

## Nährstoffeintragsmodellierung mit MONERIS-Bayern

### Einleitung:

Bei MONERIS (Modelling Nutrient Emissions in River Systems) handelt es sich um ein Modellsystem zur meso- und makroskaligen (50 – 1000 km<sup>2</sup> bzw. >1000 km<sup>2</sup>) flussgebietsbezogenen Bestimmung diffuser und punktueller Nährstoffeinträge in Gewässersysteme. Unter Berücksichtigung der wesentlichen Retentionsprozesse können mit dem konzeptionellen Modell die mittleren jährlichen Phosphor- und Stickstoffeinträge eintragungspfadbezogen berechnet werden.

Modellsysteme zur Abschätzung von Nährstoffeinträgen in die Gewässer kommen vermehrt zum Einsatz, seitdem in den 80er und 90er Jahren die Probleme der Eutrophierung der Oberflächengewässer einschließlich Nord- und Ostsee durch überhöhte Nährstoffeinträge stärker ins öffentliche Bewusstsein gelangt sind. Für beide Seegebiete wurden daher im Rahmen der Internationalen Nordseeschutzkonferenzen (INK) und der Helsinki-Kommission (HELCOM) vereinbart, die Nährstoffeinträge in der Größenordnung von 50 % zu verringern.

Eine solch umfangreiche Verminderung kann nur durch Reduzierungsmaßnahmen erreicht werden, die an allen Quellen angreifen. Aussagen über die Minderung der Nährstoffeinträge aus diffusen und punktuellen Quellen setzten jedoch voraus, dass diese so präzise wie möglich sowohl für Phosphor als auch für Stickstoff quantifiziert werden können. Dazu ist zum Einen das Wissen über die Quellen notwendig, zum Anderen auch die Frage zu beantworten, in welchen Mengen und auf welchen Eintragungswegen die Nährstoffe in die aquatische Umwelt gelangen. Dabei spielen die Einleitungen aus Punktquellen und die Einträge aus diffusen Quellen eine entscheidende Rolle, wobei die auftretenden Rückhalte-, Speicherungs- und Transformationsprozesse nicht vergessen werden dürfen.

Dieser Thematik der Bestimmung der Nährstoffeinträge aus punktuellen und diffusen Quellen widmete sich auch die gemeinsame Initiative der Oslo- und Paris-Kommission zum Schutz der Meeresumwelt der Nordsee und des Nordost-Atlantiks, der Helsinki-Kommission zum Schutz der Meeresumwelt der Ostsee und der Europäischen Union. Ihr Ziel war es, die in den Anrainerstaaten bestehenden Quantifizierungsmethoden und die Berichterstattung zu den Nährstoffeinträgen zu harmonisieren.

Das Modell MONERIS entspricht einer der Methoden, die von der Arbeitsgruppe der OSPAR-Vertragsstaaten empfohlen wurde und stimmt mit den Ansätzen überein, die in der Schweiz und in der Internationalen Kommission zur Reinhaltung des Rheins bereits angewandt wurden. MONERIS ist daher seit ca. 1999 ein in Deutschland und Europa vielfach angewandtes Modell zur flussgebietsbezogenen Analyse der Nährstoffbelastungen. Im Donaauraum (Internationale Kommission zum Schutz der Donau) ist das Modell mittlerweile fest etabliert.

### Eintragungspfade:

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 der über die verschiedenen Eintragungspfade mit den verschiedenen Komponenten des Abflusses transportierten Stoffe. Die Unterscheidung nach einzelnen Komponenten ist notwendig, da sich sowohl ihre Stoffkonzentrationen als auch die zu Grunde liegenden Prozesse meist stark unterscheiden.

Entlang der verschiedenen Eintragungspfade unterliegen die Stoffe umfangreichen physikalischen, chemischen und biologischen Umsetzungs-, Retentions- und Verlustprozessen. Die Nährstoffe Stickstoff (N) und Phosphor (P) unterscheiden sich dabei deutlich. So wird Phosphor unter natürlichen Bedingungen im Boden stark absorbiert, weshalb dieser Nährstoff vor allem durch Partikeltransport in die Gewässer eingetragen wird. Dieser ist vorwiegend an die Erosion und damit an den Oberflächenabfluss gekoppelt.

