

**Entscheidungsunterstützungssystem im Flussgebietsmanagement:  
Emissionsmodellierung signifikanter Nährstoffeinträge  
aus der Fläche**

Von der Fakultät für Architektur und Landschaft  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation  
von

**Dipl.-Biol. Nikolai Panckow**  
geboren am 25.09.1969, in Hamburg

## Zusammenfassung

**Schlagwörter:** Diffuse Nährstoffeinträge, Emissionsmodellierung, Wasserrahmenrichtlinie

Die Qualität der Gewässer hat einen erheblichen Einfluss auf den Mensch und seine Umwelt. Grundsätzlich sind zudem die besonderen Qualitäten von Kulturlandschaften und von wertvollen Siedlungsstrukturen zunehmend von Bedeutung, die in großem Ausmaß an Wasserläufen gewachsen sind und von diesen abhängen. Auch der Naherholungs- und Freizeitwert und nicht zuletzt die touristische und wirtschaftliche Bedeutung sind vom Zustand der Gewässer abhängig.

Trotz erheblicher Anstrengungen zur Verbesserung der Wassergüte der Fließgewässer in den letzten Jahrzehnten, insbesondere bei der Verringerung der Einleitung biologischer und chemischer Schadstoffe, verschlechtert sich die Wassergüte ständig infolge des zunehmenden Eintrags von Stickstoff- und Phosphorverbindungen, die aus dem gesamten Einzugsgebiet der Flüsse als sogenannte diffuse Einträge aus überwiegend ackerbaulich genutzten Flächen in die Gewässer gelangen.

Um der Verschlechterung Einhalt zu gebieten, setzt der Ordnungsrahmen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie das verbindliche Ziel, den „guten Zustand“ der Gewässer bis zum Jahre 2015 zu erreichen. Für diese Zielerreichung müssen die diffusen Einträge aus der Fläche vermindert werden. Das Hauptproblem ist dabei die Identifizierung der Flächen, die signifikante Belastungen durch diffuse Quellen verursachen. Erst daraufhin können Bewirtschaftungsmaßnahmen für Flusseinzugsgebiete abgeleitet werden.

Dieses Unterfangen kann wegen der Größe und Komplexität von Fließgewässereinzugsgebieten nur mit Unterstützung einer geeigneten Modelltechnik erfolgen. Wie vorhergehende Untersuchungen gezeigt haben, sind bisher verfügbare Modelle für die Erarbeitung dieser Zielerreichung jedoch nicht geeignet. Defizite dieser Modelle sind die unbefriedigende Fähigkeit zur Identifizierung von Belastungsschwerpunkten und zur Berechnung von Bewirtschaftungsmaßnahmen sowie die ungenaue Abbildung der verschiedenen Eintragspfade für diffuse Nährstoffeinträge.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, wesentliche Berechnungsansätze für die Entwicklung eines optimierten Bilanzierungsmodells zu erarbeiten, das gesamte Modell in einer anwendungsfreundlichen Datenbankanwendung zu realisieren und die automatisierte Berechnung zu programmieren.

Das in dieser Arbeit realisierte Bilanzierungsmodell wurde in zwei naturräumlich unterschiedlichen Einzugsgebieten angewandt. Es stellt ein Entscheidungsunterstützungssystem zur Analyse der Eintragungssituation und zum Verständnis von Ursache-Wirkungsbeziehungen in Einzugsgebieten dar. Dieses Modell wurde entwickelt um hinsichtlich der Anforderungen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie im Flussgebietsmanagement Hilfe bei der Erarbeitung von Lösungsstrategien und von Maßnahmenplanung durch Szenarienberechnung zu leisten.

Für diesen Zweck wurde in dieser Arbeit ein flexibles Szenarienmodul entwickelt, das es ermöglicht, neben der Abschätzung der Effizienz von Einzelmaßnahmen und der Wirksamkeit von verschiedenen Maßnahmenkombinationen, auch den zeitlichen Horizont einer Maßnahme zu berücksichtigen. Damit wird einer gezielten Einflussnahme im Einzugsgebiet eine modelltechnische Grundlage zur Seite gestellt.

