

**Stephan Fuchs  
Jan Butz  
Antje Bechtel**

**Stoffstromanalysen für kleine bis mittlere Flussgebiete als  
Grundlage für die Planung und Umsetzung von  
Gewässerschutzmaßnahmen**

**BWC 21003  
Laufzeit: 01.10.2001 bis 30.09.2003**

---

# Zusammenfassung

Die EU-Wasserrahmenrichtlinie stellt der Wasserwirtschaft u.a. die Aufgabe, die Stoffeinträge in die Gewässer zu quantifizieren und in erforderlichem Umfang zu vermindern, um einen guten Zustand der Gewässer zu erreichen oder zu sichern. Nach Abschluss der Arbeiten zur Bestandsaufnahme Ende 2004 werden orientierende Hinweise zur Belastung der Gewässer und zur Signifikanz einzelner Verursacherbereiche vorliegen. Zur Aufstellung der dann gegebenenfalls zu erstellenden Bewirtschaftungs- und Maßnahmenpläne werden nachfolgend vertiefte Analysen in kleineren Bearbeitungseinheiten durchzuführen sein. Vor diesem Hintergrund ist es erforderlich, auf einer maßnahmenrelevanten Maßstabsebene Instrumentarien zur Quantifizierung der Stoffeinträge zu entwickeln und für die Praxis bereitzustellen.

Ein Beitrag zur Lösung dieser Aufgabe wurde in diesem Vorhaben geleistet. Am Beispiel eines intensiv landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebietes wurden auf Grundlage existierender Modellansätze relevante Eintragspfade identifiziert und belastungsmindernde Maßnahmen abgeleitet. Als Untersuchungsgebiet wurde das Einzugsgebiet des Oberen Kraichbachs ( $A_{EZG} = 161 \text{ km}^2$ ) ausgewählt, das sich insbesondere durch die dort praktizierte, intensive landwirtschaftliche Produktion auszeichnet. Der im Vergleich zu Baden-Württemberg (59 %) resp. Deutschland (54 %) überdurchschnittlich hohe Anteil landwirtschaftlich genutzter Flächen von mehr als 67 % unterstreicht dies eindrücklich.

Für insgesamt 11 Eintragspfade wurden die erforderlichen Eingangsdaten recherchiert und verschiedene Modellansätze auf ihre Einsetzbarkeit zur Beschreibung der Stoffeinträge in die Gewässer auf Flussgebietsebene untersucht.

Der Fokus der Datenrecherche lag auf der Gewinnung von statistischen und stofflichen Eingangsdaten mit einem möglichst hohen regionalen Bezug. Es wurden daher auf eigene Messdaten und auf die im Einzugsgebiet gewonnenen Ergebnisse Dritter zurückgegriffen. Der Naturraum Kraichgau ist auf Grund des bestehenden Nutzungsschwerpunktes und der daraus resultierenden Gewässerproblematik Gegenstand einer Vielzahl von Untersuchungen, so dass auf umfangreiches Datenmaterial zurückgegriffen werden konnte.

Die geprüften Modellansätze umfassten sowohl physikalisch basierte Modelle zur Beschreibung von Einzelpfaden als auch konzeptionelle, empirische Modellbausteine. Intensiv wurden mögliche Alternativen für diejenigen nicht nur im Untersuchungsgebiet, sondern allgemein als bedeutend anzusehenden Eintragspfade geprüft, für die ein Verbesserungsmöglichkeit gesehen wurde. Dies sind die Erosion, der Grundwassereintrag und die Entlastungen von Mischkanalisationen.

Entscheidungsrelevant für die Nutzung eines Modellansatzes im hier vorgestellten Gesamtmodell waren:

- realitätsnahe Abbildung der Stoffeinträge,
- Berücksichtigung operabler Größen,
- flächendeckende Verfügbarkeit der erforderlichen Eingangsdaten,
- Transparenz des Berechnungsansatzes,
- Anwendbarkeit auch außerhalb von Forschungsinstituten und
- weitgehende Kompatibilität zu bestehenden makroskaligen Flussgebietsmodellen.

Vollumfänglich können diese Anforderungen nur durch konzeptionelle Modellansätze, gegebenenfalls in Kombination mit deterministischen Einzelmodellen, erfüllt werden.

