

Nährstoffbilanzierung der Flussgebiete Deutschlands

Dr. Horst Behrendt, Dipl. Geograph Peter Huber, Dipl. Geograph Matthias Kornmilch,
Dipl. Physiker Dieter Opitz, Dipl.-Ing. Oliver Schmoll, Dipl. Geographin Gaby Scholz,
Dipl. Geograph Roger Uebe

sowie unter Mitarbeit der Firma Geodaten Integration & Analyse (Dr. Pagenkopf) und
der Gesellschaft für Boden- und Gewässerschutz e.V. (Dr. Bach)

Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei im Forschungsverbund Berlin e.V.

Kurzfassung

Zur Ermittlung der Nährstoffeinträge über die verschiedenen punktuellen und diffusen Eintragspfade in die Flussgebiete Deutschlands wurde das Modell **MONERIS** (**MO**delling **N**utrient **E**missions in **R**iver **S**ystems) entwickelt und angewendet. Die Grundlagen für das Modell bilden einerseits Abfluss- und Gütedaten der zu untersuchenden Flussgebiete sowie ein Geographisches Informationssystem (GIS), in das sowohl digitale Karten als auch umfangreiche statistische Informationen integriert wurden.

Während die punktuellen Einträge aus kommunalen Kläranlagen und von industriellen Einleitern direkt in die Flüsse gelangen, ergeben sich die diffusen Einträge von Nährstoffen in die Oberflächengewässer aus der Summe verschiedener Eintragspfade, die über die einzelnen Komponenten des Abflusses realisiert werden (vergleiche Abbildung 1). Die Unterscheidung in Einträge über diese einzelnen Komponenten ist notwendig, da sich ihre Stoffkonzentrationen und die dem Eintrag zu Grunde liegenden Prozesse zumeist stark voneinander unterscheiden.

Demzufolge sind mindestens sieben verschiedene Pfade zu berücksichtigen:

- Punktquellen
- atmosphärische Deposition
- Erosion
- Abschwemmung
- Grundwasser
- Dränagen
- versiegelte urbane Flächen

Auf den diffusen Eintragswegen unterliegen die Stoffe mannigfaltigen Transformations-, Verlust- und Rückhalteprozessen. Um die Nährstoffeinträge in ihrer Abhängigkeit von der Ursache quantifizieren und damit auch vorhersagen zu können, ist die Kenntnis der Transformations- und Rückhalteprozesse notwendig. Dies kann aufgrund des derzeitigen Wissensstandes, der zur Verfügung stehenden Datenbasis und der Größe der zu untersuchenden Gebiete nicht durch detaillierte dynamische Prozessmodelle

erfolgen. Mit MONERIS wurde versucht, für die einzelnen Eintragspfade auf der Basis vorhandener Ansätze zur großräumigen Modellierung, diese zu ergänzen und zu modifizieren und gegebenenfalls neue konzeptionelle Modelle abzuleiten. Die Schwerpunkte der Modellentwicklung waren:

- die Erarbeitung einer GIS-gestützten Methodik für die regional differenzierte Ermittlung der diffusen und punktuellen Nährstoffeinträge für Flussgebiete mit einer Größe von 500 km² und mehr,
- die Ableitung eines regional differenzierten Teilmodells für die Nährstoffeinträge von kommunalen Kläranlagen in die einzelnen Flussgebiete auf der Basis eines bundesweit flächendeckenden, detaillierten Kläranlageninventars,
- die Ableitung eines für alle Flussgebiete anwendbaren Teilmodells zum erosionsbedingten Sediment- und Nährstoffeintrag in die Flusssysteme, das lediglich die für einen Bodeneintrag in die Gewässer relevanten Flächen berücksichtigt und sowohl an den Schwebstofffrachten als auch den partikulären Phosphorfrachten von Flussgebieten validiert wurde,
- die Ableitung eines flächendeckenden Teilmodells zur Herstellung einer Kopplung zwischen den Stickstoffüberschüssen in der Landwirtschaft und den Stickstoffkonzentrationen im Grundwasser über eine von den hydrogeologischen Gegebenheiten, der Sickerwassermenge und der Größe der Überschüsse selbst abhängigen Retentionsfunktion unter Einbeziehung erster Schätzungen für die großräumigen Verweilzeiten in den Flussgebieten,
- die Ableitung eines flächendeckenden Teilmodells zur GIS-gestützten regional differenzierten Ermittlung der Dränflächen in einem Flussgebiet auf der Basis kartierter vorhandener Dränflächen, der Bodentypen und der Bodenwasserverhältnisse,
- die Ableitung eines flächendeckend anwendbaren Teilmodells für die verschiedenen Eintragspfade von urbanen Flächen unter Berücksichtigung der regionalen Unterschiede in den Kanalisationssystemen sowie des Ausbaugrades des Speichervolumens der Mischkanalisation und
- die Ableitung eines für alle Flussgebiete anwendbaren Teilmodells zur Berücksichtigung der Nährstoffrückhalte und –verluste in den Oberflächengewässern in Abhängigkeit von der hydraulischen Belastung bzw. den spezifischen Abflussspenden des Flusssystems. Dadurch wurde die Ermittlung der Nährstofffrachten aus den Nährstoffeinträgen in einem Flussgebiet und somit auch ein direkter Vergleich mit den aus Güte- und Abflussmessungen berechenbaren Nährstofffrachten möglich.