Es konnte gezeigt werden, dass mit dem Modell eine technische Unterstützung für die Problematik der diffusen Einträge angeboten wird, um die besonderen Qualitäten der Flüsse und der Kulturlandschaften zu verbessern und zu erhalten.

## Summary

**Keywords:** diffuse pollution, nutrient emission modelling, Water Framework Directive

The quality of water has a major impact on the people and their environment. Furthermore the specific characteristics of cultural landscape and of valuable urban areas mainly developed along watersides and depending on the water courses play an increasing role. Also the recreational value and last but not least the touristic and economic importance rely on the water status.

In spite of great efforts to improve the water quality of rivers during the last decades, especially concerning the reduction of discharging biological and chemical pollutants, water quality deteriorates permanently in consequence of the increasing discharge of nitrogen and phosphorous compounds, which get into the water courses from all over the river basins as so-called diffuse pollution from mainly arable land.

To stop deterioration, the European Water Framework Directive sets the objective to achieve the „good status“ of all water bodies until 2015. Diffuse pollution has to be reduced to achieve this objective. In doing so, the main problem is to identify the acreage causing the significant impacts through diffuse sources. Only then, measures for river basins can be derived.

Due to the size and complexity of the river basins, this procedure can only be followed with the support of appropriate modelling so far. Previous investigations demonstrated, that the models available are not suitable for achieving this objective. The not satisfying ability to identify the main pressure and to assess measures, as well as the imprecise reproduction of the various paths for diffuse nutrient discharges are the deficits of these models.

The objective of this thesis is to investigate essential calculation approaches for the development of an optimised balance model to implement the entire model in a user-friendly database application and to programme the automated calculation.

The realised balance model in this thesis was implemented in two different natural geographic river basins. It describes a decision-support-system to analyse the discharge situation and to understand the cause-effect-relationship in river basins. This model was developed in order to support strategies covering the requirements of the river basin management within the European Water Framework Directive and the planning of measures by scenario evaluation.

For this purpose a flexible scenario module was developed in this thesis, which allows, besides the efficiency assessment of single measures and the effectiveness of different combination of measures, to take into account the time scale of a measure. Herewith, the selective exertion of influence in the river basin is completed by a model-based Instrument.

It could be demonstrated, that this model delivers a technical support for the problem of diffuse pollution in order to improve and preserve the (special) quality of rivers and the cultivated landscape.

**Inhaltsverzeichnis**

<b>Zusammenfassung</b>	<b>I</b>
<b>Summary</b>	<b>II</b>
<b>Bildverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Anhangsverzeichnis</b>	<b>XVI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XVII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	2
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Diffuse Nährstoffeinträge und ihre Bedeutung in Fließgewässereinzugsgebieten	5
2.2 Anforderungen der Wasserrahmenrichtlinie hinsichtlich der mesoskaligen Emissionsmodellierung diffuser Nährstoffeinträge	9
2.3 Modelltechnik als Werkzeug: Möglichkeiten und Grenzen von Modellen für den Erkenntnis- und Verständnisprozess	11
2.4 Szenarienentwicklung: Was leisten Szenarien?	13
2.5 Defizitanalyse gängiger Bilanzierungsmodelle	14
<b>3 Material und Methoden</b>	<b>17</b>
3.1 Die Untersuchungsgebiete Fuhse und Oker	17
3.2 Bilanzgebiete	28
3.3 Nährstofffrachten	30
3.4 Modelltechnik: Struktureller und funktioneller Aufbau des Emissionsmodells	31
3.4.1 Eingangsdaten	35
3.5 Berechnungsansätze zur Ermittlung des Landschaftswasserhaushaltes und pfad-nutzungsbezogene Abflussdifferenzierung	36
3.5.1 Gesamtabfluss	37
3.5.2 Differenzierung der Abflusspfade	40
3.5.3 Modellinterne Ausweisung von Drainageflächen und Ermittlung des Drainageabflusses	42
3.5.4 Ableitung jährlicher Abflussanteile	43
3.5.5 Oberflächenabfluss	44
3.6 N-Bilanzüberschuss von Ackerflächen unter besonderer Berücksichtigung der Standortansprüche der Kulturarten: die Notwendigkeit der kleinräumigen Betrachtungsebene	46

