



# DIFFUSE NÄHRSTOFF- EINTRÄGE IN GEWÄSSER

## SCHWEIZWEITE MODELLIERUNG DIFFUSER STICKSTOFF- UND PHOSPHOREINTRÄGE

Die Schweizer Gewässer werden nach wie vor mit Stickstoff- und Phosphoreinträgen belastet. Mit dem statistisch-empirischen Stoffflussmodell MODIFFUS wurden erstmals schweizweit alle diffusen Eintragspfade und -quellen im Hektarraster berechnet. Insgesamt gelangen pro Jahr rund 51 000 t Stickstoff, 3500 t Gesamt-Phosphor bzw. 900 t gelöster Phosphor über diffuse Quellen in die Gewässer der Schweiz.

Jens Hürdler, Agroscope

Ernst Spiess, Agroscope

Volker Prasuhn\*, Agroscope

### RÉSUMÉ

#### MODÉLISATION À L'ÉCHELLE SUISSE DES APPORTS DIFFUS D'AZOTE ET DE PHOSPHORE DANS LES EAUX SUPERFICIELLES ET SOUTERRAINES

Le modèle empirique et statistique des flux de matières Modiffus 3.0 a permis de modéliser pour la première fois à l'échelle Suisse les apports diffus d'azote et de phosphore dans les eaux superficielles et souterraines. Les principales sources d'apport (terres agricoles, prairies permanentes, pâturages, forêts, etc.) et les voies d'apport (érosion des sols, ruissellements, lessivages, drainages, etc.) ont été répertoriées. Une distinction a été faite entre apports naturels et pollution anthropique diffuse. Les calculs ont été effectués au moyen du SIG à l'échelle de l'hectare et peuvent être représentés pour une quantité ad libitum d'unités hydrologiques et administratives. Au total, ce sont 51 000 t d'azote, 3500 t de phosphore total et 900 t de phosphore dissous qui se déversent dans les eaux superficielles et souterraines de la Suisse. Pour ce qui est de l'azote, la pollution la plus importante provient du lessivage des terres agricoles. Pour le phosphore total, il s'agit de l'érosion naturelle des éboulis, des rochers et des glaciers et, pour le phosphore dissous, les ruissellements des prairies permanentes. Les principales zones de pertes importantes d'azote se situent sur le Plateau et dans les grandes vallées fluviales, sur des surfaces à cultures intensives (p. ex. cultures de légumes, de pommes de terre ou de maïs) ou drainées. Les principaux apports de phospho-

### EINLEITUNG

Viele unserer Gewässer unterliegen hohen stofflichen Belastungen, wie die Analyse der Daten der über 400 Oberflächengewässer- und über 500 Grundwasser-Messstellen des Bundes und der Kantone zur Beobachtung der Wasserqualität zeigen [1]. In Seen und Meeren verstärken hohe Konzentrationen von Nährstoffen wie Phosphor (P) und Stickstoff (N) das Algenwachstum und führen zu einer Eutrophierung. Eine negative Folge ist Sauerstoffmangel, der zu einer Abnahme der Biodiversität und letztlich zum Fischsterben führen kann. Weiterhin kann durch Nitrat im Grundwasser die Trinkwasserqualität beeinträchtigt werden. Die Einträge aus punktuellen Belastungsquellen (Kläranlagen und Regenüberläufe) wurden in den letzten Jahrzehnten stark reduziert [2], sodass den Einträgen aus diffusen Quellen (vor allem Landwirtschaft und natürliche Hintergrundlast, s. Box) vermehrt Bedeutung zukommt (Fig. 1).

Die grösstmögliche Vermeidung von anthropogenen Nährstoffeinträgen in die Gewässer ist zur nachhaltigen Sicherung der Nutz- und Schutzfunktionen dieser Ökosysteme eine zentrale Aufgabe. Diverse Anstrengungen werden in der Schweiz auf nationaler Ebene (Vollzug des vorsorglichen Gewässerschutzes, Ökologischer Leistungsnachweis, Finanzierung von Sanie-

\* Kontakt: volker.prasuhn@agroscope.admin.ch

## TITELBILD

Links Orthophoto: *Swissimage, swiss-topo* (Lizenz 5704001848)

Mitte Arealstatistik: *Bundesamt für Statistik (BFS), Geostat*

Rechts *Modiffus: diffuse Stickstoffeinträge in Gewässer*

rungsprojekten für P und N nach Artikel 62a Gewässerschutzgesetz, Umweltziele Landwirtschaft, Ausbau der Kläranlagen etc.) dazu unternommen. Da Fließgewässer keine Grenzen kennen und z. B. der Rhein in die Nordsee mündet, muss die Schweiz auch international ihren Beitrag leisten (Internationale Rheinschutzkommission IKSR, Oslo-Paris-Kommission zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks *Ospar*) [3]. Um eine Reduzierung der diffusen Stoffeinträge in die Gewässer planen und umsetzen zu können, sind detaillierte Kenntnisse über die Eintragsquellen und die Art der Eintragspfade sowie über die räumliche Verbreitung von Belastungsschwerpunkten (Hotspots) notwendig. Auf dieser Grundlage können politische Entscheide getroffen und bewirtschaftungsspezifische Massnahmen eingeleitet werden. Deren Umsetzung erfolgt dann auf einer anderen Massstabsebene (Betrieb bzw. Parzelle) durch die Landwirte, unterstützt durch die landwirtschaftliche Beratung.

In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl von methodischen Ansätzen zur Abschätzung diffuser Stoffeinträge in die Gewässer entwickelt, die sich bezüglich Vorgehen, Prognosegenauigkeit, Daten- und Rechenaufwand und Möglichkeiten der Differenzierung der verschiedenen Eintragspfade deutlich unterscheiden [4]. Messungen in Gewässern (Immissionsverfahren) erlauben keine direkte Zuordnung der Herkunft von Stoffen zu den verschiedenen Verursachern. Mesoskalige Emissionsverfahren werden daher für Berechnungen auf regionaler oder nationaler Ebene favorisiert, insbesondere wegen der Möglichkeit zur Ableitung räumlich differenzierter Bewirtschaftungsmassnahmen.

In der Schweiz wurde ein solches Stoffflussmodell erstmals 1990 für die internationale Berichterstattung an die IKSR eingesetzt [5]. Dieses Modell wurde permanent weiterentwickelt und in zahlreichen Gebieten verwendet (Einzugsgebiete von Rhein, Bodensee, Sempachersee, Greifensee, Zugersee, Birs; Kantone Bern und Zürich, Klettgau) [6, 7, 8]. Mit der heute vorliegenden, GIS-basierten Version *Modiffus 3.0* konnte erstmals eine schweizweite Berechnung durchgeführt werden [9]. Durch die neue Arealstatistik 2004/09 sowie diverse andere digitale Daten lagen gegenüber allen bisherigen Berechnungen auch neue Grundlagendaten vor. Mit *Moneris* [10], *Stoffbilanz* [11]

## DIFFUSE QUELLEN

Einträge durch Oberflächenabfluss (Abschwemmung und Erosion), Versickerung (Auswaschung, Drainageverluste) und direkte atmosphärische Deposition auf Gewässeroberflächen. Weiterhin landwirtschaftliche Direkteinträge, die beim Düngeraustrag, durch weidendes Vieh, von Hofplätzen etc. entstehen, sowie Direkteinträge durch Streu und Laub, Badebetrieb und Wasservögel (zusammengefasst als «Diverse Direkteinträge»).

## NATÜRLICHE HINTERGRUNDLAST

Sie umfasst die theoretische Berechnung der Stoffeinträge in die Gewässer, die ohne Einwirkungen des Menschen bei potenziell natürlicher Vegetation unvermeidlich entstehen würden. Als Landnutzung wurde im Modell *Modiffus* in der ganzen Schweiz bis zur Waldgrenze überall unbewirtschafteter Wald oder Moor angenommen und es gab keine anthropogene Luftverschmutzung. Alle über diese Grundfracht hinausgehenden Stoffeinträge sind anthropogenen Ursprungs und stellen das Potenzial für Reduktionsmassnahmen dar.

und *Stobimo* [12] liegen für Deutschland und Österreich dem in der Schweiz verwendeten Modell *Modiffus* vergleichbare Ansätze vor.

## MATERIAL UND METHODEN

Das statistisch-empirische Modell *Modiffus* (Modell zur Abschätzung diffuser Stoffeinträge in die Gewässer) ist ein mesoskaliges, d. h. ab ca. 50 km<sup>2</sup> Fläche sinnvoll einsetzbares Emissionsmodell. Es werden umfangreiche Naturraum- und Nutzungsinformationen digital aufbereitet und verknüpft. Grössenordnungen von Stoffverlagerungen werden aufgezeigt und räumliche Eintragungsschwerpunkte lokalisiert (gebiets-, nutzungs- und pfadbezogen). Den Gebietscharakteristika unterschiedlicher Naturräume wird dabei Rechnung getragen.

