



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Agroscope
Forschungsbereich Umweltressourcen und Landwirtschaft

Jens Hürdler, Volker Prasuhn, Ernst Spiess | Juli 2015

Bericht | Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Gewässer der Schweiz

MODIFFUS 3.0

Auftraggeber:

Bundesamt für Umwelt BAFU, 3003 Bern

Auftragnehmer:

Agroscope
Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften (INH), Reckenholzstrasse 191
8046 Zürich

Autoren:

Jens Hürdler
Volker Prasuhn
Ernst Spiess

Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhalt

1	Einleitung.....	12
1.1	Ausgangslage.....	12
1.2	Zielsetzung und Problemstellung	12
1.3	Generelle Aussagekraft und Genauigkeit der Erhebungen	13
1.4	Definitionen.....	14
2	Methoden.....	15
2.1	Grundlagendaten.....	16
2.1.1	Landnutzung.....	16
2.1.2	Einzugsgebiete	20
2.1.3	Gewässernetz.....	20
2.1.4	Abfluss-, Schwebstoff- und Gütemessdaten	20
2.1.5	Klimadaten.....	20
2.1.6	Stickstoffdeposition.....	24
2.1.7	Drainage	26
2.1.8	Bodeneigenschaften.....	32
2.1.9	Erosionsrisikokarte ERK2.....	36
2.1.10	Gewässeranschlusskarte (GAK2)	38
2.1.11	Phosphor- und Stickstoffanfall in Hofdüngern	40
2.1.12	Daten zu Abwasserreinigungsanlagen (ARA) und Regenüberläufen	43
2.2	Berechnung mit MODIFFUS 3.0	43
2.2.1	Modellkonzept	43
2.2.2	Berechnung der Wasserflüsse	45
2.2.3	Berechnung der Stoffflüsse	49
3	Ergebnisse.....	66
3.1	Wasserflüsse	66
3.2	Gesamt-Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen für die Schweiz	70
3.3	Phosphoreinträge aus diffusen Quellen für die Schweiz.....	75
3.3.1	Gesamt-Phosphor	75
3.3.2	Gelöster Phosphor.....	78
3.4	REZGUS (Rheineinzugsgebiet unterhalb der grossen Seen).....	83
3.5	Ergebnisse für hydrologische Einheiten	93
3.6	Ergebnisse administrative Einheiten (Kantone)	101
3.7	Natürliche Hintergrundlast.....	107
4	Diskussion	108
5	Ausblick	114
6	Literatur	115

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wesentliche Grundlagendaten.....	16
Tabelle 2: Landnutzungsverteilung gemäss Arealstatistik und MODIFFUS-Kategorien.....	17
Tabelle 3: Betrachtete Landnutzungsflächen gemäss BFS (2013a) in ha.....	18
Tabelle 4: Ausgewiesene Drainageflächen (Drainagekarte der Schweiz)	30
Tabelle 5: Faktoren für Oberflächenabfluss. Differenzierung nach MODIFFUS Landnutzungsklassen in Prozent der potentiellen Abflussmenge	46
Tabelle 6: Klassifizierung der Gewässeranschlusskarte (GAK2)	46
Tabelle 7: Verteilung der Anpassungsfaktoren bezogen auf das Abschwemmungsrisiko.....	48
Tabelle 8: Nutzungsspezifischer Ausgangswert für die Berechnung der P-Abschwemmung (mg P/l) .	49
Tabelle 9: Regionsspezifische Niederschlagskonzentration der P-Deposition	50
Tabelle 10: Nutzungsspezifischer Ausgangswert für die Berechnung der N-Abschwemmung (mg N/l) und die mittlere Nutzungsspezifische N-Deposition (kg N/ha).....	52
Tabelle 11: C-Faktoren für verschiedene Kulturen gemäss Betriebszählungskategorien	53
Tabelle 12: Abgeleitete mittlere Sonstige Erosion (t/ha/Jahr) für vegetationslose Flächen in der Schweiz.....	56
Tabelle 13: Angenommener Stickstoffgehalt im Oberboden	57
Tabelle 14: Nutzungsspezifischer Ausgangsmittelwert für die Berechnung der Nitratauswaschung (kg N/ha).....	58
Tabelle 15: Ableitung des Denitrifikationsfaktors aus den Bodeneigenschaften	61
Tabelle 16: Nutzungsspezifischer Ausgangswert für die Berechnung der P-Auswaschung (kg P/ha) ..	62
Tabelle 17: Klassifizierung des P-Testzahlfaktors in Abhängigkeit vom Hofdüngeranfall.....	63
Tabelle 18: Regionsspezifische Niederschlagskonzentration der P - Deposition.....	64
Tabelle 19: Pauschale Frachttannahme landwirtschaftlicher und sonstiger Direkteinträge	64
Tabelle 20: Wasserbilanz Schweiz (inklusive Aufteilung der Wasserflüsse)	68
Tabelle 21: Gesamt-Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer der Schweiz – nach absoluter Höhe der Einträge sortiert.	71
Tabelle 22: Gesamt-Phosphoreinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer der Schweiz – nach absoluter Höhe der Einträge sortiert.	78
Tabelle 23: Einträge gelöster Phosphor aus diffusen Quellen in die Gewässer der Schweiz – nach absoluter Höhe der Einträge sortiert.	82
Tabelle 24: Zusammenstellung sämtlicher berechneter und abgeschätzter P- und N-Einträge aus punktuellen und diffusen Quellen für das REZGUS und Vergleich mit den gemessenen Stofffrachten in Weil am Rhein	83
Tabelle 25: Stickstoffeintrag Spatial Units (EUA)	94