Besonderer Wert wurde bei der Modellentwicklung darauf gelegt, die verschiedenen Teilmodelle an unabhängigen Einzeldatensätzen, wie z. B. beim Grundwassermodell an den Grundwasserkonzentrationen, und nicht auf der Basis der in den Flüssen gemessenen Nährstofffrachten zu validieren.

Die GIS-Basis gestattet eine regional differenzierte Vorgehensweise bei der Quantifizierung der Nährstoffeinträge. Insgesamt wurden die Eintragsquantifizierungen für ca. 300 verschiedene Flussgebiete nach der gleichen Methodik durchgeführt. Um die Eintragsberechnungen mit den Ergebnissen früherer Abschätzungen vergleichen und die Veränderungen in den Nährstoffeinträgen für die Flussgebiete Deutschlands ausweisen zu können, wurden die Abschätzungen für die beiden Zeiträume von 1983-

1987 bzw. 1993-1997 durchgeführt. Die Veränderungen werden sowohl unter Berücksichtigung der in den Perioden unterschiedlichen hydrologischen Bedingungen als auch unter der Annahme gleicher hydrologischer Bedingungen ermittelt, so dass eine Identifizierung der anthropogen verursachten Veränderungen möglich ist.

Die Ergebnisse der Eintragsberechnungen sind für die deutschen Anteile der Stromgebiete von Donau, Elbe, Rhein und Weser sowie für die Einzugsgebiete von Nordsee, Ostsee, Schwarzem Meer und Deutschland insgesamt in den Tabellen 1 bis 4 und in den Abbildungen 2 bis 5 dargestellt.

Die Stickstoffeinträge in die Flussgebiete Deutschlands lagen im Zeitraum 1993-1997 bei 819 kt N/a und verminderten sich gegenüber dem Vergleichszeitraum 1983-1987 um 266 kt N/a bzw. 25%. Die Zielstellung einer Reduzierung der Stickstoffeinträge aus Deutschland in die Nordsee und die Ostsee um 50% bis zum Jahr 1995 konnte in keinem der deutschen Fluss- und Meeresgebiete erreicht werden. Hauptursache für die erreichte Verminderung ist der starke Rückgang der Stickstoffeinträge aus Punktquellen von 46%. Demgegenüber konnte bei den diffusen Stickstoffeinträgen nur ein Rückgang um 10% ermittelt werden. Mit 48% stellen die Einträge über das Grundwasser im Zeitraum 1993-97 für Deutschland insgesamt den dominanten Eintragspfad dar. Der Anteil der Punktquellen an den Stickstoffeinträgen liegt insgesamt bei 28%. Einträge über Erosion, Abschwemmung und atmosphärische Deposition tragen zu den gesamten Einträgen mit jeweils weniger als 2% nur in geringem Maße bei.

Die gesamten Phosphoreinträge in die Flussgebiete Deutschlands betrugen im Zeitraum 1993-1997 ca. 37 kt P/a. Gegenüber dem Vergleichszeitraum wurden die Phosphoreinträge um ca. 57 kt P/a oder 60% reduziert und damit die Zielstellung einer Verminderung der Phosphoreinträge in die Meere um 50% erfüllt. Die Reduzierung der Phosphoreinträge ist ebenfalls zum überwiegenden Teil auf die Verringerung der Einträge aus den Punktquellen zurückzuführen, die allein um 80% reduziert wurden. Bei den diffusen Phosphoreinträgen konnte ein etwas größerer Rückgang als beim Stickstoff berechnet werden, was sich insbesondere aus der mit 56% überdurchschnittlichen Verminderung der Einträge von urbanen Flächen ergibt. Trotz der enormen Verringerung der Einträge aus Punktquellen stellen diese auch im Zeitraum 1993-1997 mit 34% noch den dominanten Eintragspfad dar. Unter den diffusen Einträgen dominieren beim Phosphor mit 22% die Einträge über Erosion.