Die Berechnung der N- und P-Einträge aus diffusen Quellen in die Gewässer mit *Modiffus 3.0* erfolgte überwiegend mit dem Geoinformationssystem *ArcGIS 10.2*. Mit Hilfe einer Geodatenbankstruktur werden Eingangsdaten, Teilergebnisse und Endergebnisse differenziert bereitgehalten. In zwischengeschalteten, eigenständigen und anpassungsfähigen Berechnungs-

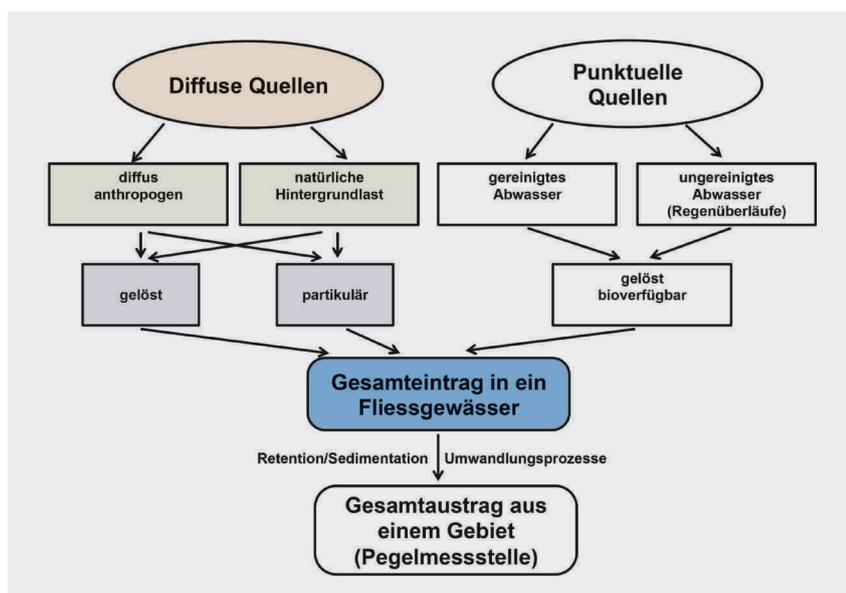


Fig. 1 Schematische Zuordnung der Nährstoffeinträge in die Gewässer nach Quellen. Farblich hinterlegt sind die Frachten, die mit dem Stoffflussmodell *Modiffus* berechnet wurden  
 Représentation graphique des apports d'éléments nutritifs dans les eaux superficielles et souterraines en fonction de leurs sources. Les charges calculées avec le modèle des flux de matières *Modiffus* apparaissent en surbrillance

modulen werden die Grundlagendatenraster mit verschiedenen Faktoren verrechnet. Durch dieses modulare Konzept besteht die Möglichkeit, auf Änderungen in

der landwirtschaftlichen Praxis, im Klima oder in gesetzlichen Vorgaben einzugehen (Szenarienberechnung). Grundlage aller Berechnungen bildete die Landnutzung

der Arealstatistik. Sie liegt im Hektarraster vor und wurde zu 16 Klassen aggregiert. Alle anderen Grundlagendaten wurden ins Hektarraster transformiert,

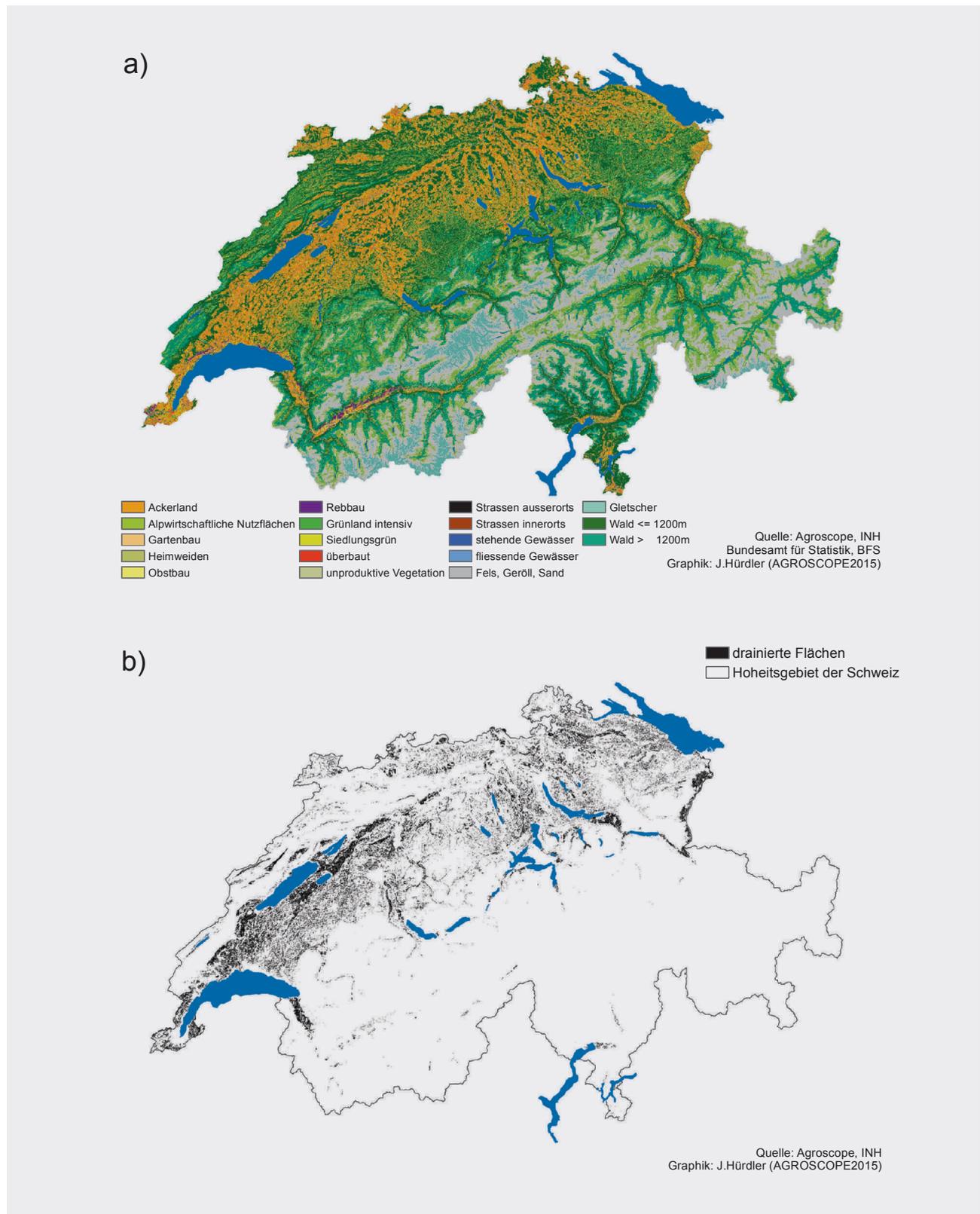


Fig. 2 Auswahl verschiedener Eingangsdaten der Modiffus-Berechnungen:

a) Landnutzung nach Arealstatistik aggregiert zu 16 Klassen; b) drainierte landwirtschaftliche Fläche

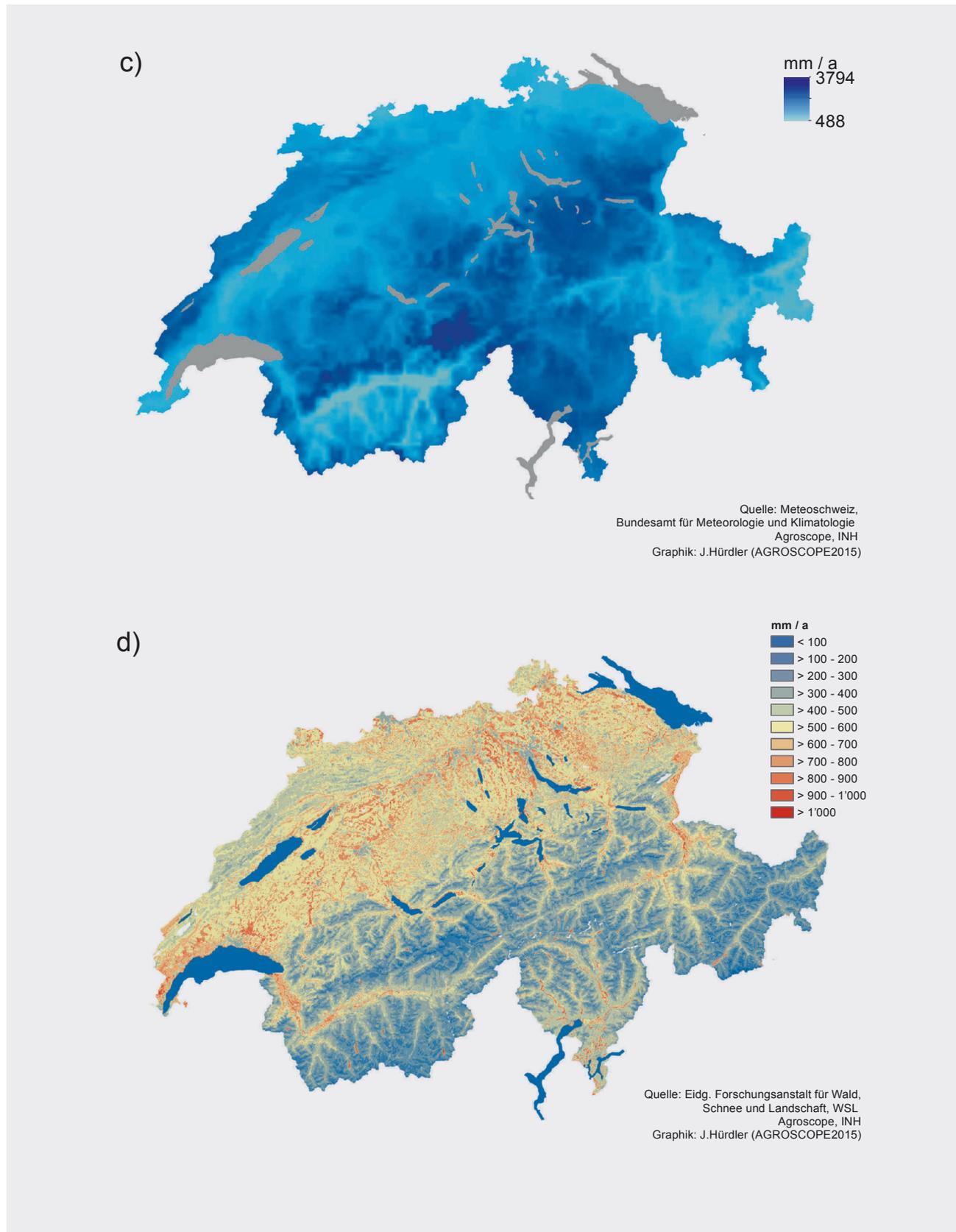
Sélection de différentes données d'entrée des calculs Modiffus:

a) exploitation des sols selon les statistiques de superficie classée en 16 catégories; b) surface agricole drainée

auch wenn sie feiner (z. B. Erosionsrisikokarte im 2-Meter-Raster) oder gröber (z. B. Bodenkarten als Polygone oder Hofdüngeranfall auf Gemeindeebene) auf-

gelöst vorlagen (Fig. 2). Die den Berechnungen der Wasser- und Stoffflüsse zugrundeliegenden Formeln, Algorithmen und Annahmen entsprechen in vielen Fällen den

bisherigen Berechnungen von *Modiffus* nach [7] und wurden nur dann verändert, wenn begründete neue Erkenntnisse oder neue Grundlagendaten (z. B. Erosionsri-



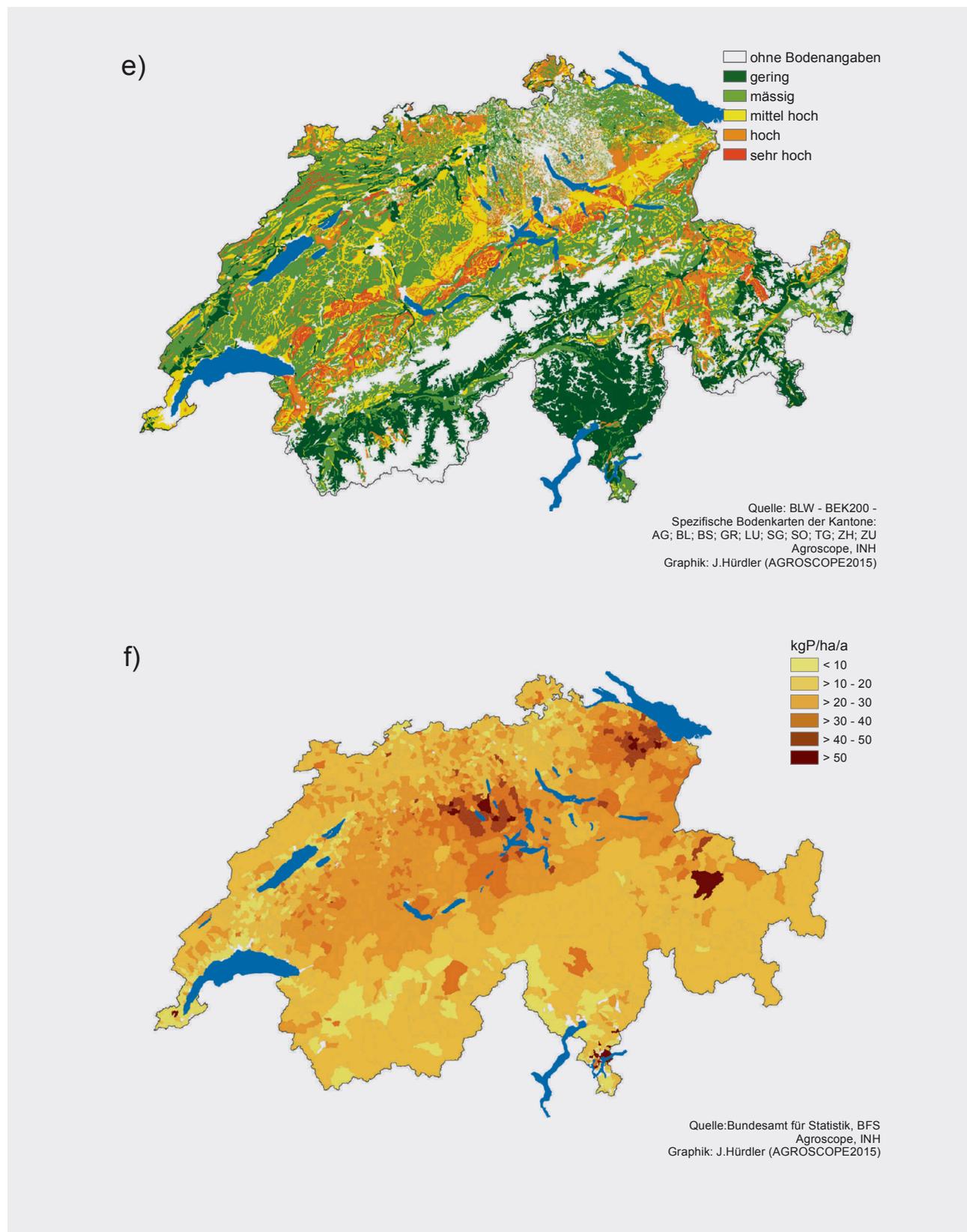
c) mittlerer Jahresniederschlag; d) mittlere Evapotranspiration  
c) précipitations annuelles moyennes; d) évapotranspiration moyenne

siko- und Gewässeranschlusskarte) dies notwendig machten.

In einem ersten Schritt werden die Wasserflüsse für jede Hektare berechnet.

Langjähriger mittlerer Niederschlag minus langjährige mittlere nutzungsspezifische Evapotranspiration ergibt die potenzielle Abflussmenge. Diese wird

in Oberflächenabfluss, Drainageabfluss und Sickerwasserabfluss aufgeteilt. Im zweiten Schritt werden mit *Modiffus* sieben verschiedene Eintragspfade bzw.

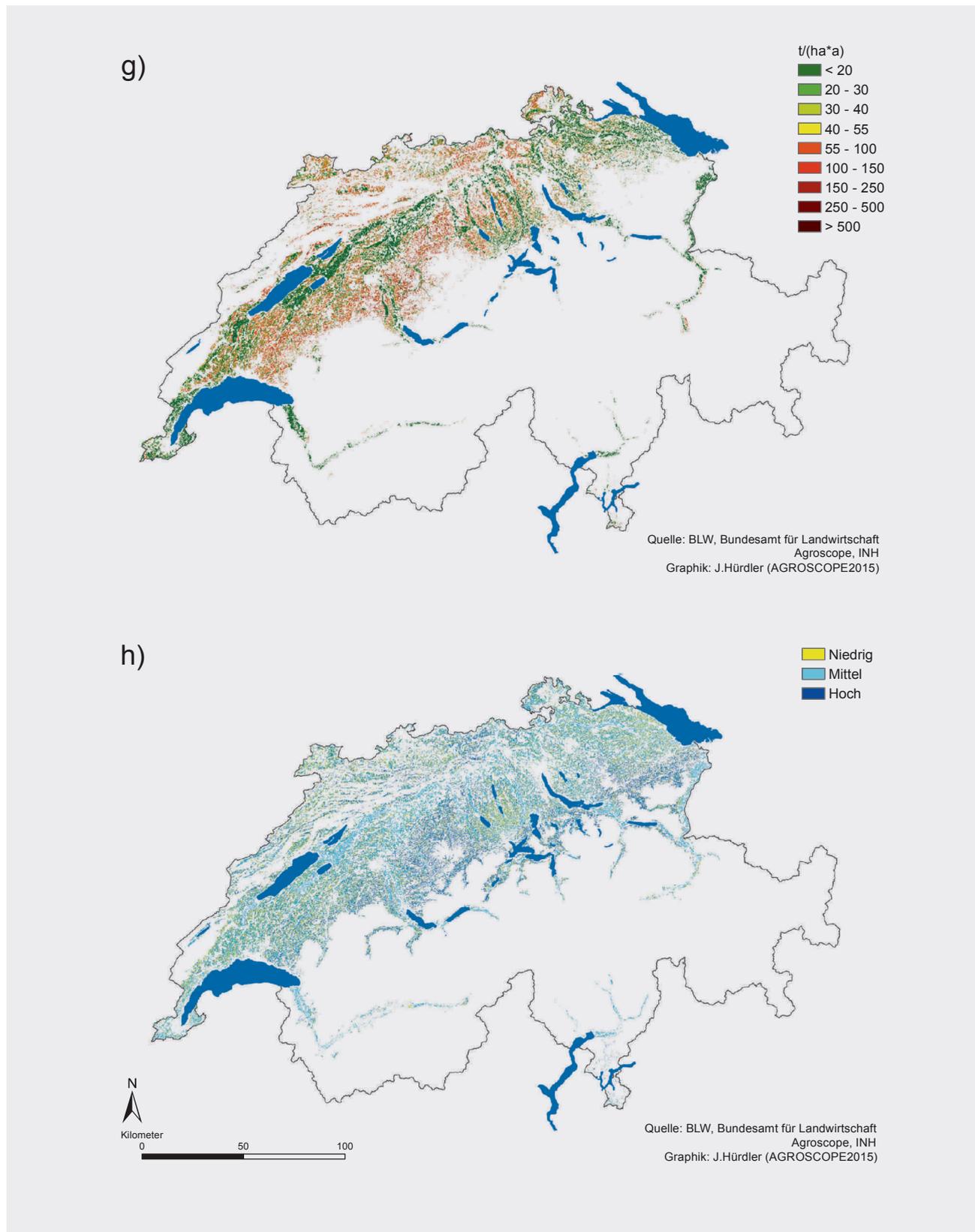


e) Abschwemmungsrisiko aufgrund von Bodeneigenschaften; f) Phosphoranfall aus Hofdüngern pro Gemeinde, bezogen auf die düngbare Fläche  
e) risque de ruissellements sur la base des propriétés des sols;  
f) quantité de phosphore due aux engrais de ferme, par commune, par rapport à la surface fertilisable