Die im Vorhaben getesteten, physikalisch basierten Modelle, wie z.B. E3D, führten in Teileinzugsgebieten ohne aufwändige Eichung nicht zu akzeptablen Ergebnissen und sind so

anspruchsvoll bezüglich der Eingangsdaten, dass selbst die Anwendung im kleinen und vergleichsweise gut dokumentierten Einzugsgebiet des Weiherbachs nicht gelang.

Die Güte der Gesamtergebnisse wird weniger durch den Modellansatz als vielmehr durch die Verfügbarkeit und Qualität der erforderlichen Eingangsdaten bestimmt. Es kann daher festgehalten werden, dass die auf der Ebene großer Einzugsgebiete entwickelten Ansätze nach einigen Modifikationen und unter Verwendung standortgerechter Eingangsdaten auch für kleine Bearbeitungseinheiten sehr gute Ergebnisse liefern. In diesem Vorhaben wurden die Ansätze folgender Eintragspfade weiterentwickelt/modifiziert:

- Grundwasser
- Erosion
- Mischwasserüberläufe

Zur Überprüfung der Güte der Modellergebnisse und zur Beschreibung der Transport- und Retentionsprozesse im Einzugsgebiet wurde während des gesamten Untersuchungszeitraumes ein zweistufiges Messprogramm durchgeführt. Über ein 14-tägiges Routineprogramm wurde beispielsweise die Basis zur Berechnung der im Gewässer transportierten Frachten geschaffen. Die Ergebnisse dieses Programms erlauben darüber hinaus Rückschlüsse auf den Wasserhaushalt im Einzugsgebiet und den daran gekoppelten Stofftransport. Sowohl die gemessenen Abflüsse als auch die Stoffkonzentrationen belegen, dass der Kraichbach im Mittel ein basisabflussdominiertes Gewässer ist. Jahreszeitliche Schwankungen im Stoffangebot des Einzugsgebietes spiegeln sich in der Gewässerqualität nicht wieder, sondern werden durch den Grundwasserspeicher mit langen Aufenthaltszeiten (10-20 Jahre) abgepuffert.

Das Routineprogramm wurde ergänzt um abflussgesteuerte Ereignisprobenahmen an 2 Kontrollpegel, um die Frachtbetrachtungen im Gewässer zu komplettieren und um die auf Einzelereignisse zurückzuführenden Frachtanteile zu quantifizieren. Erwartungsgemäß ist der ereignisbedingte Frachtanteil bei Stickstoff gering (4,3%), während etwa ein Viertel der Phosphorjahresfracht an nur 9 Tagen realisiert wird.

Die Gegenüberstellung der berechneten Einträge und der über die Gewässeruntersuchungen ermittelten Frachten belegt die Eignung der zugrundegelegten Daten und Quantifizierungsansätze für das gegebene Untersuchungsgebiet. Bei Stickstoff und Phosphor werden größte Übereinstimmungen bzw. folgerichtige Abweichungen zwischen Eintrag und Gewässerfracht festgestellt. Und mit Ausnahme des Kupfers zeigen sich auch bei den Schwermetallen trotz erheblicher größerer Unsicherheiten, sowohl auf der Emissions- als auch auf der Immissionsseite, gute Übereinstimmungen.

In der Summe belaufen sich die Nährstoffeinträge aus dem Einzugsgebiet des oberen Kraichbaches auf 263 t N/a und 16,3 t P/a. Demgegenüber stehen die Gewässerfrachten von 232 t N/a bzw. 18,3 t P/a. Bezüglich des Stickstoffes ist der Unterschied zweifellos und folgerichtig auf die gewässerseitige Retention zurückzuführen, die bei diesem Vergleich noch nicht berücksichtigt ist. Beim Phosphor, für den sich rechnerisch eine negative Retention ergeben würde, ist festzustellen, dass unter den gegebenen gewässermorphologischen Bedingungen von einer Nullretention auszugehen ist. Die ermittelte Differenz zwischen Gewässerfracht und Einträgen ist auf eine geringe Unterschätzung der Eintragungssituation (Erosion, Mischkanalisationsüberläufe) und besondere Unsicherheiten in der Immissionsberechnung zurückzuführen.