Stickstoff unterliegt dagegen verschiedenen Umsetzungsprozessen in der Bodenzone. Entstehendes Nitrat kann leicht ausgewaschen werden. Der Nitrattransport in die Gewässer ist somit vorwiegend an die unterirdischen Abflusskomponenten (Zwischenabfluss bzw. Interflow und Basisabfluss) gebunden. Darüber hinaus kann Nitrat während des Transports abgebaut werden, was u. a. zeitabhängig ist. Hierdurch besteht für die Nitratkonzentration auch eine Abhängigkeit von den Verweilzeiten des Wassers auf dem unterirdischen Weg in die Gewässer.

In MONERIS werden daher mindestens sieben verschiedene Eintragspfade berücksichtigt: Punktquellen, atmosphärische Deposition, Erosion, Abschwemmung (gelöste Nährstoffe), Grundwasser, Drainagen und versiegelte urbane Flächen (s. Abb. 1).

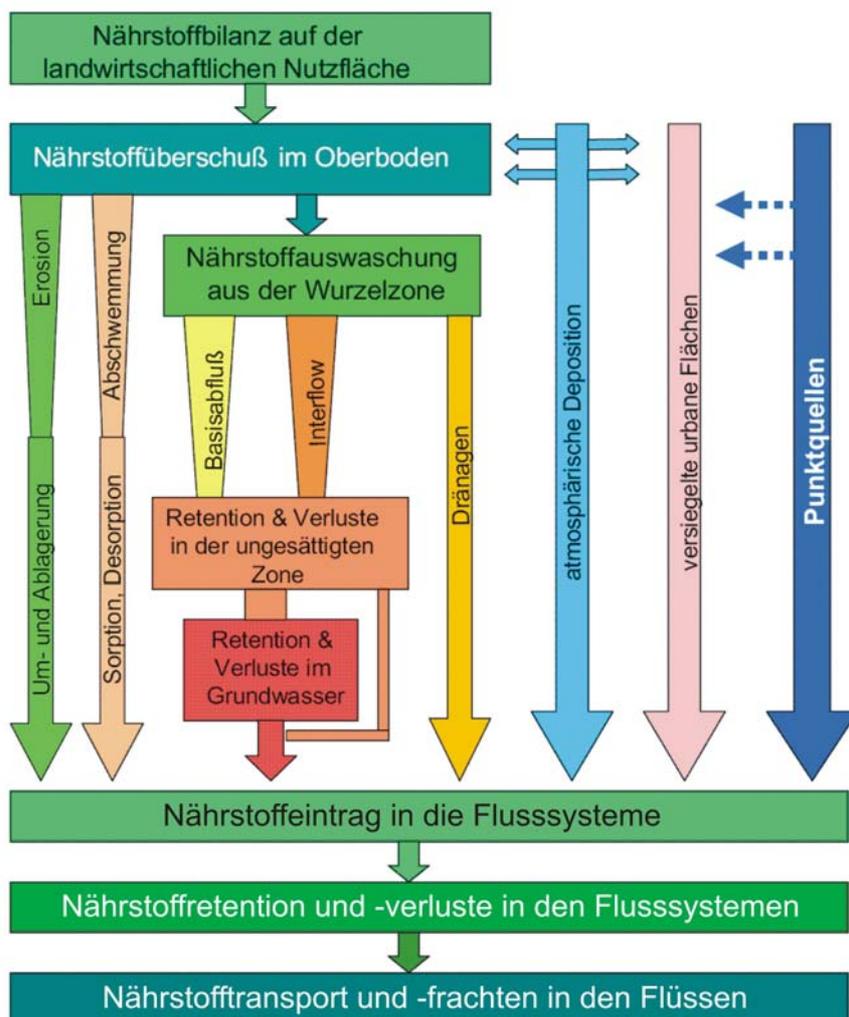


Abbildung 1: Pfade und Prozesse von MONERIS (nach Behrendt et al., 1999)

#### Methode:

Grundlage für die Berechnungen ist die Ermittlung der Wasserbilanz für die Teileinzugsgebiete aus meteorologischen und hydrologischen Zeitreihen. Der Gesamtabfluss ergibt sich dabei aus den Komponenten des oberirdischen Abflusses von nicht versiegelten Flächen und versiegelten urbanen Flächen sowie den Komponenten des unterirdischen Abflusses wie Zwischenabfluss, Basisabfluss und Dränagen. Zudem wird noch der direkte Niederschlag auf die Wasseroberflächen berücksichtigt. Für die Stoffeinträge von urbanen Flächen wird der Abfluss in drei Pfade unterteilt: Entlastungen der Mischkanalisation, Regenwasser

aus Trennkanalisation und versiegelte Flächen, die an keine Kanalisation angeschlossen sind.