Prozesse für jede Landnutzung separat berechnet (Fig. 3): Abschwemmung gelöster Stoffe mit dem Oberflächenabfluss, Bodenerosion (= Transport partikulär ge-

bundener Stoffe mit dem Oberflächenabfluss auf Ackerflächen), sonstige Erosion (= Transport partikulär gebundener Stoffe über Verwitterung, Rutschungen,

Bachbetterosion etc.), Deposition von Stoffen auf die Gewässeroberflächen, diverse Direkteinträge (Laub- und Streueintrag, weidendes Vieh am Gewässer, Einträge



g) potenzielles Erosionsrisiko der Ackerflächen; h) Wahrscheinlichkeit des Gewässeranschlusses der landwirtschaftlich genutzten Fläche  
 g) risque potentiel d'érosion des surfaces agricoles;  
 h) probabilité de connexions de la surface agricole avec les eaux superficielles et souterraines

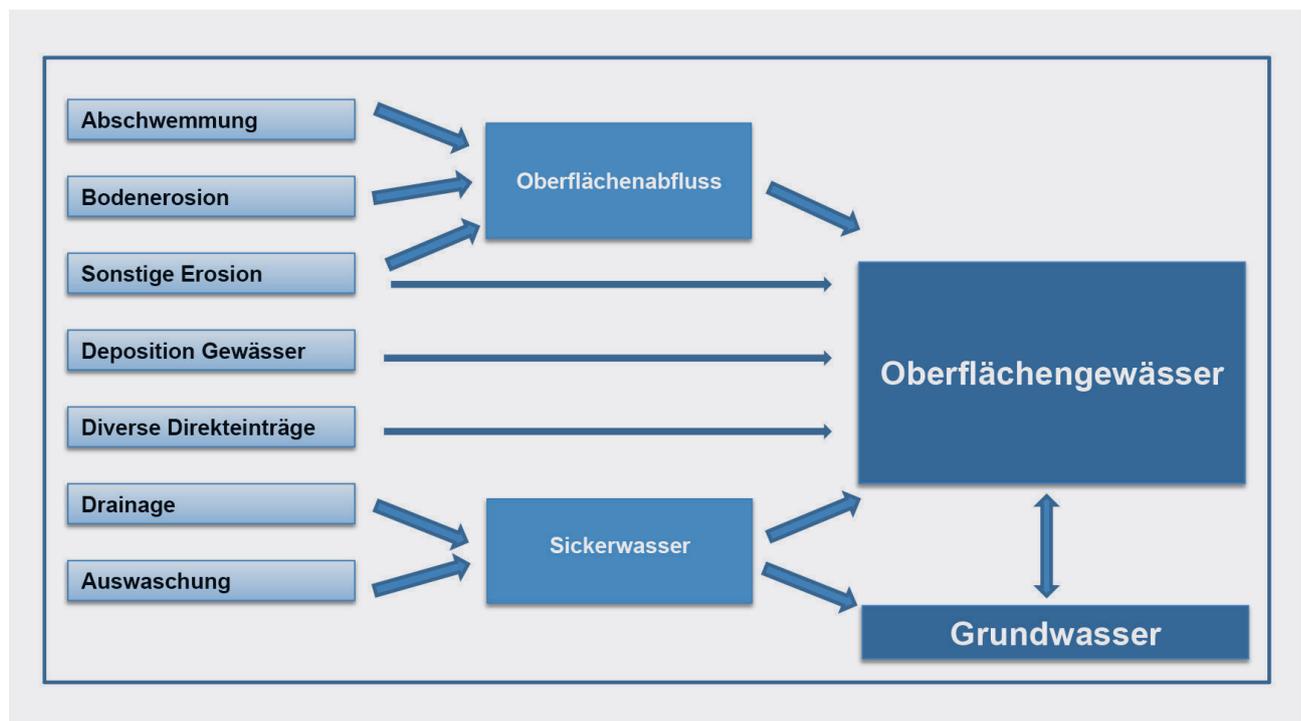


Fig. 3 Schema der mit dem Stoffflussmodell Modiffus berechneten diffusen Eintragspfade und Prozesse

Schéma des voies d'apport et processus diffus calculés avec le modèle des flux de matières Modiffus

von Hofflächen und durch Weidetrieb auf entwässerten Strassen etc.), Drainageverluste auf drainierten landwirtschaftlich genutzten Flächen, Auswaschung mit dem Sickerwasser aus dem Wurzelraum ins Grundwasser.

Die Berechnung der jeweiligen Stoffverluste erfolgte aufgrund von nutzungsspezifischen Ausgangswerten. Diese wurden aus Feldstudien (z. B. langjährige Lysimeterversuche, Gülle-Abschwemmungsversuche, Erosionsschadenskartierungen), Literaturrecherchen und mittels Expertenwissen festgelegt. Die Ausgangswerte wurden dann – je nach Pfad – mit unterschiedlichen Korrekturfaktoren für Differenzen in der Sickerwassermenge, der Höhenlage, des Bodens, der Hofdüngermenge, der Denitrifikation, des Erosionsrisikos etc. verrechnet. Beim Ackerland wurden für die Berechnung von Nitratauswaschung und Bodenerosion kulturspezifische Werte, die aus Betriebszählungsdaten pro Gemeinde vorlagen, verwendet. Ein detaillierter Methodenbeschreibung findet sich in [9].

Alle Ergebnisse gelten für mittlere klimatische Bedingungen um das Jahr 2010. Es wurden mehrjährige Durchschnittswerte für Niederschlag und Verdunstung angenommen; lokale oder regionale Extremereignisse wie Starkregen, Dürre oder Schneereichtum wurden nicht berücksichtigt. Landnutzung und agronomische

Daten beziehen sich – soweit dies möglich war – auf das Jahr 2010.

## ERGEBNISSE

### Stickstoffeintrag

Der berechnete Stickstoffeintrag über diffuse Eintragspfade in die Gewässer der Schweiz beträgt rund 51 000 t/Jahr bzw. 12 kg/ha/Jahr. Die räumliche Verteilung zeigt ein sehr differenziertes Bild (Fig. 4a). Während in den Alpen, den Voralpen und dem Jura die N-Einträge sehr niedrig sind (mit Ausnahme der grossen Täler), sind sie im Mittelland überwiegend hoch. Dabei kommen im westlichen Mittelland mehr bzw. grössere zusammenhängende Flächen mit hohen N-Einträgen vor als im östlichen Mittelland. Vor allem das Gebiet zwischen Bieler-, Neuenburger- und Murtensee zeichnet sich durch sehr hohe N-Einträge aus. Einen Ausschnitt aus der schweizweiten Karte zeigt Figur 5 mit dem Einzugsgebiet der Murg (Kt. TG, 214 km<sup>2</sup> Fläche). Figur 5a zeigt die diffusen Stickstoffeinträge aller Pfade und Landnutzungen, Figur 5b nur den Pfad Auswaschung und die Landnutzung Ackerland. Es ist deutlich zu erkennen, dass die hohen N-Einträge > 30 kg/ha/Jahr überwiegend aus der Auswaschung unter Ackerland resultieren und dass im Süden des Einzugsgebietes keine Ackerflächen existieren. Weiter-

hin zeichnet sich in der Mitte des oberen Einzugsgebietsteiles ein «Hotspot» mit sehr hohen N-Einträgen ab. Die Identifikation solcher «Hotspots» ist relevant bei einer möglichen Massnahmenplanung.

### Gesamt-Phosphoreintrag

Der berechnete Gesamt-Phosphoreintrag über diffuse Eintragspfade in die Gewässer der Schweiz beträgt rund 3500 t/Jahr bzw. 0,85 kg/ha/Jahr. Bei der räumlichen Verteilung fallen vor allem Teile der alpinen Gebiete und das Tessin auf (Fig. 4b). Für die vergletscherten Gebiete wurden sehr hohe Verwitterungs- bzw. Erosionsraten und damit verbundener partikulärer Phosphoraustrag angenommen. In Teilen der restlichen Alpen und der Voralpen sowie im Tessin wurden durch die Kombination von hohen ganzjährigen Niederschlägen und der vorherrschenden Landnutzungen «Fels, Geröll, Sand» und «unproduktive Vegetation» ebenfalls hohe partikulär gebundene P-Austräge angenommen. Im Wallis und Graubünden sind die partikulären P-Einträge dagegen überwiegend gering – mit Ausnahme der Gletscher –, bedingt durch die tiefen Niederschläge. Die Berechnungen für die alpinen Bereiche sind allerdings mit grossen Unsicherheiten behaftet. Darüber hinaus sind die partikulär gebundenen P-Einträge als natürliche Hintergrundlast und als kaum bioverfügbar

und somit nicht eutrophierungswirksam zu betrachten. Der Kartenausschnitt für das Einzugsgebiet der Murg (Fig. 5c) zeigt ein buntes Mosaik der Gesamt-P-Einträge mit einer generellen Zunahme Richtung Süden, bedingt vor allem durch die Zunahme der Niederschläge.