Die bedeutendsten Anteile der Stickstoffemissionen mit annähernd 55 % liefern die Einträge über das Grundwasser. Kommunale Kläranlagen tragen zu weiteren 20 % zur Gesamtfracht bei und alle weiteren Eintragspfade haben Emissionsanteile, die deutlich unter 10 % liegen.

Für den Phosphor haben ebenfalls die kommunalen Kläranlagen im Gebiet mit ca. 33 % einen hohen Anteil an den Gesamtemissionen. Bedeutender sind allerdings noch die Einträge über die Erosion, die mit 38 % zu berechneten Gesamtfracht beitragen.

Bemerkenswert für beide Stoffe ist, dass die Mischwasserüberläufe in nicht vernachlässigbarer Größenordnung (N: 8,9 %; P: 11 %) als Emittent berechnet wurde. Insbesondere beim Stickstoff weicht die Fracht von den bisher veröffentlichten Ergebnissen ab. Die Abweichung ist neben der Veränderung des Berechnungsansatzes vor allem auf die Nachrecherche realitätsnaher Überlaufkonzentrationen zurückzuführen.

Ein Vergleich der ermittelten Gesamtfrachten mit den Ergebnissen anderer Autoren (RUF, 2003) verdeutlicht eklatante Abweichungen in der Summe und bei einzelnen Pfaden. Die für den Stickstoff berechnete Gesamtfracht wird von RUF (2003) 25 % höher geschätzt, was zu 100 % aus einer höheren berechneten Fracht über Grundwasser erklärt werden kann. Die Emissionen aus Grundwasser für sich genommen werden rund 75 % größer berechnet. Bei Phosphor wird die über Erosion eingetragene Fracht von RUF (2003) 40 % größer geschätzt.

Diese Unterschiede sind im wesentlichen auf die Verwendung modifizierter, an den Betrachtungsmaßstab angepasster Quantifizierungsansätze und auf die Einbeziehung neuer, gebietsspezifischer Eingangsdaten zurückzuführen. Im Pfad Grundwasser fand das Wasserhaushaltsmodell LARSIM Eingang, womit die Grundwasserneubildungsrate detaillierter berechnet werden konnte. Die Differenz in der Erosionsberechnung lässt sich u.a. durch einen speziell für das Einzugsgebiet abgeleiteten Anreicherungsfaktor erklären.

Die Schwermetalleinträge in den Kraichbach stellen sich wie folgt dar:

Cd [kg/a]	Cr [kg/a]	Cu [kg/a]	Ni [kg/a]	Pb [kg/a]	Zn [kg/a]
5,7	269,9	393,0	270,6	271,3	1.600,5

Metallspezifisch wechselt die Bedeutung der einzelnen Eintragspfade sehr stark. In unterschiedlicher Reihenfolge, abhängig von chemisch-physikalischen Verhalten der verschiedenen Metalle, werden die Eintragspfade Mischwasserüberläufe, Erosion und kommunale Kläranlagen als Haupteintragspfade identifiziert. Das Spektrum der über Mischwasserüberläufe emittierten Schwermetallanteile liegt beispielsweise zwischen ca. 45 % für Zink und 8 % für Nickel. Bei den erosionsbedingten Metalleinträgen steht Chrom mit 76 % an erster Stelle, Kupfer wird mit 26 % vorwiegend über den Ablauf der kommunalen Kläranlagen in den Kraichbach eingetragen.

Wie auch bei den Nährstoffe ergibt der Vergleich mit den Ergebnissen anderer Autoren teilweise eklatante Abweichungen. Und ebenfalls wie bei den Nährstoffen sind dies Abweichungen auf die verbesserten Modellansätze und die Güte der Eingangsdaten zurückzuführen.

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Nach der in diesem Vorhaben durchgeführten Prüfung verfügbarer Berechnungsansätze zur Berechnung von Emissionen in Flussgebieten der Größe 100 bis 200 km<sup>2</sup> (Mesoskala) ist festzustellen, dass die auf der Makroskala entwickelten, empirisch-konzeptionellen Ansätze nach entsprechenden Anpassungen und funktionalen Ergänzungen mit gutem Erfolg auf die gegebene Betrachtungsebene übertragbar sind und einen unmittelbaren Maßnahmenbezug im Einzugsgebiet erlauben.