Tabelle 26: Diffuse Stickstoffeinträge auf Ebene River Basin District (EUA)	95
Tabelle 27: Gesamt-Phosphoreintrag Spatial Units (EUA)	97
Tabelle 28: Gelöster Phosphoreintrag Spatial Units (EUA)	99
Tabelle 29: Diffuse Einträge an gelöstem und Gesamt-Phosphor auf Ebene River Basin District (EUA)	100
Tabelle 30: Zusammenstellung der diffusen, punktuellen und totalen Stickstoffeinträge auf kantonaler Ebene	102
Tabelle 31: Zusammenstellung der diffusen, punktuellen und totalen Gesamt-Phosphoreinträge auf kantonaler Ebene	104
Tabelle 32: Zusammenstellung der diffusen, punktuellen und totalen gelösten Phosphoreinträge auf kantonaler Ebene	106
Tabelle 33: Natürliche Hintergrundlast und diffus anthropogene Belastung in der Schweiz.....	107
Tabelle 34: Vergleich mit internationalen Nährstoffeintragsabschätzungen	111
Tabelle 35: Vergleich der an ausgewählten Pegelmessstellen gemessenen mittleren P- und N- Jahresfrachten (Immissionsbetrachtung) mit den für das entsprechende Einzugsgebiet berechneten Stofffrachten mit MODIFFUS – unter Einbezug der Frachten aus punktuellen Quellen (Emissionsbetrachtung).....	113