#### Gelöster Phosphoreintrag

Um ausschließlich die gelösten diffusen P-Einträge zu betrachten, wurden die Einträge aus den Eintragspfaden Bodenerosion und sonstige Erosion ausgeschlossen. Das Ergebnis zeichnet ein völlig anderes Bild (Fig. 4c). Der Schwerpunkt der gelösten P-Einträge liegt hier bei den Eintragsquellen Ackerland, Grasland und Heimweiden und die wichtigsten Eintragspfade sind Abschwemmung und Drainageverluste. Der voralpine Bereich ist durch erhöhte Niederschläge (Staulagen) gekennzeichnet, mit einer Zunahme in Richtung Osten. Dies führt zu erhöhter Abschwemmung. In Kombination mit einer intensiven Grasland- oder Weidebewirtschaftung kommt es zu erhöhten Verlusten von gelöstem P. Der berechnete gelöste Phosphoreintrag über diffuse Eintragspfade in die Gewässer der Schweiz beträgt rund 900t/Jahr bzw. 0,22 kg/ha/Jahr. Der Kartenausschnitt für das Einzugsgebiet der Murg (Fig. 5d) zeigt den Pfad «Abschwemmung für die Landnutzung Grasland». Auch hier ist eine deutliche Zunahme der gelösten P-Einträge im Süden des Einzugsgebiets zu erkennen.

#### EINTRAGSQUELLEN UND EINTRAGSPFADE

Die Anteile der verschiedenen Eintragsquellen und -pfade unterscheiden sich je nach Stoff stark (Fig. 6): Beim Stickstoff weist das Ackerland mit 38% den höchsten Anteil am gesamten N-Eintrag auf (Fig. 6a). Es verzeichnet mit 48 kg N/ha/Jahr auch die höchsten mittleren flächenspezifischen N-Einträge (Tab. 1), gefolgt von Gartenbau (42 kg N/ha/Jahr) und Rebbau (33 kg N/ha/Jahr). Aufgrund deren geringen flächenmässigen Verbreitung ist ihr Einfluss auf die Gewässerbelastung aber gering. Waldflächen tragen zu 14% zu den N-Einträgen bei, obwohl die mittleren flächenspezifischen Einträge gering sind (6 kg N/ha/Jahr). Der Flächenanteil von Wald ist aber sehr hoch. Beim Gesamt-Phosphor trägt die Landnutzungskategorie «Geröll, Sand, Fels, Gletscher» mit 41% am stärksten zu den P-Einträgen bei. Die grossen Waldflächen haben mit 17% ebenfalls einen grossen Anteil, trotz geringer flächenspezifischer

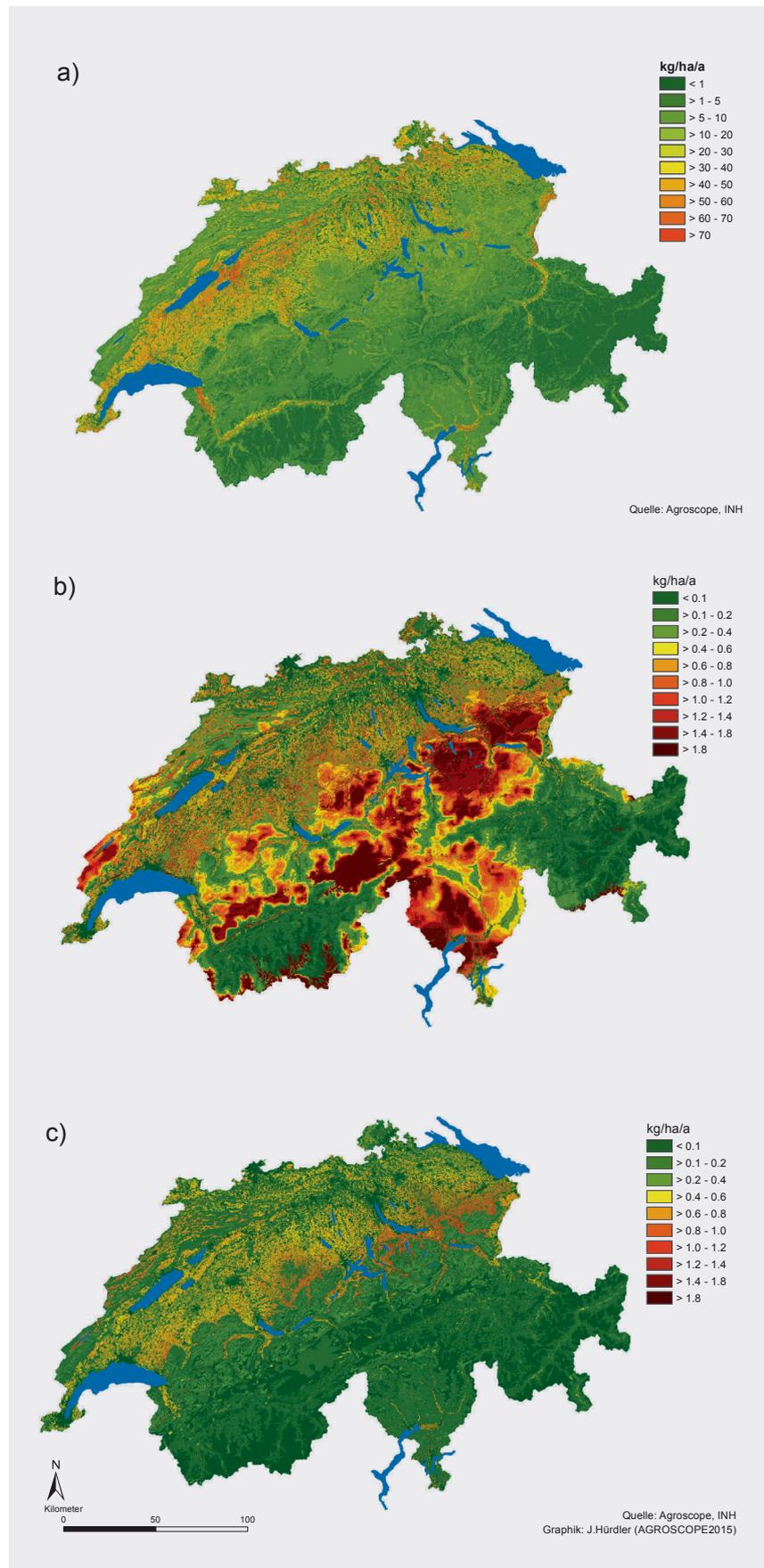


Fig. 4 Karten der modellierten Stoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer der Schweiz im Hektarraster: a) Stickstoff; b) Gesamt-Phosphor; c) gelöster Phosphor  
 Cartes des apports modélisés de substances, à partir de sources diffuses, dans les eaux superficielles et souterraines suisses, à l'échelle hectométrique:  
 a) azote; b) phosphore total; c) phosphore dissous