Gemessen an dem zusätzlich erforderlichen Aufwand bezüglich der zu recherchierenden Eingangsdaten lieferten die weiteren, teilweise physikalisch basierten Berechnungsmodelle keine nennenswerte Verbesserung der Modellaussage. Vielmehr ist festzuhalten, dass die Güte der Berechnungsergebnisse in Bezug auf die absoluten Frachten aber auch den regionalen Bezug unmittelbar von der Verfügbarkeit und Qualität der Eingangsdaten abhängt. Es wird daher kein grundsätzlicher Bedarf zur Neuentwicklung von Quantifizierungsansätzen gesehen.

Die Potenziale zur Weiterentwicklung einzelner Ansätze ist pfad- und stoffspezifische sehr unterschiedlich, da wie schon dargestellt, eine verbesserte räumliche und zeitliche Auflösung letztendlich von dem auf Betrachtungsebene vorhandenen Datenbestand abhängt und z.B. bei den Schwermetallen auf mesoskaliger Ebene sehr schnell Grenzen erreicht.

Wie in anderen Studien auch wurden als mit Abstand bedeutendste Emissionspfade „Mischwasserüberläufe“, „Bodenerosion“ und „Kläranlagen“ sowie bei Stickstoff und Nickel „Grundwasser“, identifiziert. Sie verursachen bei allen betrachteten Stoffen mindestens 80 % der Gesamtfrachten. Die Weiterentwicklung von Modellenansätzen, die in Teilbereichen schon in diesem Vorhaben durchgeführt wurde, sollte sich daher ausschließlich auf diese Pfade konzentrieren.

Entwicklungspotenzial wird beim Modul „Mischwasserüberläufe“ vor allem auf Seiten der angesetzten Überlaufkonzentrationen gesehen. Diese können – gebietsspezifisch – erheblich differieren, was in der derzeitigen Herangehensweise nicht berücksichtigt wird. Ziel sollte ein Verfahren sein, das die unterschiedliche Stärke der Verschmutzungsquellen von Trockenwetter- und Oberflächenabfluss abbildet und zugleich den Einfluss der Kanalablagerungen berücksichtigt.

Der wesentliche Punkt, an dem die Abschätzung der Emissionen aus Bodenerosion verbessert werden kann, ist die Kalkulation des Sediment-Eintragsverhältnisses. Es ist unzufriedenstellend, dass derzeit dieser so überaus wichtige Retentionsprozess noch mit sehr einfachen Gleichungen berechnet werden muss. Laufende Arbeiten, die einen Beitrag dazu liefern könnten, wurden im Bericht vorgestellt. Als ebenfalls entwicklungsbedürftig im Sinne einer Übertragbarkeit wird der Ansatz zur Berechnung von Anreicherungsverhältnissen gesehen. Der gegenwärtig verfügbare, ausschließliche auf dem Sedimenteintrag basierende Ansatz führt in einigen Gebieten zur Überschätzung der Stoffeinträge.

Die Nährstoffemissionen aus Kläranlagen können befriedigend abgeschätzt werden. Zur zuverlässigen Berechnung der Schwermetall fehlen vor allem aktuelle Messwerte der Ablaufkonzentrationen. Angesichts der von uns geschätzten Gewichtung dieses Pfades erscheint eine entsprechende Aktion zur Verdichtung des Datenbestandes von großer Bedeutung.

Die Abschätzung der Stickstoffemissionen über das Grundwasser ist hinsichtlich der Größenordnung auch auf mesoskaliger Ebene möglich. Jedoch hängt das Ergebnis neben den Stickstoffbilanzen, die nur auf Gemeindeebene erstellt werden können maßgeblich von der Abbildung der Umsetzungsprozesse ab. Da zur modellhaften Beschreibung dieser

Prozesse eine Vielzahl von Faktoren mit extremer raum-zeitlicher Varianz zu berücksichtigen ist, sollten zur Abschätzung der Stickstoffdynamik im Boden in stärkerem Maße Messwerte, in Form von Nmin-Daten genutzt werden. Die Nmin-Daten liegen in mehreren Bundesländer vor und sind bereits durch die Düngeberatung in die landwirtschaftliche Praxis eingebunden. Eine gezielte Analyse der Datenbestände zur Abschätzung der Sickerwasserkonzentrationen, wie sie in diesem Vorhaben vorgestellt wurde, wird als wichtige Zukunftsaufgaben bei diesem Pfad gesehen.