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Prozesse für die Einzugsgebiete gehen u. a. folgenden Daten in MONERIS ein:

- Niederschlagsdaten REGNIE (regionalisierte Niederschlagsreihen) 1961-1991 (DWD) (Monatsmittelwerte bzw. Jahresmittelwert aller Jahre im 1x1 km-Raster in mm/m<sup>2</sup>)
- Landnutzung nach amtl. topografisch-kartografischem Informationssystem (ATKIS 2005)
- Bodeninformationen aus Bodenübersichtskarte (BÜK 1.000): Bodenmatrix
- Hydrogeologische Karte (HÜK 200): Locker- u. Festgesteinsbereich, Grundwasser
- Digitales Höhenmodell (DHM 50); Stand 2004
- Bodenabtragskarte der Landwirtschaftsverwaltung (LfL): Erosion; Stand 2006
- P-Gehalte des Oberbodens (LfL u. TU München): Erosion, Abschwemmung; Stand 2003
- Stickstoffsalden auf landwirtschaftlichen Flächen 2006 (LfL): Sickerwasser
- Drainageflächen (IGB); (keine zentral gesicherten digitalen Daten für Bayern vorhanden)
- Statistische Daten der Gemeinden und Kreise 2004-2006 (BayLStD): Einwohner, Kanalisation, etc.
- Atmosphärische Deposition (UBA/BMU - Gauger; Stand 1999)
- Kommunale Kläranlagen (UDIS-Bayern); Stand 2006
- Kleinkläranlagen (Statistische Daten der Gemeinden und Kreise 2004-2006, BayLStD)
- Industriekläranlagen (UDIS-Bayern); (Mittelwert der Jahre 2002 – 2006)
- Regenbecken (Datenbank LfU); letzte Aktualisierung von 2005

Berechnung der Eintragspfade:

#### Kläranlagen:

Für die Frachtermittlung wurden alle Kläranlagen aus der Datenbank UDIS-BY herangezogen. Bei den kommunalen Kläranlagen wurden für 2006 aus den amtlichen Messungen und den Eigenüberwachungswerten (soweit erfasst) die Frachten abgeleitet. Fehlende Daten wurden durch Vergleich mit ähnlichen Kläranlagen (gleiche Art und Ausbaugröße) abgeleitet. Bei industriellen Kläranlagen bzw. Einleitern wurde ebenfalls auf die Datenbank UDIS-BY zurückgegriffen. Hier wurden diejenigen Direkteinleiter berücksichtigt, für die Bescheidswerte für Phosphor- und Stickstoffeinleitungen vorliegen. Ausgewertet wurden für die Jahre 2002-2006 aber nur die Überwachungswerte, da die Bescheidswerte i. d. R. zu einer deutlichen Überschätzung der Eintragsfrachten führen.

Über Kläranlagen kommt im Mittel in Bayern ca. 16 % der Stickstofffracht in die Oberflächengewässer und ca. 27 % der Phosphorfracht (s. Abb. 2). Je nach Einzugsgebiet kann der Kläranlagenanteil auf bis zu ca. 85 % für Stickstoff (N) bzw. Phosphor (P) steigen.

#### Trennsystem:

Als Datengrundlage für die Frachtermittlung diente die Auswertung des Statistischen Landesamtes zu den Kanallängen in Bayern 2004. Hier sind gemeindeweise die Kanallängen von Misch-, Schmutz- und Regenkanälen erfasst. Es wird angenommen, dass das Verhältnis von Mischkanallänge zu Schmutzkanallänge dem Verhältnis Mischsystemfläche zu Trennsystemfläche in einer Gemeinde gleichgesetzt werden kann. Mit der atmosphärischen Deposition, dem Niederschlag und der Siedlungsfläche aus ATKIS lässt sich daraus die Eintragsfracht durch das Regenwasser aus den Trennsystemen errechnen. Da aber das Statistische Landesamt Daten zu Kanallängen denjenigen Gemeinden zuordnet, die Sitz des Kanalbetreibers sind, können vor allem bei großen Verbänden Zuordnungsschwierigkeiten auftreten.