---

3.7	Berechnungsansätze zur Ermittlung diffuser pfad-nutzungsbezogener N-Einträge	60
3.7.1	N-Bilanzüberschuss von Grünlandflächen	60
3.7.2	N-Bilanzüberschuss von Wäldern und sonstigen Flächen	61
3.7.3	Berechnung der Denitrifikation im Oberboden	65
3.7.4	Berechnung der Denitrifikation im Unterboden	69
3.7.5	Denitrifikation im Grundwasser	69
3.7.5.1	Langzeitbetrachtung: Einfluss hoher Grundwasserverweilzeiten auf das Eintragungsgeschehen	72
3.7.6	Berechnung von diffusen N-Einträgen über Zwischenabfluss, Drainageabfluss, Grundwasserabfluss und Erosion	75
3.8	Diffuse P-Eintragspfade	76
3.8.1	Diffuse P-Einträge über Erosion	76
3.8.1.1	Bodenabtrag nach der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG)	76
3.8.1.2	Modul Flächenanbindung	80
3.8.1.3	Enrichment Ratio und P-Gehalt im Oberboden	80
3.8.1.4	Berechnung der erosiven P-Einträge	81
3.8.2	Diffuse P-Einträge über die unterirdischen Eintragspfade Grundwasser, Zwischen- und Drainageabfluss	82
3.9	Diffuse Nährstoffeinträge über Abschwemmung	84
3.10	Diffuse Nährstoffeinträge über Direkteinträge	85
3.11	Kläranlagen und sonstige urban geprägte Eintragspfade	85
3.12	Retention im Gewässersystem und Nährstofffrachten als Immissionen	89
3.13	Auswerte- und Bewertungsroutinen als Werkzeug und Möglichkeiten der Ergebnisdarstellung	93
3.14	Analyse von signifikanten Belastungen und die Ausweisung von Eintragungsschwerpunkten (Hot Spots) bei unterschiedlichen Betrachtungsebenen	94
3.15	Szenarien	96
3.15.1	Flussgebietsmanagement von Fließgewässereinzugsgebieten durch die Entwicklung von Szenarien	97
3.15.2	Kombination von Szenarien	99
3.15.3	Pfadnutzungsspezifische Szenarien mit dem Fokus auf signifikanter Belastung (Hot Spots)	100
3.15.4	Änderungen in der Landnutzung und den Anbaustrukturen	104
<b>4</b>	<b>Darstellung und Interpretation der Ergebnisse der Einzugsgebiete der Fuhse und der Oker</b>	<b>107</b>
4.1	Darstellung und Interpretation der Ergebnisse der Wasserbilanz in den Einzugsgebieten der Fuhse und der Oker	108

4.2	Darstellung und Interpretation der Ergebnisse der Stickstoffeinträge in den Einzugsgebieten der Fuhse und der Oker	114
4.3	Darstellung und Interpretation der Ergebnisse der Phosphoreinträge in den Einzugsgebieten der Fuhse und der Oker	140
4.4	Darstellung und Interpretation der Ergebnisse der Retentionsberechnung im Gewässersystem in den Einzugsgebieten der Fuhse und der Oker	157
4.5	Ergebnisse der Auswerte- und Bewertungsroutinen im Einzugsgebiet der Fuhse und Oker	162
4.6	Signifikanzanalyse: Analyse von signifikanten Belastungen bei unterschiedlichen Betrachtungsebenen als Kennwert für die Auswahl von Szenarien und Szenarienkombinationen	165
4.7	Bewertung der grundlegenden Modellergebnisse als Basis für nachfolgende Szenarienberechnungen	173
4.8	Darstellung und Interpretation der Szenarienergebnisse hinsichtlich signifikanter Belastung in den Einzugsgebieten der Fuhse und der Oker	181
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>203</b>
<b>6</b>	<b>Literatur</b>	<b>209</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>221</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Die Qualität vieler europäischer Fließgewässer verschlechtert sich trotz erheblicher Anstrengungen ständig. Hauptursache sind die Stoffeinträge von Stickstoff- und Phosphorverbindungen als eutrophierungswirksame Pflanzennährstoffe, die punktuell und aus dem gesamten Einzugsgebiet in die Gewässer eindringen (NLWKN, 2003), sodass Mensch und Umwelt gefährdet werden und wertvolle Qualitäten von Kulturlandschaften verloren gehen. Fließgewässer sind großräumig verzweigte Systeme mit entsprechenden Einzugsbereichen, die sich nicht an politischen Grenzen orientieren. Um den Zustand eines Gewässersystems zu verbessern, ist es daher nötig, dieses im Kontext mit seiner beeinflussenden Fläche, dem Einzugsgebiet, zu betrachten. Die Verschmutzung in ihrem Ausmaß erkennend, wurde die Europäische Wasserrahmenrichtlinie im Jahr 2000 als Ordnungsrahmen geschaffen (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2000) und bis 2003 in nationales Recht umgesetzt. Das in der Richtlinie verankerte Ziel fordert das „Erreichen des guten ökologischen Zustandes bis zum Jahr 2015“. Der gute ökologische Zustand besteht aus biologischen, hydromorphologischen, chemischen und physikalisch-chemischen Qualitätskomponenten. Stoffe die zur Eutrophierung beitragen (insbesondere Nitrate und Phosphate) werden in diesem Zusammenhang der Kategorie der „Schadstoffe“ zugeordnet (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2000; Anhang VIII).

