>Ist-Zustand und Entwicklung von jährlichen Nährstofffrachten</b>	<b>Abbildung von Nährstoffprognosen</b>	<b>Umfang abgebildeter Maßnahmen</b>
MONERIS	+	-	+	+	++
GROWA-DENUZ-WEKU-MEPhos	+	+	+	+	+
STOFFBILANZ	+	+	+	+	+
HYPE	0	0	+	++	0
SWAT	0	0	+	+	+
SWIM	-	0	+	++	0

**Abbildung 1: Zusammenfassende Darstellung der Anzahl an „+“ (Anforderung erfüllt) und „++“ (Anforderung übererfüllt) der beurteilten Modelle.**