Der Anteil des Trennsystems an den Nährstoffeinträgen in Bayern beträgt im Mittel ca. 2 % für N und P (s. Abb. 2). Die höchsten Werte können je nach Einzugsgebiet ca. 12 % für N und 20 % beim P betragen.

#### Mischsystem:

Berücksichtigt wurden nur die in der Regenbeckendatenbank am LfU aufgelisteten Mischwasserbehandlungsanlagen. Für jedes bestehende Becken wurde die theoretische Entlastungsmenge errechnet. Als Entlastungskonzentrationen wurden Literaturwerte verwendet und daraus die jährlichen Entlastungsfrachten ermittelt. Als Berechnungsgrundlage dienten neben der Niederschlagshöhe und dem Beckenvolumen auch die angegebenen bzw. errechneten angeschlossenen Flächen und die Regenabflussspenden. Für jeden Betrachtungsraum wurden die Einzelfrachten abhängig vom Beckenstandort aufsummiert.

Über das Mischsystem gelangt in Bayern im Mittel nur ca. 1 % der N- und 5 % der P-Frachten in die Gewässer (s. Abb. 2). Je nach Einzugsgebiet könne diese Anteile auf 8 bzw. 40 % für N bzw. P steigen.

#### Kleinkläranlagen:

Datengrundlage war eine Auswertung des Statistischen Landesamtes zu den nicht an Kläranlagen angeschlossenen Einwohnern in Bayern Stand 2004. Für die Frachtermittlung wurden die spezifischen Nährstofffrachten und der spezifische Abwasseranfall je Einwohner angesetzt. Die mittlere Reinigungsleistung je Kleinkläranlage wurde aus Erfahrungswerten abgeleitet, der Einleitungsanteil in oberirdische Gewässer geschätzt. Die Einleitungen über Versickerung bzw. Güllegruben blieben unberücksichtigt, da sie indirekt beim Eintragspfad Grundwasser über die N-Salden berücksichtigt werden.

Die Eintragsfrachten bei den Kleinkläranlagen tragen in Bayern im Mittel zu 1 % beim N und 3 % beim P bei (s. Abb. 2) und können je nach Einzugsgebiet maximal 4 bzw. 13 % erreichen.

#### Erosion:

Mit einem Geografischen Informationssystem (GIS) wurden aus dem digitalen Höhenmodell (DHM 50) diejenigen Flächen ermittelt, die eine direkte Anbindung an ein Gewässer besitzen. Verwendet wurde das digitale Gewässernetz 1:25.000. Für einen potentiellen Nährstoffeintrag wurden nur Ackerflächen und Flächen mit mehr als 1% Gefälle berücksichtigt. Der Bodenabtrag (errechnet mit ABAG; Stand 2006) wurde von der Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) errechnet und im 50x50m-Raster zur Verfügung gestellt. Die Nährstoffeintragsfracht wird aus den ermittelten Anbindungsflächen, dem Bodenabtrag und dem Nährstoffgehalt im Oberboden hergeleitet. Erfasst werden hier die partikulär gebundenen Nährstoffe.

Die Erosion ist neben den Punktquellen einer der maßgeblichen Eintragspfade für Phosphor. Im Mittel liegt ihr Anteil in Bayern bei ca. 27 %, für Stickstoff nur bei 3 % (s. Abb. 2). Der Anteil kann jedoch je nach Einzugsgebiet bei P auf 70 % und bei N auf 30 % steigen.

#### Atmosphärische Deposition:

Dieser Eintragspfad beschreibt die Nährstoffeinträge, die aus dem Niederschlag direkt über die Wasseroberfläche in ein Gewässer gelangen. Datengrundlage sind die Niederschlagshöhe, die atmosphärische Deposition und die Wasserfläche aus ATKIS.

Der Eintragspfad ist daher nur bei den größeren Seen von Bedeutung und liegt im Mittel in Bayern bei 2 bzw. 1 % für N bzw. P (s. Abb. 2). In den Seeneinzugsgebieten können die Anteile bis zu ca. 30 % bzw. 20 % für N bzw. P betragen.