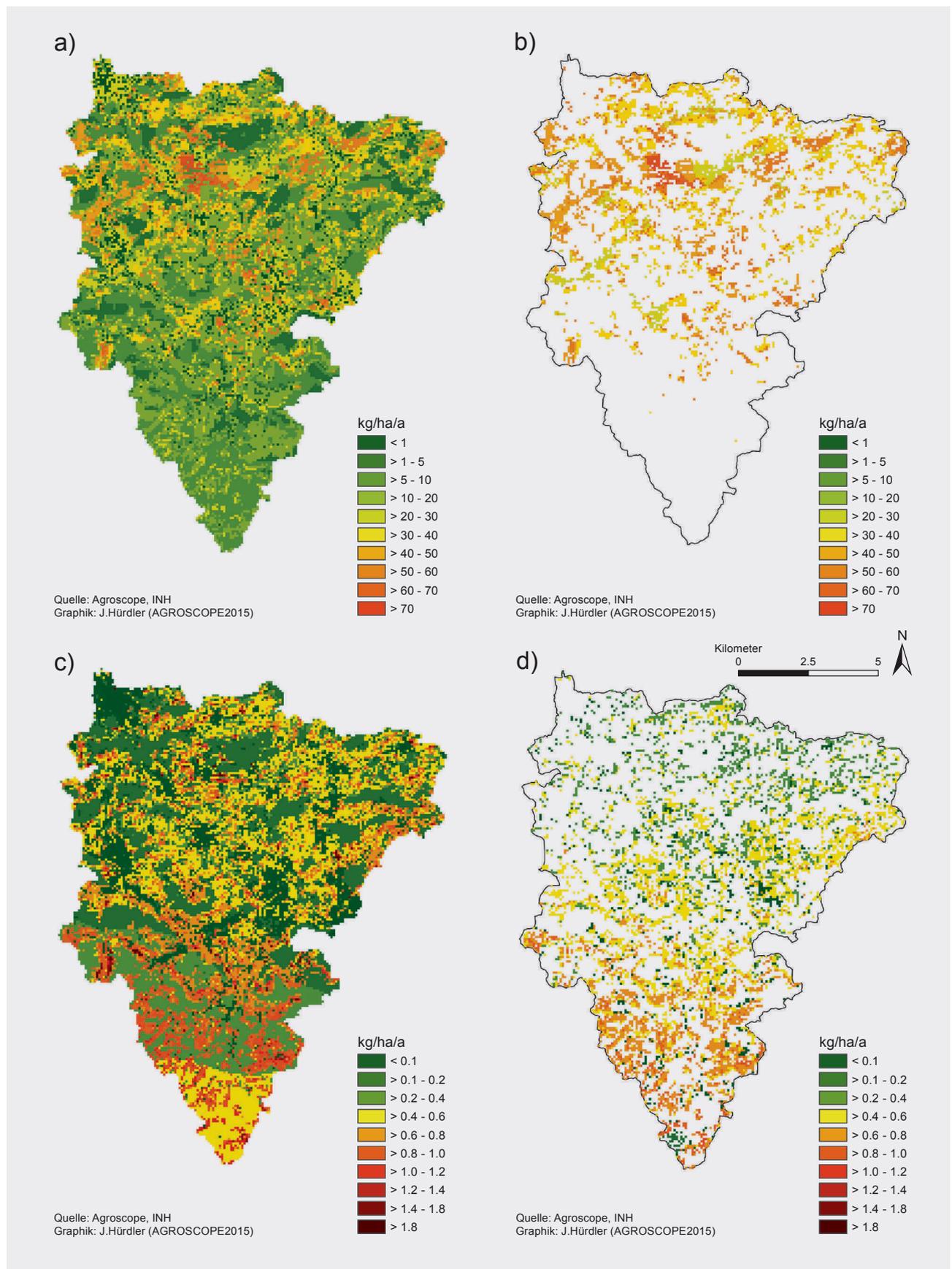


Fig. 5 Ausschnitt aus den Karten der diffusen Stoffeinträge in die Gewässer, Einzugsgebiet der Murg (TG): a) Stickstoff, alle Pfade und Nutzungen; b) Stickstoffauswaschung unter Ackerland; c) Gesamt-Phosphor, alle Pfade und Nutzungen; d) Phosphorabschwemmung von Grasland  
 Cartes des apports diffus de substances dans les eaux superficielles et souterraines, bassin versant de la Murg (TG):  
 a) azote, toutes voies et utilisations confondues; b) lessivage de l'azote dans les terres agricoles; c) phosphore total, toutes voies et utilisations confondues; d) ruissellements de phosphore dans les pâturages

Einträge (Tab. 1). Beim gelösten Phosphor ergibt sich ein anderes Bild. Ackerland trägt zu 22% zu den Verlusten bei, die Graslandkategorien «Dauergrünland, Heimweiden, Alpwirtschaftliche Nutzflächen und Obstbau» zusammen 45% und der Wald 16%. Unter Heimweiden finden die grössten flächenspezifischen Verluste statt (Tab. 1).

Bei den Eintragungspfaden dominiert beim Stickstoff die Auswaschung aus dem Wurzelraum Richtung Grundwasser mit 65% eindeutig. Drainageverluste ins Oberflächengewässer sind mit 16% ebenfalls von Bedeutung (Fig. 6b). Beim Gesamt-Phosphor stellt die sonstige Erosion mit 69% den dominanten Eintragungspfad dar.

Beim gelösten Phosphor dominieren mit 47% die Einträge über Abschwemmung. Die Auswaschung ist mit 25% ebenfalls wichtig.

Die natürliche Hintergrundbelastung beträgt bei den diffusen Stickstoffeinträgen in die Gewässer rund 18 000 t N/Jahr bzw. 35%, d. h. 65% der Einträge sind anthropogenen Ursprungs (Fig. 7). Bei diesen rund 33 000 t N/Jahr besteht ein beträchtliches Reduktionspotenzial durch angepasste Massnahmen. Beim Gesamt-Phosphor überwiegt die natürliche Hintergrundlast mit 71% bzw. rund 2500 t P/Jahr deutlich, bedingt durch die hohen partikulären Einträge aus der sonstigen Erosion von Fels und Gletschern. Beim gelösten Phosphor

beträgt die natürliche Hintergrundlast dagegen nur rund ein Drittel. Rund 600 t P/Jahr bzw. zwei Drittel sind diffus anthropogenen Ursprungs und lassen sich durch Massnahmen vermindern.

**STOFFEINTRÄGE PRO KANTON**

Die Modellstruktur von Modiffus erlaubt es, die Ergebnisse für beliebige hydrologische oder administrative Einheiten zusammenzustellen. Figur 8 zeigt die absoluten und flächenspezifischen Stickstoff- und Phosphoreinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer der einzelnen Kantone. Bei Betrachtung der flächenspezifischen diffusen N-Verluste zeigen die Kantone GE, AG, TG und FR mit Werten

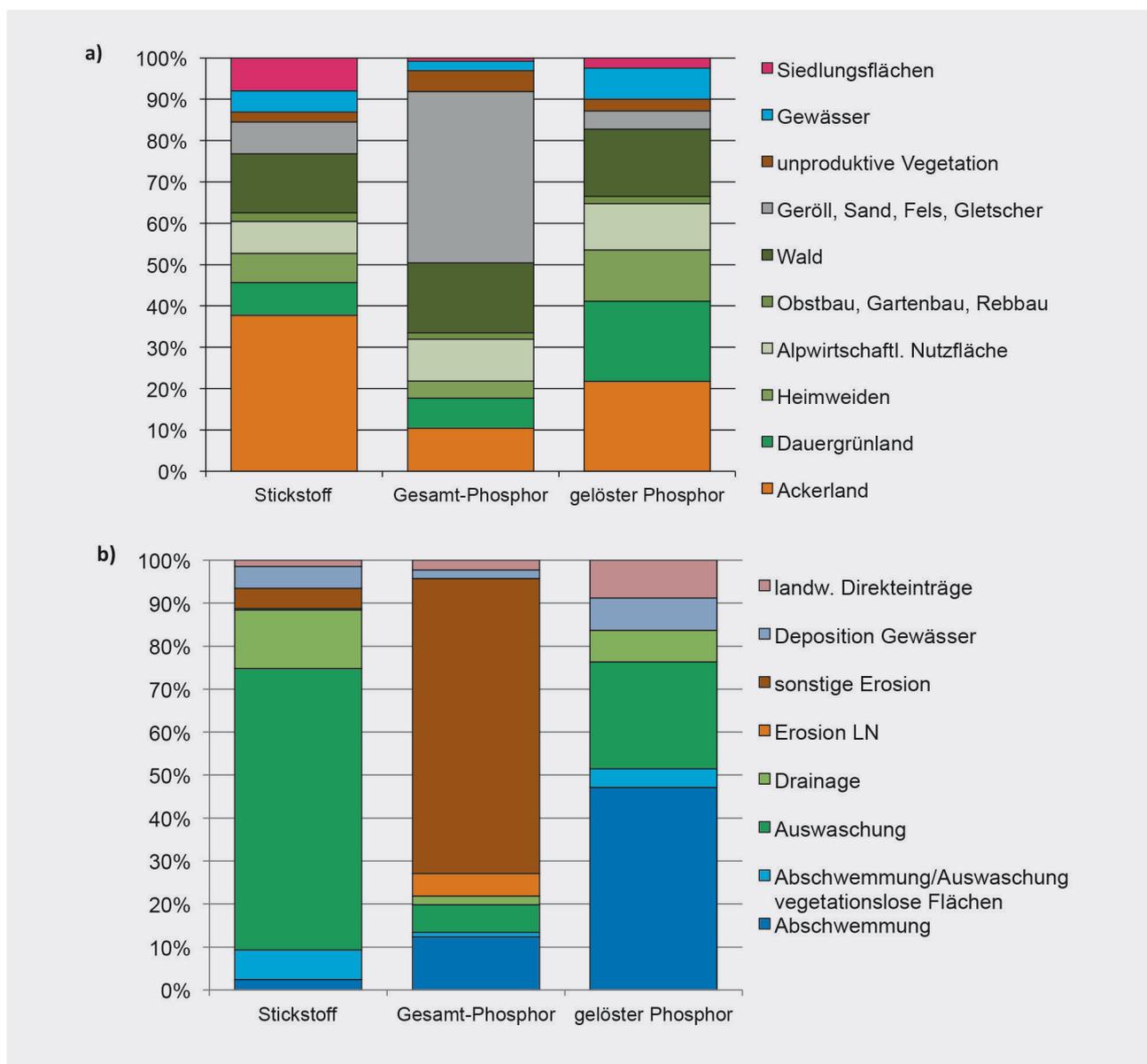


Fig. 6 Prozentuale Aufteilung der diffusen Stoffeinträge in die Gewässer der Schweiz nach:

a) Quellen (Landnutzungskategorien); b) Eintragungspfaden (Prozesse)

Répartition en pourcentage des apports diffus d'azote, de phosphore total et de phosphore dissous dans les eaux superficielles et souterraines suisses en fonction des: a) sources (catégories d'exploitation des sols); b) voies d'apport (processus)