Damit ein solches Ziel erreicht werden kann, fordert die Wasserrahmenrichtlinie ein integriertes und großräumiges Flussgebietsmanagement. Mit der Bewirtschaftung von Wasserressourcen nach Flusseinzugsgebieten wird mit der Wasserrahmenrichtlinie ein Naturraum gleichzeitig ein politischer Handlungsraum (MOSS, APOLINARSKI et al., 2003). Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, die Entwicklung von Kulturlandschaften von den hydrologischen Systemen her zu betrachten und in Bezug zu setzen zu sozioökonomischen und Gestaltungsaspekten (vergleiche VON SEGGERN, 2002).

Eine der Hauptschwierigkeiten der Umsetzung aus der Sicht der Gewässerqualität liegt darin, dass zwar die Punktquellen der Gewässerverschmutzung wie Kläranlagen leicht zu identifizieren und auch zu verbessern sind, aber die zunehmend bedeutsamen diffusen, flächenhaften Einträge insbesondere in ackerbaulich genutzten Gebieten bisher weder einfach zu erfassen noch zu beeinflussen sind (LAWA, 1997; VON SEGGERN, 2002). Um Letzteres zu erreichen und die Wasserrahmenrichtlinie erfolgreich umzusetzen, wurden in Niedersachsen für die jeweiligen Einzugsgebiete Gebietskooperationen eingerichtet, in denen die Wassernutzer mit Mitgliedern aus Landkreisen, Gemeinden, Unterhaltungsverbänden, Land- und Forstwirtschaft, Wasserversorgern, Industrievertretern, Umweltverbänden und Landesämtern zusammenarbeiten (NLWKN, 2008). In anderen Bundesländern wurden entsprechende Institutionen etabliert wie beispielsweise die Runden Tische in Nordrhein-Westfalen oder die Beteiligungsplattformen in Hessen.

Diese Gebietskooperationen haben abgesehen von den üblichen Schwierigkeiten der Abwägung und Verf(1)echtung vielfältiger sektoraler Einzelinteressen der beteiligten Akteure, ein grundsätzliches Problem:

Um die Reduzierung von Stoffeinträgen konzipieren und umsetzen zu können, sind detaillierte Kenntnisse zu den Eintragsquellen und -pfaden sowie zu den räumlichen Eintragungsschwerpunkten erforderlich (SCHEER, PANCKOW et al., 2004).

Grundsätzlich können diese Kenntnisse nur durch die Anwendung von Emissionsmodellen erlangt werden, das heißt aus der Sicht der nährstoff-emittierenden Fläche (DVWK, 1999). Mit solchen Bilanzierungsmodellen lassen sich Eintragungspotenziale lokalisieren und Herkunftsanalysen der Eintragungspfade vornehmen. Im Folgenden können dann entsprechend der Ergebnisse dieser Systemanalyse Bewirtschaftungsszenarien abgeleitet und berechnet werden, mit denen auch die Wirkungen von Maßnahmen deutlich werden.