### Abschwemmung, Oberflächenabfluss:

Als Abschwemmung versteht man den Eintrag von Nährstoffen ins Gewässer in gelöster Form mit dem Oberflächenabfluss (im Gegensatz zur Erosion). Erfasst werden hier aber nur Einträge von landwirtschaftlichen Nutzflächen und offenen Flächen. Niederschlagshöhe, atmosphärische Deposition und Nährstoffgehalte im Oberboden sind dabei die wesentlichen Faktoren. Bei diesem Eintragspfad sind auch die Einträge durch Schneeschmelze bzw. Gletscherabfluss berücksichtigt.

Der Oberflächenabfluss ist im Mittel in Bayern beim Stickstoff- mit 7 % und mit einem nicht unerheblichen Anteil von 18 % am Phosphoreintrag beteiligt (s. Abb. 2). Diese Werte können je nach Einzugsgebiet auf 14 bzw. fast 60 % für N bzw. P steigen.

### Dränagen:

Daten über gedränte Flächen liegen zentral für Bayern nicht vor. Die Anteile gedränter Flächen wurden aus einer Erhebung des Instituts für Gewässerökologie und Binnenfischerei im Forschungsverbund Berlin e.V. abgeleitet. Die Nährstofffrachten aus Dränabflüssen errechnen sich aus den Nährstoffsalden der LfL, der Deposition, der Niederschlagshöhe und der Bodenart bzw. daraus abgeleitet der Feldkapazität. Aufgrund der fehlenden Erfassung der Dränflächen ist dieser Eintragspfad mit großen Unsicherheiten behaftet.

Der Anteil der Dränagen an den Nährstoffeinträgen liegt in Bayern im Mittel bei 4 bzw. 2 % für N bzw. P (s. Abb. 2) und kann je nach Einzugsgebiet auf 17 bzw. 10 % zunehmen.

### Grundwasser:

Die Nährstofffrachten über den Grundwasserpfad werden aus Berechnungen mit Nährstoffsalden (Stand 2006), atmosphärischer Deposition (Stand 1999), Niederschlagshöhe, Bodenart und hydrogeologischer Einheit ermittelt. Es wird die Nährstoffkonzentration im Sickerwasser errechnet und mit einer Nährstoffretention in der Bodenzone die daraus resultierende Nährstoffkonzentration im Grundwasser abgeschätzt. Der Anteil, der als Basisabfluss bzw. Interflow in die Oberflächengewässer geht, wird bestimmt und daraus die eingetragene Nährstofffracht errechnet.

Dieser Eintragspfad stellt mit ca. 65 % im Mittel den mit Abstand höchsten Anteil am Stickstoffeintrag in Oberflächengewässer dar (s. Abb. 2), der je nach Einzugsgebiet auf bis zu 90 % ansteigen kann. Beim Phosphoreintrag liegt der Mittelwert bei 15 % (s. Abb. 2) und das Maximum in Hochmoorgebieten mit landwirtschaftlicher Nutzung bei bis zu 70 %.

### **Ergebnisse:**

Für die Bilanzierung der Nährstoffströme in einem Einzugsgebiet mit MONERIS werden somit die Einträge aus diffusen Quellen sowie die Daten zu Punktquellen und Ansätze über Rückhalt und Verluste im Gewässersystem berücksichtigt. Damit lassen sich die Einträge über alle Eintragspfade darstellen und auch bewerten. Dies ist sowohl für den aktuellen Ist-Zustand möglich als auch für bestimmte Szenarien. Die relative Bedeutung einzelner Einflussgrößen kann dadurch dargestellt oder Möglichkeiten und Grenzen zukünftiger Entwicklungen abgeschätzt werden (z. B. Baseline-Szenario).

Vergleiche der errechneten und gemessenen Nährstofffrachten an zahlreichen Pegeln in Bayern zeigen eine gute Übereinstimmung der Werte für solche Modellierungen. Eine exakte Übereinstimmung der Werte ist jedoch nicht möglich, da es sich bei den Berechnungsansätzen und den verfügbaren Datengrundlagen um ein optimiertes Schätzverfahren für die Nährstoffeinträge in Oberflächengewässer handelt. Insbesondere im Hinblick auf die Stoffeinträge in das Grundwasser ist das Modell MONERIS nicht geeignet, Maßnahmen ausreichend genau abbilden zu können.