Sowohl die Veränderungen der Nährstoffeinträge als auch die Anteile der einzelnen Pfade an den gesamten Einträgen variieren, wie die Tabellen 1 bis 4 und die Abbildungen 2 bis 5 zeigen, in den einzelnen Strom- und den Einzugsgebieten von Nordsee, Ostsee und Schwarzem Meer in einem relativ großen Bereich.

Trotz substanzieller Verminderung der Stickstoffüberschüsse auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche kann unter der Maßgabe gleicher hydrologischer Bedingungen zur Zeit lediglich im Rheingebiet von einer geringfügigen Verminderung der Stickstoffeinträge über das Grundwasser ausgegangen werden. In den anderen Stromgebieten muss bis zur Mitte der neunziger Jahre infolge der langen Verweilzeiten im Grundwasser noch mit einer Zunahme der Stickstoffeinträge über diesen Pfad gerechnet werden. Erst nach dem Jahr 2000 werden sich die verringerten Stickstoffüberschüsse in einer langsamen Verringerung der Stickstoffkonzentrationen im Grundwasser und damit der Einträge bemerkbar machen.

In die Stromgebiete von Donau, Elbe und Rhein werden über die nicht deutschen Anteile an diesen Flussgebieten im Zeitraum 1993-1997 insgesamt für Stickstoff

231 kt N/a und für Phosphor 16 kt P/a eingetragen. Das entspricht für das Donaugebiet oberhalb von Jochenstein einem Anteil von 15% (Stickstoff) und 29% (Phosphor). Für das Elbegebiet oberhalb von Zollenspieker liegt der ausländische Anteil für Stickstoff bei 37% und für Phosphor bei 43%, im Rheingebiet oberhalb von Lobith werden 30% der Stickstoffeinträge und 41% der Phosphoreinträge in den ausländischen Flussgebietsteilen verursacht.

Die aus Messungen der Nährstoffkonzentrationen und des Abflusses berechneten Nährstofffrachten für die untersuchten Flussgebiete in den Zeiträumen 1983-1987 und 1993-1997 zeigen insgesamt ähnliche Verminderungen, wie bei den Nährstoffeinträgen.

Ein Vergleich der Ergebnisse der mit MONERIS ermittelten Nährstoffeinträge mit denen anderen Autoren bzw. mit der Immissionsmethode zeigt insgesamt eine gute Übereinstimmung, wobei man jedoch davon ausgehen kann, dass die Abweichungen insbesondere bei den diffusen Nährstoffeinträgen in einem Bereich von 30% liegen.

Unter Berücksichtigung der gewässerinternen Rückhalte- und Verlustprozesse wurden aus den gesamten Nährstoffemissionen in die einzelnen Flussgebiete die Nährstofffrachten für die beiden untersuchten Zeiträume berechnet und mit den aus Güte- und Abflussmessungen ermittelbaren Nährstofffrachten verglichen. Bei Stickstoff zeigt sich für den Zeitraum 1993-1997, dass die Abweichung zwischen nach MONERIS berechneter und „gemessener“ DIN-Fracht für 148 von 168 Flussgebieten kleiner als 30% ist. Lediglich bei 13 Flussgebieten ist die Abweichung größer als 40%. Bei den Flussgebieten mit größeren Abweichungen handelt es sich vorwiegend um kleinere Flussgebiete mit geringer DIN-Fracht. Bei Gesamtposphor sind die Abweichungen zwischen den berechneten und den „gemessenen“ Frachten insgesamt etwas größer als beim Stickstoff. Auch hier zeigt sich die Tendenz, dass bei kleineren Flussgebieten mit geringen Frachten die Abweichungen zunehmen. Dies kann sowohl durch größere Fehler bei den Eintragsabschätzungen als auch bei den „gemessenen“ Frachten verursacht sein.