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: MODIFFUS Landnutzungsklassen basierend auf Arealstatistik 2009	19
Abbildung 2: Mittlerer Niederschlag der Schweiz (Periode 1999 bis 2009) in mm	21
Abbildung 3: Mittlere Evapotranspiration der Schweiz (Periode 1999 bis 2009) in mm.....	23
Abbildung 4: Stickstoffdeposition auf dem Gebiet der Schweiz (Stand 2007)	25
Abbildung 5: Verteilung der digital vorhandenen, drainierten Flächen nach Kanton, Neigungsgrad und deren kumulative Entwicklung in Abhängigkeit zum Neigungsgrad.....	27
Abbildung 6: Flächenverteilung der Hangneigungsklassen "Grasland" in der Schweiz	27
Abbildung 7: Flächenverteilung der Hangneigungsklassen "Ackerland" in der Schweiz	28
Abbildung 8: Karte potentiell drainierter Ackerland- und Graslandstandorte	31
Abbildung 9: Karte des Abschwemmungsrisikos auf Böden der Schweiz.....	33
Abbildung 10: Karte des Auswaschungsrisikos der Böden der Schweiz	35
Abbildung 11: Karte des potentiellen Erosionsrisikos auf Ackerlandstandorten.....	37
Abbildung 12: Karte des potentiellen Gewässeranschlusses landwirtschaftlich genutzter Flächen	39
Abbildung 13: Karte des gemeindespezifischen Phosphoranfalls aus Hofdüngern für das Jahr 2010, bezogen auf die düngbare Fläche	41
Abbildung 14: Karte des gemeindespezifischen Stickstoffanfalls aus Hofdüngern für das Jahr 2010, bezogen auf die düngbare Fläche	42
Abbildung 15: Modellkonzept MODIFFUS 3.0	44
Abbildung 16: Verteilung der Abschwemmungsrisiken auf Böden der landwirtschaftlich genutzten Fläche in der Schweiz	47
Abbildung 17: Hektarbasierte Niederschlagsverteilung der Schweiz als Grundlage für die Abschätzung der sonstigen Erosion.....	55
Abbildung 18: Abschätzung der sonstigen Erosion in Abhängigkeit von der jährlichen Niederschlagsmenge	56
Abbildung 19: Mittlerer Oberflächenabfluss der Schweiz	67
Abbildung 20: Mittlerer Sickerwasserabfluss der Schweiz	69
Abbildung 21: Diffuser Stickstoffeintrag	72
Abbildung 22: Stickstoffauswaschung unter Ackerstandorten.....	74
Abbildung 23: Diffuser Phosphoreintrag (Gesamt-Phosphor)	76
Abbildung 24: Diffuser Phosphoreintrag über Erosion von Ackerland	77
Abbildung 25: Diffuser Phosphoreintrag (gelöster Phosphor).....	80
Abbildung 26: Diffuser Phosphoreintrag über Abschwemmung von Grasland	81
Abbildung 27: Diffuser Gesamt-Phosphoreintrag REZGUS	85
Abbildung 28: Eintrag diffuser gelöster Phosphor REZGUS	87

Abbildung 29: Diffuser Stickstoffeintrag REZGUS	89
Abbildung 30: Entwicklung der Gesamt-Phosphoreinträge im REZGUS.....	91
Abbildung 31: Entwicklung der Stickstoffeinträge im REZGUS	92
Abbildung 32: Einzugsgebietseinteilung nach European Environmental Agency	93
Abbildung 33: Ergebnis Analyseregionen (administrativ, kantonale Ebene).....	101

Zusammenfassung

Mit dem Stoffflussmodell MODIFFUS 3.0 wurde erstmals für die gesamte Schweiz (4'128'453 ha) eine Abschätzung der diffusen Phosphor- (P) und Stickstoff- (N) -einträge in die Gewässer durchgeführt. Die Ergebnisse dienen der regelmässigen Berichterstattung an die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) und der Konvention zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks (OSPAR). Die Abschätzungen beziehen sich auf „ein mittleres hydrologisches Jahr“, alle Eingangsdaten – soweit möglich – auf das Jahr 2010.

MODIFFUS 3.0 verbindet empirische und statistische Ansätze, darüber hinaus vereinigt es Landnutzungsdaten mit nutzungsabhängigen Nährstoffverlustkoeffizienten. Mit der Version MODIFFUS 3.0 gelang die Entwicklung des Modellkonzeptes zu einem modular getriebenen Modell, welches über ein Geoinformationssystem (GIS) ausgeführt werden kann. Hierdurch kann vereinfacht auf Änderungen in den Datengrundlagen bzw. auf veränderte Anforderungen (Massnahmenplanung) reagiert werden.