Die Ergebnisse von MONERIS beziehen sich immer auf ein bestimmtes Bilanzgebiet, i. d. R. ein Betrachtungsraum (=MONERIS-Gebiet). Eine kleinräumigere Betrachtung der Ergebnisse z. B. auf der Ebene einzelner OWKs ist aufgrund der Modellansätze nicht möglich. Das Bilanzgebiet sollte daher eine Größe von 50 km<sup>2</sup> nicht unterschreiten. Die Ergebnisse von deutlich kleineren Bilanzgebieten, die sich in Grenzregionen ergeben haben und in der Tabelle (z. B. MONERIS\_Naehrstoffe\_Ergebnisse\_BY.xls) grau hinterlegt sind, sind daher nur sehr eingeschränkt verwertbar.

In den Ergebnistabellen sind für die einzelnen Betrachtungsräume jeweils für Phosphor und Stickstoff entweder die prozentualen Anteile der verschiedenen Eintragspfade am Gesamteintrag dargestellt oder die Fracht pro Jahr. Eine Unterscheidung zwischen Ammonium- und Nitrat-Stickstoff sowie den Phosphorfraktionen ist nicht möglich.

#### Beispiel: Phosphoreintrag in %

Betrachtungsraum	Kläranlagen	Trennsystem	Mischsystem	KleinKA	Erosion	Deposition Wasserfl.	Oberflächenabfluss	Dränagen	Grundwasser
10901040402	33,3	2,5	4,3	5,3	14,6	0,2	27,6	0,6	11,6

#### Beispiel: Stickstoffeintrag in %

Betrachtungsraum	Kläranlagen	Trennsystem	Mischsystem	KleinKA	Erosion	Deposition Wasserfl.	Oberflächenabfluss	Dränagen	Grundwasser
10901040402	12,9	1,1	0,6	0,9	1,9	0,6	6,3	1,8	73,9

Die Ergebnisse für einen Betrachtungsraum können für die prozentualen Anteile auch grafisch dargestellt werden. Nach der Markierung eines Betrachtungsraums in der Tabelle (MONERIS\_Naehrstoffe\_Ergebnisse\_BY.xls) und Betätigung des Feldes „Diagramm erstellen“ erhält man ein Diagramm zum Ausdrucken. Wie in Abbildung 2 sind hier die prozentualen Anteile der verschiedenen Eintragspfade für Phosphor und Stickstoff in die oberirdischen Gewässer dargestellt.

Für die Ermittlung der Belastungsursachen im Rahmen des Bewirtschaftungsplans 2009 nach EG-WRRL sollen die Pfadbetrachtungen dem WWA als Hilfestellung für die Festlegung der Hauptverursacher einer Nährstoffbelastung dienen. Die Darstellung der prozentualen Anteile zeigen die Bedeutung der verschiedenen Eintragspfade in einem Betrachtungsraum bzw. MONERIS-Gebiet auf.

Dabei ist zu beachten, dass die tatsächliche immissionsseitige Gesamtbelastung in einem Betrachtungsraum sich aus dem Betrachtungsraum selbst und den oberhalb liegenden Einzugsgebieten zusammensetzt. Dies wird bei dieser Form der MONERIS-Darstellung nicht berücksichtigt.