Landnutzung	Stickstoff		Gesamt-Phosphor		Gelöster Phosphor	
	(t)	(kg/ha)	(t)	(kg/ha)	(t)	(kg/ha)
Ackerland	19449	48	364	0,90	198	0,49
Dauergrünland	4044	12	255	0,75	176	0,52
Heimweiden	3664	22	142	0,85	112	0,67
Alpwirtschaftliche Nutzfläche	3964	8	355	0,69	102	0,20
Obstbau, Gartenbau, Rebbau	1087	21	55	1,07	16	0,32
Wald	7356	6	588	0,45	148	0,11
Geröll, Sand, Fels, Gletscher	3983	7	1447	2,50	40	0,07
Unproduktive Vegetation	1221	4	177	0,60	26	0,09
Gewässer	2653	15	79	0,45	69	0,39
Siedlungsflächen	4072	21	27	0,14	22	0,11

Tab. 1 Absolute und flächenspezifische Stoffeinträge nach 10 Landnutzungskategorien für N, Gesamt-P und gelösten P

Apports de substances absolus et spécifiques aux surfaces réparties en 10 catégories d'exploitation des sols pour N, P total et P dissous

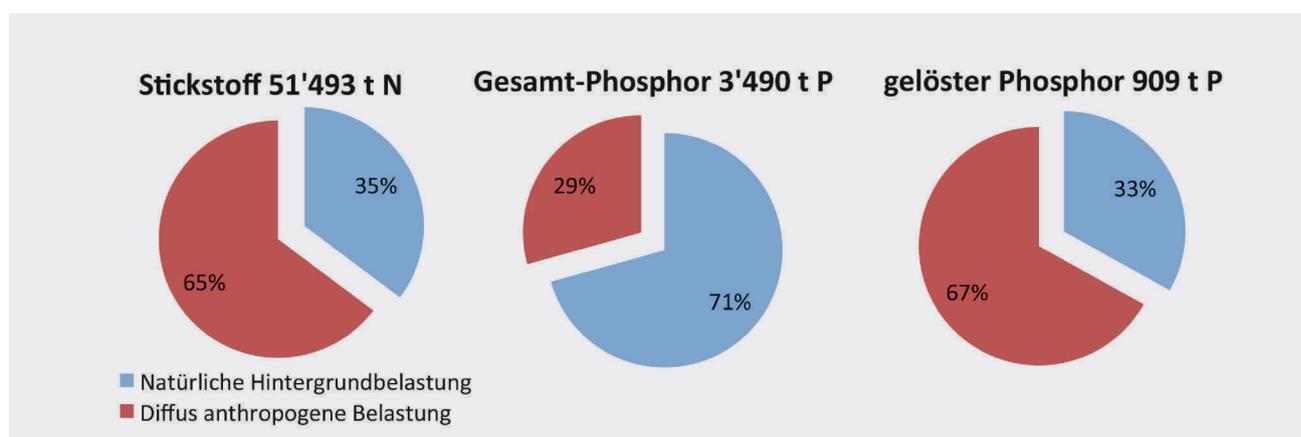


Fig. 7 Prozentuale Aufteilung diffuser Stoffeinträge in die Gewässer der Schweiz nach natürlicher Hintergrundbelastung und diffus anthropogener Belastung für Stickstoff, Gesamt-Phosphor und gelösten Phosphor

Répartition en pourcentage des apports diffus d'azote, de phosphore total et de phosphore dissous dans les eaux superficielles et souterraines suisses en fonction des apports naturels et de la pollution anthropique diffuse

von über 20 kg/ha/Jahr die höchsten, die Kantone GR, VS und UR mit < 10 kg/ha/Jahr die niedrigsten Verluste (Fig. 8a). Die höchsten absoluten N-Einträge stammen aus den Kantonen BE (17% der totalen diffusen Einträge der Schweiz) und VD (12%); beides grosse Kantone mit vielen Ackerflächen. Die ebenfalls intensiv landwirtschaftlich genutzten Mittellandkantone ZH, LU, AG, FR und TG tragen jeweils mit 5–7% zu den diffusen N-Einträgen bei. Die Innerschweizer Kantone haben dagegen mit jeweils ≤ 1% sehr geringe Anteile an den diffusen N-Einträgen.

Bei den diffusen Gesamt-P-Einträgen ist der Kanton VS mit 25% der schweizweiten Einträge sowohl absolut als auch flächenspezifisch der grösste Emittent (Fig. 8b). Da der Kanton einen grossen Flächenanteil unproduktiver Flächen wie Gletscher und Fels aufweist, gelangen grosse Mengen erodierten Materials mit partikulär gebundenem P (874 t) in die Gewässer.

Die Kantone BE (16%), TI (9%) und GR (9%) liefern ebenfalls grosse diffuse Gesamt-P-Frachten, da sie auch über viele unproduktive Flächen mit hoher natürlicher Erosion verfügen.

Bei den diffusen gelösten P-Einträgen ist der Kanton BE mit 17% der schweizweiten Einträge aufgrund seiner Grösse und einer Vielzahl von Flächen unter Grünlandbewirtschaftung der grösste Emittent (Fig. 8c), gefolgt von weiteren flächenmässig grossen Kantonen wie VD (10%), GR (9%) und SG (8%). Bei den flächenspezifischen diffusen Einträgen an gelöstem Phosphor zeigen die Kantone AR, AI, ZG, LU, SG, SZ, FR und NE mit Werten über 0,3 kg/ha/Jahr die höchsten Verluste. In diesen Kantonen bestimmt eine intensive Graslandbewirtschaftung die Landnutzung und führt durch die Kombination mit hohen Niederschlägen zu den grossen Verlusten. Die niedrigsten flächenspezifischen Verluste mit < 0,2 kg/

ha/Jahr findet man in den Kantonen BS, VS, GR, UR, TI und SH.

## FAZIT UND AUSBLICK

Mit dem Stoffflussmodell *Modiffus* konnte erstmals für die gesamte Schweiz eine Abschätzung der Stickstoff- und Phosphoreinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer auf Hektarrasterebene durchgeführt werden. Die Resultate können für nationale Stoffflussanalysen [13, 14], die internationale Berichterstattung (IKSR, Europäische Umweltagentur), aber auch für kantonale oder regionale Studien genutzt werden, da Auswertungen für beliebige hydrologische oder administrative Einheiten gemacht werden können.

Neben Zahlen zu absoluten Stoffeinträgen in Tonnen pro Jahr und zu flächenspezifischen Einträgen in Kilogramm pro Hektare und Jahr erlauben die Berechnungen mit *Modiffus* auch eine Analyse der

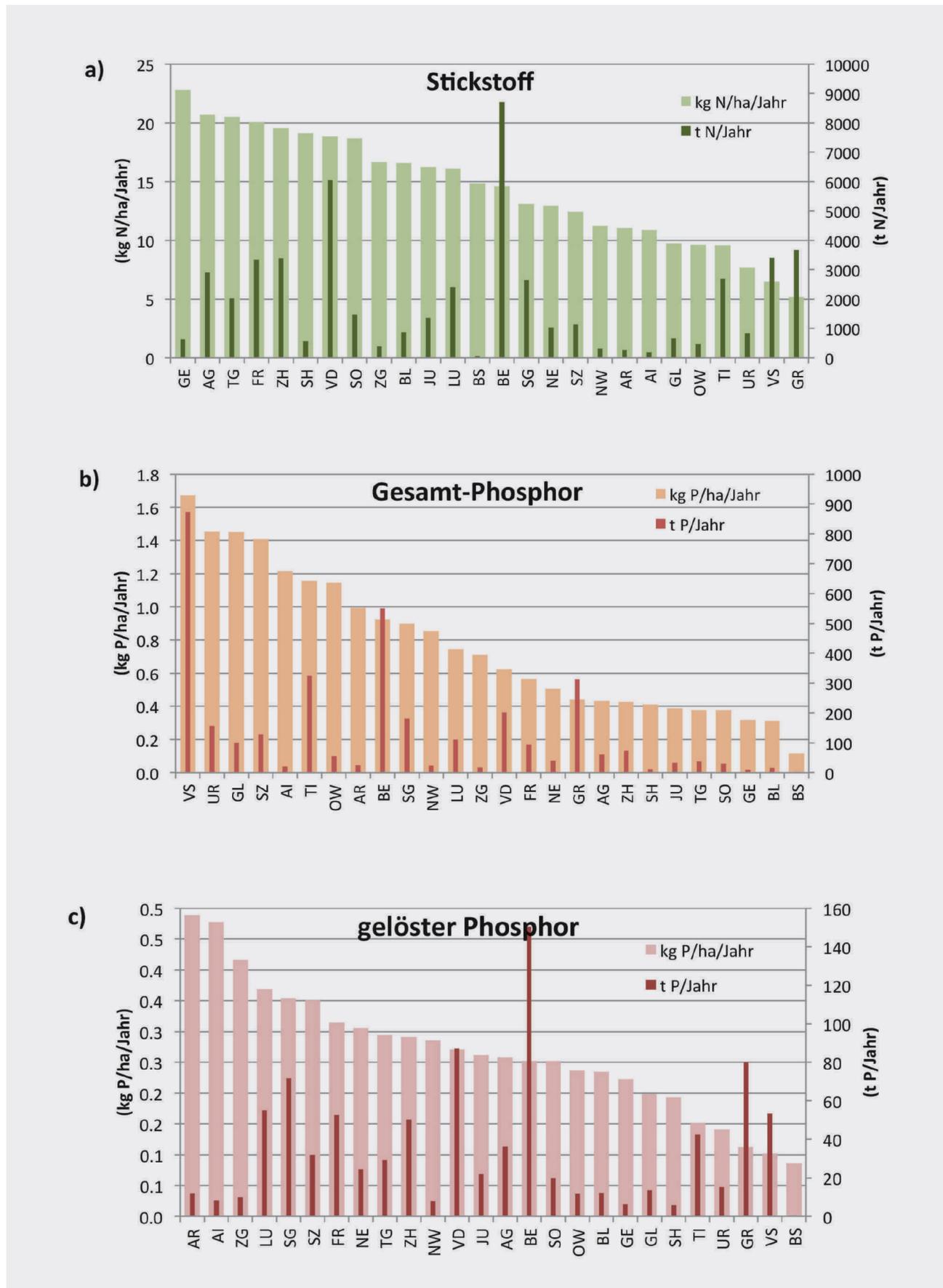


Fig. 8 Absolute und flächenspezifische diffuse Stoffeinträge in die Gewässer der Schweiz pro Kanton, sortiert nach der Höhe der flächenspezifischen Einträge: a) Stickstoff; b) Gesamt-Phosphor; c) gelöster Phosphor