Die Modellberechnungen wurden auf Grundlage der aktuellen Arealstatistik 2004-09 durchgeführt, die auch die räumliche Modellauflösung (ein Hektar) vorgegeben hat. Die verschiedenen Datengrundlagen mussten mit angepassten Ansätzen aggregiert oder disaggregiert werden. Die neu zur Verfügung stehende Erosionsrisikokarte (ERK2) und Gewässeranschlusskarte (GAK2), beide im 2x2m-Raster vorliegend, mussten z.B. umgewandelt werden. Zahlreiche neue (digitale) Grundlagendaten konnten genutzt werden, andere wurden neu erstellt, wie z.B. eine digitale Karte der drainierten landwirtschaftlich genutzten Fläche. Alle Berechnungsalgorithmen früherer Modellversionen wurden überprüft und gegebenenfalls angepasst. Aus lang-jährigen Lysimetermessreihen wurden kulturspezifische Nitratverlustwerte unter Berücksichtigung von Fruchtfolgen abgeleitet. Für die Erosionsberechnung wurden neue kulturspezifische C-Faktoren entwickelt.

Die Landnutzung der Schweiz zeigt eine deutlich erkennbare Unterteilung in intensiv landwirtschaftlich genutzte Gebiete (Mittelland und die Täler der Flüsse Rhone, Rhein und Inn), extensiv landwirtschaftlich genutzte und bewaldete Gebiete (Alpenvorland und Jura) sowie vegetationslose und unproduktive Flächen (Alpen). Mit 22 % der Landesfläche ist der Anteil an Flächen mit unproduktiver Vegetation, Gletschern, Fels und Geröll sehr hoch. Dies spiegelt sich auch in der Verteilung der modellierten Nährstoffeinträge wider. Dabei ist eine Differenzierung der Nährstoffeinträge in diffuse anthropogene Belastungen und natürliche Hintergrundlast sinnvoll. Besonders in den Alpen dominiert auf Grund der starken Hangneigung der Eintragspfad „natürliche Erosion“. Die daraus resultierende hohe Sedimentfracht transportiert eine grosse Menge partikulär gebundenen Phosphor in die Oberflächengewässer, welcher aber zu einem grossen Teil als natürliche Hintergrundlast betrachtet wird. 71 % der diffusen Gesamt-P-Einträge sind daher natürliche Hintergrundlast, nur 29 % diffus anthropogene Belastung. Der mittlere flächenspezifische Gesamt-P-Eintrag ist mit 0.85 kg P/ha relativ hoch. In Bezug auf die Eutrophierungswirksamkeit ist der Eintrag von gelöstem Phosphor wichtiger. Der mittlere flächenspezifische gelöste P-Eintrag beträgt 0.22 kg P/ha. Eintragungsschwerpunkte liegen dabei in der von Grasland dominierten voralpinen Region und Gebieten mit erhöhten Tierzahlen. Der gelöste Phosphor weist im Vergleich zum Gesamt-Phosphor ein anthropogen dominiertes Eintragsverhältnis auf: 67 % sind diffus anthropogene Einträge und 33 % sind natürliche Hintergrundlast. Die eutrophierungswirksamen Einträge gelangen zu einem grossen Teil von landwirtschaftlich genutzten Flächen über den Eintragspfad Abschwemmung in die Oberflächengewässer.

Die Unterteilung zwischen intensiv und extensiv genutzten Flächen wird auch bei der Betrachtung der Stickstoffeinträge deutlich. Schwerpunktgebiete mit hohen N-Verlusten befinden sich

im Mittelland und den grossen Flusstälern auf intensiv bewirtschafteten (z.B. Gemüse-, Kartoffel- oder Maisanbau) oder drainierten Flächen. Die flächenspezifischen N-Einträge betragen im Mittel 12 kg N/ha, wobei es zu deutlichen regionalen und landnutzungsspezifischen Unterschieden kommt. Die grössten N-Verluste treten unter Ackerland auf (durchschnittlich 47 kg N/ha), unter Dauerwiesen liegen sie bei 12 kg N/ha und unter Wald bei 6 kg N/ha. Die diffus anthropogene Belastung überwiegt mit 64 %, die natürliche Hintergrundlast beträgt 36 %.

Insgesamt gelangen nach den Modellrechnungen 51'493 t Gesamt-Stickstoff über diffuse Eintragspfade in die Schweizer Gewässer. Die diffusen Gesamt-Phosphoreinträge betragen 3'490 t, die gelösten Phosphoreinträge 909 t.