Die durchgeführten Szenarioberechnungen zeigen, dass allein auf der Basis von weiteren eintragsmindernden Maßnahmen bei den punktuellen und diffusen Einträgen für Stickstoff mittelfristig die Zielstellung einer Reduzierung der Einträge in die Nord- und Ostsee um 50% im Vergleich zum Zeitraum 1983-1987 nicht erreicht werden kann. Zusätzliche Maßnahmen zur Erhöhung der gewässerinternen bzw. gewässernahen Stickstoffrückhalte und -verluste (Anlage von Gewässerrandstreifen, Rückhaltebecken sowie Etablierung bzw. Renaturierung von Feuchtgebieten) sind für die Erreichung der Zielstellung unbedingt erforderlich.

Nutrient Emissions into River Basins of Germany

Summary

The model **MONERIS** (**MO**delling **N**utrient **E**missions in **R**iver **S**ystems) was developed and applied to estimate the nutrient inputs into river basins of Germany by point sources and various diffuse pathways. The model is based on data of river flow and water quality as well as a geographical information system (GIS), which includes digital maps and extensive statistical information.

Whereas point emissions from waste water treatment plants and industrial sources are directly discharged into the rivers, diffuse emissions into surface waters are caused by the sum of different pathways, which are realised by separate flow components (see Figure 1). This separation of the components of diffuse sources is necessary, because nutrient concentrations and relevant processes for the pathways are mostly very different.

Consequently seven pathways are considered:

- point sources
- atmospheric deposition
 - erosion
 - surface runoff
 - groundwater
 - tile drainage
- paved urban areas

Along the pathway from the source of the emission into the river substances are governed by manifold processes of transformation, retention and loss. Knowledge of these processes of transformation and retention is necessary to quantify and to predict nutrient emissions into the rivers in relation to their sources.

Since current knowledge of the processes and the up to now limited database especially for river basins of medium and large size, the description of the processes can not be done by detailed dynamic models.

Therefore, MONERIS estimates the different pathways with already existing and new conceptual approaches, which are developed especially for the modelling in the medium and large spatial scale. Topics of the model development were:

- to develop a GIS-supported method for regional differentiated estimation of diffuse and point emissions for river basins of a size of more than 500 km²,
- to establish a submodel for regionally differentiated estimation of nutrient discharges from waste water treatment plants by a countrywide detailed inventory of these waste water treatment plants,
- to establish a submodel for inputs of nutrients and suspended solids caused by erosion, which can be applied to all investigated river basins. This model is based on the modified uniform soil loss equation but considers only those areas, which are relevant for a input into the river system. The submodel was validated with observed loads of suspended solids and particulate phosphorus for river basins,
- to develop a submodel which allows the estimation of groundwater concentrations of nitrogen from the nitrogen surplus in agricultural areas by means of a retention function. This retention function is dependent on the hydrogeological conditions, the rate of groundwater recharge and the nitrogen surplus itself. The retention model includes first raw estimates of the residence time of water within the unsaturated zone and aquifer of the river basins,

- to develop a GIS-supported submodel for regionally differentiated estimation of the agricultural areas modified by tile drainage. The submodel is based on soil types and a classification of soil water conditions and is validated by overlaying digitised maps of tile drained areas with a soil map,
- to establish a submodel for different pathways of nutrient emissions within urban areas considering the regional differences in the sewer systems and the development of storage volume especially for combined sewer systems and
- to establish a submodel for nutrient retention and losses in surface waters, which can be applied for all river basins. This model is based on the dependency of the nutrient retention on the hydraulic load or the specific runoff in the river system. The model allows the estimation of the nutrient loads from the nutrient inputs in a river basins. Therefore, a direct comparison of calculated and observed nutrient loads is possible for river basins upstream of a monitoring station.

One special topic of the model development was that the different submodels were be validated by using independent data sets, for example the groundwater model was developed with the observed nitrogen concentrations in the groundwater and not on the base of the observed nutrient loads in the rivers.

The use of a GIS allows a regional differentiated quantification of nutrient emissions into river systems. Therefore, estimates were not only carried out for large river basins. Altogether the MONERIS model was applied to 300 different river basins for the two time periods 1983-1987 and 1993-1997. The temporal changes of nutrient emissions were calculated for the different hydrological conditions in both periods as well as under the assumption of identical hydrological conditions in order to estimate the changes caused by human factors.

The results of the calculations of the nutrient emissions into the German parts of the largest river basins Danube, Elbe, Rhine and Weser as well as for the German parts of the catchments of North Sea, Baltic Sea and Black Sea and all of Germany are presented in Tables 1 to 4 and Figures 2 to 5.