Apports de substances absolus et spécifiques aux surfaces dans les eaux superficielles et souterraines suisses par canton et classés en fonction de l'importance des apports spécifiques aux surfaces: a) azote; b) phosphore total; c) phosphore dissous

**DANKSAGUNG**

Die Autoren bedanken sich für den Auftrag, die finanzielle Unterstützung und das kritische Durchlesen des Manuskriptes beim BAFU sowie für die GIS-Unterstützung bei Erich Szerencsits und Jonas Winizki (beide Agroscope).

wichtigsten Eintragsquellen (Ackerland, Dauergrünland, Weiden, Wald etc.) und Eintragspfade (Erosion, Abschwemmung, Auswaschung etc.). Weiterhin kann zwischen natürlicher Hintergrundlast und diffus anthropogener Belastung unterschieden werden. Letztlich können alle Ergebnisse räumlich im Hektarraster in Form von Karten dargestellt werden. Die Visualisierung ermöglicht es, Belastungsschwerpunkte zu erkennen. Dies ist sehr wichtig im Hinblick auf Massnahmen und mögliche neue Massnahmenansätze, z. B. im Zusammenhang mit dem Vollzug von Art. 47 GSchV.

Da es sich um eine Emissionsbetrachtung handelt, ist ein Vergleich mit an Pegeln gemessenen Stofffrachten (Immissionsbetrachtung) schwierig. Im Gewässer verändern Umwandlungs- und Rückhaltprozesse, In- und Exfiltrationen sowie Wasserentnahmen und anthropogene Zu- und Ableitungen die Stofffrachten. Vor allem Seen führen zu hohen Sedimentationsmengen. Daher sind die berechneten Stoffeinträge in der Regel höher als die gemessenen Stoffausträge am Pegel. Dies gilt besonders für den partikulär gebundenen Phosphor. Weiterhin stellen die an Pegeln gemessenen Stofffrachten die Summe von diffusen und punktuellen Quellen dar.

Beim Stickstoff überwiegen die berechneten diffusen Einträge in die Gewässer der Schweiz mit 68% der totalen N-Einträge gegenüber den geschätzten punktuellen Einträgen aus Kläranlagen und Regenüberläufen (32%) deutlich. Allerdings sind 35% der diffusen N-Einträge natürliche Hintergrundlast. Somit verbleiben rund 33 000 t/Jahr diffus anthropogene N-Einträge.

Auch beim Gesamt-Phosphor stammt mit 79% der totalen P-Einträge der überwiegende Anteil aus diffusen Quellen, nur 21% resultieren aus punktuellen Quellen. Der grösste Teil der diffusen Einträge ist allerdings natürliche Hintergrundlast (71%); nur rund 1000 t P/Jahr sind diffus anthropogene Belastung. Für den

gelösten bzw. bioverfügbaren Phosphor zeigt sich dagegen ein anderes Bild. Hier tragen die diffusen Quellen mit 49% zu einem geringeren Anteil zur totalen Gewässerbelastung bei, 51% stammen aus punktuellen Quellen. Da 33% der gelösten diffusen P-Einträge natürliche Hintergrundlast sind, verbleiben rund 600 t P/Jahr diffus anthropogene Belastung.

Für die Berechnung der Wirkung von Massnahmen zur Verminderung der diffusen Stoffeinträge bildet die diffus anthropogene Belastung die Ausgangsbasis. *Modiffus 3.0* bietet dazu durch den modularen Aufbau eine gute Modellierungsplattform. Durch die gezielte und begründete Beeinflussung verschiedener Parameter im Modell kann die Wirkung von Massnahmen in der Landwirtschaft simuliert und deren Effekt auf einer nationalen Betrachtungsebene abgeschätzt werden. Hierzu werden zurzeit verschiedene Berechnungsszenarien entwickelt. Einerseits kann die Landnutzung im Modell gezielt verändert werden (z. B. Umwandlung von Ackerland in Grasland oder ökologische Ausgleichsflächen). Daraus resultieren andere Wasser- und Stoffflüsse. Andererseits können agronomische Massnahmen auf der jeweiligen Fläche wie z. B. Zunahme von konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren im Ackerbau, Verzicht oder Einschränkung des Kartoffel- und Gemüseanbaus auf erosions- und auswaschungsgefährdeten Standorten oder Extensivierung im Futterbau berücksichtigt und deren Auswirkungen auf die Stofftransporte über Erosion, Abschwemmung und Auswaschung berechnet werden.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] BAFU: Wasserqualität Flüsse, [www.bafu.admin.ch/gewaesserschutz/01267/01269/01270/index.html?lang=de](http://www.bafu.admin.ch/gewaesserschutz/01267/01269/01270/index.html?lang=de) und Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA, [www.bafu.admin.ch/grundwasser/07498/index.html?lang=de](http://www.bafu.admin.ch/grundwasser/07498/index.html?lang=de)
- [2] Prasuhn V.; Sieber U. (2005): Changes in diffuse phosphorus and nitrogen inputs into surface waters in the Rhine watershed in Switzerland. *Aquatic Science* 67, 363–371
- [3] Sieber, U. (2003): Internationale Umweltabkommen und nationales Umweltrecht zur Begrenzung von Stickstoffeinträgen in die Gewässer. *Schriftenreihe der FAL* 43, Zürich, 30–34
- [4] Kronvang, B. et al. (2007): Phosphorus losses at the catchment scale within Europe: an overview. *Soil Use and Management* 23, 104–116
- [5] Braun, M. et al. (1991): Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die

Gewässer im Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der Seen (Stand 1986). *Interner Bericht FAC Liebefeld und BUWAL Bern*, 87 S.

- [6] Prasuhn, V. (1999): Phosphor und Stickstoff aus diffusen Quellen im Einzugsgebiet des Bodensees 1996/97. *Bericht Internationale Gewässerschutzkommission Bodensee (IGKB) Nr. 51*, 84 S.
- [7] Prasuhn, V.; Mohni, R. (2003): GIS-gestützte Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern. *Bericht z.H. Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft Kanton Bern (GSA)*, 223 S.
- [8] Schmid, C.; Prasuhn, V. (2000): GIS-gestützte Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Zürich. *Schriftenreihe der FAL* 35, Zürich, 114 S.
- [9] Hürdler, J. et al. (2015): Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Oberflächengewässer der Schweiz. *Modiffus 3.0. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt. Agroscope, Zürich*, 115 S.
- [10] Fuchs, S. et al. (2010): Berechnung von Stoffeinträgen in die Fließgewässer Deutschlands mit dem Modell Moneris. *Nährstoffe, Schwermetalle und Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe. UBA-Texte* 45/2010, 177 S.
- [11] Gebel, M. et al. (2012): Stoffbilanz. *Modellerläuterung. Gesellschaft für Angewandte Landschaftsforschung bR (GALF), Dresden*, 63 S.
- [12] Zessner, M. et al. (2011): Stoffbilanzmodellierung für Nährstoffe auf Einzugsgebietsebene als Grundlage für Bewirtschaftungspläne und Massnahmenprogramme (Stobimo-Nährstoffe). *Endbericht, Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft der TU Wien in Zusammenarbeit mit dem Umweltbundesamt Wien. Wien*, 190 S.
- [13] Heldstab, J. et al. (2010): Stickstoffflüsse in der Schweiz. *Stoffflussanalyse für das Jahr 2005. Umwelt-Wissen Nr. 1018, Bundesamt für Umwelt, Bern*. 128 S.
- [14] Binder C.R. et al. (2009): Phosphorflüsse der Schweiz. *Stand, Risiken und Handlungsoptionen. Bundesamt für Umwelt, Bern*. 161 S.

**> SUITE DU RÉSUMÉ**

re dissous se trouvent dans la région des Préalpes riche en pâturages et en animaux. On constate une nette augmentation des apports de phosphore dissous d'ouest en est. Les apports moyens spécifiques aux différentes surfaces s'élèvent à l'échelle de la Suisse à 12 kg/ha d'azote, 0,85 kg/ha de phosphore total et 0,22 kg/ha de phosphore dissous, avec de notables différences régionales et de l'exploitation des sols. Des calculs sur les impacts de différentes mesures sont en cours.