Die bislang vorhandenen Modelle weisen hinsichtlich der oben genannten Anforderungen deutliche Defizite auf und können daher nicht uneingeschränkt für die Anwendung in der wasserwirtschaftlichen Praxis zur Umsetzung der Anforderungen der Europäische Wasser-Rahmenrichtlinie empfohlen werden (SCHEER, PANCKOW et al., 2004).

Vor diesem Hintergrund wurde vom Umweltministerium Niedersachsen der Auftrag erteilt, die Modellierung diffuser Nährstoffeinträge durch die Entwicklung eines neuen praxisorientierten Bilanzmodells für die Anwendung in der wasserwirtschaftlichen Praxis hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen der Wasserrahmenrichtlinie voranzutreiben (PANCKOW, SCHEER et al., 2007). Vor diesem Hintergrund soll in vorliegender Arbeit ein solches entscheidungsunterstützendes Modell realisiert werden. Darüber hinausgehend wird ein flexibles Szenarienmodul auf der Basis einer pfadnutzungsbezogenen Signifikanzanalyse erarbeitet.

## **1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit**

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die gesamte Modellanwendung anwenderfreundlich in einer Microsoft Access<sup>®</sup>-basierten Datenbankanwendung von Grund auf zu realisieren und die kompletten Berechnungsgrundlagen zu programmieren. Dieses Modell soll es ermöglichen, in Fließgewässereinzugsgebieten die Belastungssituation der unterschiedlichen Flächen, der Eintragungspfade und der Landnutzungen quantitativ und qualitativ zu erfassen.

Innerhalb dieser Arbeit sollen wesentliche Modellierungsansätze für die Entwicklung eines neuen, optimierten Bilanzierungsmodells unter Berücksichtigung der Defizitanalyse aktueller Modelle nach SCHEER, PANCKOW et al. (2004) erarbeitet werden. Fokus liegt hierbei auf den Stickstoffpfaden, die Auswahl und Erarbeitung weiterer Berechnungsansätze erfolgten in dem Projekt „Entwicklung eines optimierten Bilanzierungsmodells zur Quantifizierung diffuser Nährstoffeinträge als Instrument zur Umsetzung der EG-WRRL“ (PANCKOW, SCHEER et al., 2007) und wurden im Zuge der vorliegenden Arbeit im Gesamtmodell programmiert und deren Berechnung damit realisiert.

Das Modell soll mit der in dieser Arbeit programmierten Modellplattform in zwei naturräumlich unterschiedlichen Einzugsgebieten (812 und 1.470 km<sup>2</sup>) im Südosten von Niedersachsen angewendet werden. Im Blick liegt dabei der langjährige mittlere Zustand, es sollen aber auch einzelne Jahre berechnet werden.

In dieser Arbeit soll eine pfadnutzungsbezogene Signifikanzanalyse für das Modell programmiert werden, die die Möglichkeit bieten soll, für Szenarienberechnungen Flächen anzusprechen, auf denen vorrangig Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Reduzierung der Ge-



---

wässerbelastung durchzuführen sind. Auf dieser Basis soll ein flexibles Szenarienmodul entwickelt werden, das es ermöglichen soll, neben der Effizienz von Einzelmaßnahmen auch die Wirksamkeit von verschiedenen Maßnahmenkombinationen standortdifferenziert zu prognostizieren und das zudem den zeitlichen Horizont einer Maßnahme berücksichtigt.

Die Innovation für die wasserwirtschaftlichen Praxis liegt in der Realisierung eines eigenständigen Werkzeuges, das Standortbedingungen auf der Grundlage verfügbarer Daten kleinräumiger als bisher berücksichtigt. Es soll zur Analyse der Eintragungssituation und zum Verständnis von Ursache-Wirkungsbeziehungen in Einzugsgebieten entwickelt werden, um als anwenderfreundliches Modell im Flussgebietsmanagement als Entscheidungsunterstützungssystem Hilfe bei der Erarbeitung von Lösungsstrategien und Maßnahmenplanung mittels zielgerichteter und variabler Szenarienberechnungen zu leisten.