Nitrogen emissions into the river basins of Germany were about 819 kt N/a in the period 1993-1997 and thus 266 kt N/a, or 25% lower than in the period 1983-1987. This means that the target of the 50% reduction of nitrogen loads from Germany into the North Sea and the Baltic Sea could not be achieved. The main cause for the decrease of the nitrogen emissions into the river systems was the large reduction of nitrogen discharges from point sources by 46%. On the other hand the estimated decrease of diffuse emissions was only about 10%. The input via groundwater is with 48% the dominant pathway in the period 1993-1997. The share of point sources in nitrogen emissions amounts to about 28%. The contributions of erosion, surface runoff and atmospheric deposition to the total nitrogen input are low and amount to about 2% only for each of these pathways.

The total phosphorus emissions into the German river basins were about 37 kt P/a in the period 1993-1997. Compared with the period 1983-1987, the phosphorus emissions were reduced by about 57 kt P/a or 60%. The target of a 50% reduction of the phosphorus loads into the seas was reached. Again the decrease of phosphorus emissions is mainly caused by a 80% reduction of point sources. The decrease of diffuse phosphorus emissions was larger than for nitrogen, which is caused by a 56% reduction of the emissions from urban areas. In spite of the enormous reduction of phosphorus discharges from point sources these sources remain the dominant pathway

of phosphorus emissions with 34% in the period 1993-1997. Among the diffuse pathways, emissions by erosion dominate and represent 22% of the total input.

Amongst the individual river catchments and also the basins of North Sea, Baltic Sea and Black Sea the nutrient inputs as well as the shares in the various nutrient input pathways vary to a relatively large extent as shown in Tables 1 to 4 and Figures 2 to 5.

In spite of the substantial decrease of the nitrogen surplus in agricultural areas a slight reduction of the nitrogen emissions to the groundwater based upon identical hydrological conditions can only be estimated for the Rhine basin. For the other river basins, one has to assume that nitrogen inputs via this pathway will still increase during the nineties due to the long residence times of water in the unsaturated zone and in the aquifer. Only after the year 2000 the reduced nitrogen surplus will be followed by a slow reduction of the nitrogen concentrations in the groundwater and thus of total nitrogen inputs via this pathway.

Inputs to those parts of the Danube, Elbe and Rhine basins outside of Germany amounted to a total of 231 kt N/a and 16 kt P/a in the period 1993-1997. This corresponds to shares of 15% (nitrogen) and 29% (phosphorus) for the Danube basin upstream of Jochenstein. For the Elbe basin upstream Zollenspieker the shares in nutrient emissions originating outside of Germany were 37% for nitrogen and 43% for phosphorus. In the Rhine basin upstream of Lobith 30% of the nitrogen emissions and 41% of the phosphorus emissions originated from those parts of the basin that are outside of Germany.

The nutrient loads, which were calculated from the measured flow and nutrient concentrations, show similar changes as the nutrient emissions for the periods 1983-1987 and 1993-1997 for the investigated river basins.

The nutrient inputs estimated with MONERIS compare well with the results of other authors as well as with the results of other methods of source apportionment. The deviation between the estimated diffuse nutrient emissions are in a range of 30%.

The nutrient loads of the individual river catchments were calculated from the nutrient emissions accounting the retention and loss processes within the river systems of the catchments for the two periods. These calculated loads were compared with the load estimates based on the measured flow and nutrient concentrations in both time periods. The comparison shows that for nitrogen the deviation between the calculated and observed loads is for 148 of 168 river basins lower than 30%. Only for 13 basins, usually smaller basins with low loads of dissolved inorganic nitrogen, the deviation is larger than 40%.

For phosphorus, in general, the deviation between the calculated and observed load is slightly larger than for nitrogen. But the tendency is the same that the deviation is increasing with the decrease of the size of the basins and the phosphorus load. This phenomenon can be caused by larger errors in the estimates of nutrient emissions and in the "measured" loads for smaller basins.

The calculation of different scenarios shows that the target of a 50% reduction of the nitrogen load into the seas can not be reached by measures focused on the decrease of the nitrogen emissions from point and diffuse sources alone. Additional measures aimed at an increased retention and losses of nitrogen near by or within the surface waters of a river system (e. g. buffer strips, establishing renaturalization of wetlands, small reservoirs) are necessary.