### Anteile der Eintragspfade am Nährstoffeintrag in Bayern (Berechnungen mit MONERIS)

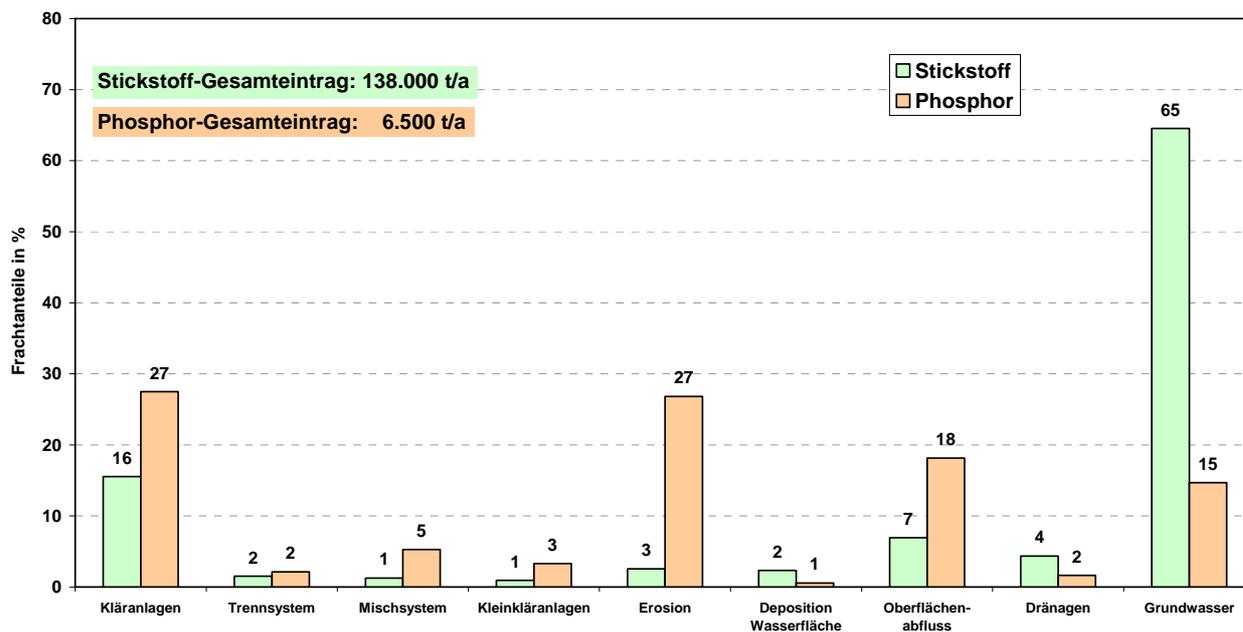
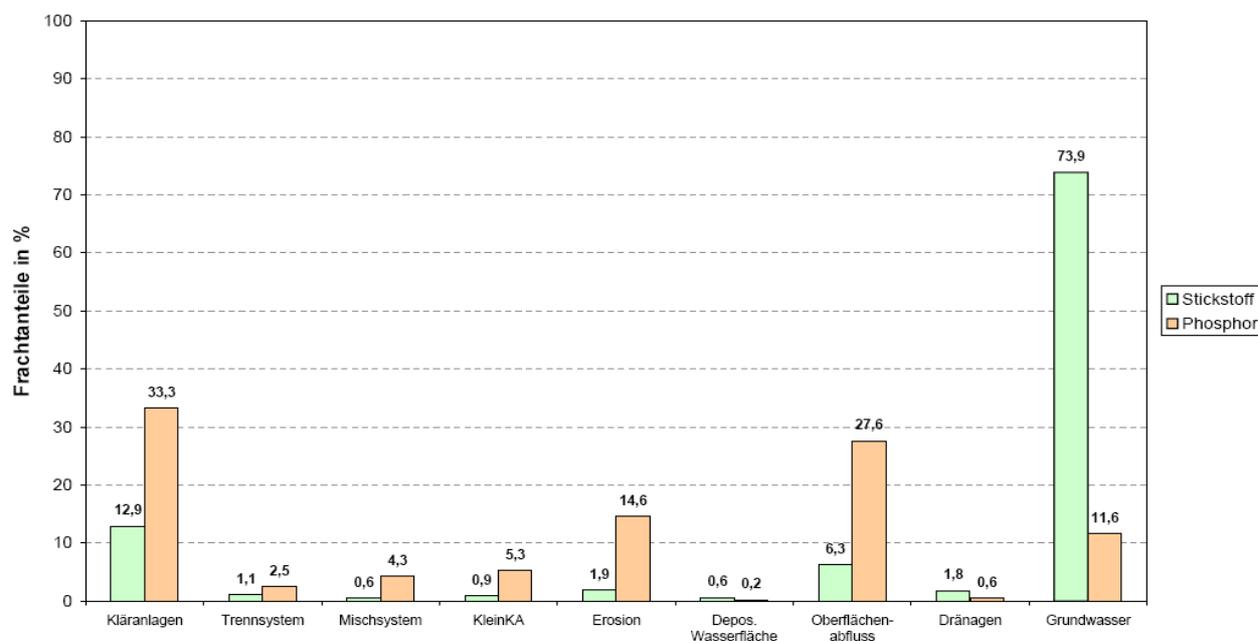


Abbildung 2: Mittlere Frachtanteile der verschiedenen Eintragspfade für Phosphor und Stickstoff in die oberirdischen Gewässer in Bayern

Bayer. Landesamt für Umwelt

### Frachtanteile im Betrachtungsraum 10901040402 (586,5 km<sup>2</sup>)



Referat 66, Dezember 2007

Abbildung 3: Frachtanteile der verschiedenen Eintragspfade für Phosphor und Stickstoff in die oberirdischen Gewässer im BTR 10901040402