Neben der gesamtschweizerischen Darstellung der diffusen Stoffeinträge wurden im Speziellen die Ergebnisse für das Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der grossen Seen (REZGUS) sowie für die hydrologischen Einheiten auf europäischer Ebene (River Basin Districts und Spatial Units) dargestellt. Weiterhin wurden die diffusen Stoffeinträge auch für jeden Kanton zusammengestellt.

Résumé

Pour la première fois, une estimation des apports diffus de phosphore (P) et d'azote (N) dans les eaux a été faite avec le modèle de flux de substances MODIFFUS 3.0 pour toute la Suisse (4'128'453 ha). Les résultats sont utilisés pour des rapports réguliers à la Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR) et la Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est (OSPAR). Les estimations se rapportent à une année hydrologique moyenne et toutes les données d'entrée - si possible - à l'année 2010.

MODIFFUS 3.0 combine des approches empiriques et statistiques. En plus, il combine des données d'utilisation des terres avec des coefficients spécifiques à l'utilisation des terres pour les pertes d'éléments nutritifs. Avec la version MODIFFUS 3.0, on a réussi à adapter le concept du modèle à un modèle modulaire fonctionnant à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). Cela permet de répondre simplement à des changements de bases de données ou à des modifications d'exigences lors de la conception de mesures pour réduire les pertes.

Les calculs ont été effectués sur la base de la statistique actuelle de la superficie (2004/09), qui a aussi déterminé la résolution spatiale d'un hectare. Les diverses autres bases de données devaient être agrégées ou désagrégées avec des approches personnalisées à cette résolution. Par exemple, la carte des risques d'érosion (ERK2) et la carte de connexion aux eaux (GAK2) par exemple, récemment disponibles avec une trame de 2x2 m, ont dû être transformées. De nombreuses nouvelles données de base ont pu être utilisées (souvent sous forme numérique). D'autres ont été établies pour la première fois, comme la carte numérique des sols agricoles drainés. Tous les algorithmes de calcul de la version précédente de MODIFFUS ont été vérifiés et ajustés si nécessaire. Des valeurs spécifiques à la culture pour estimer les pertes de nitrates par lessivage ont été déduites des essais de longue durée en cases lysimétriques prenant en compte l'effet des successions de cultures. Pour le calcul de l'érosion, des facteurs C spécifiques à la culture ont aussi été développés récemment.

L'utilisation des terres en Suisse montre une subdivision clairement reconnaissable dans des zones d'agriculture intensive (Plateau et les vallées des rivières Rhône, Rhin et Inn), de vastes zones d'agriculture extensive ou forestières (Préalpes et Jura) et des surfaces sans végétation ou improductives (Alpes). La proportion des surfaces avec une végétation improductive, des glaciers, du rocher ou des éboulis est très élevée avec 22 % de la surface suisse. Ceci se reflète également dans la distribution des apports d'éléments nutritifs modélisés. Il est judicieux d'établir une différenciation des apports entre la pollution diffuse anthropogène et le bruit de fond naturel. En particulier dans les Alpes, l'érosion naturelle est la voie d'apport dominante en raison de la pente raide. La forte charge sédimentaire résultant de ce type d'érosion transporte une grande quantité de phosphore particulaire dans les eaux de surface, considérée cependant en grande partie comme du bruit de fond naturel. Dans l'ensemble, 71 % du total des apports de P appartiennent donc au bruit de fond naturel et seulement 29 % à la pollution diffuse anthropogène. Rapporté à la surface, l'apport moyen de phosphore total est relativement élevé avec 0,85 kg P/ha. Mais en ce qui concerne l'effet sur l'eutrophisation, l'apport de phosphore dissous est plus important. Il se monte à 0,22 kg P/ha en moyenne de la Suisse, et les apports sont les plus grands dans les régions préalpines dominées par des prairies et des autres régions avec une densité de bétail élevée. Contrairement au phosphore total, le phosphore dissous est dominé par la charge anthropogène diffuse avec une proportion de 67 %; les 33 % restants sont du bruit de fond naturel. Ces apports proviennent en grande partie des surfaces agricoles et sont entraînés dans les eaux de surface par le ruissellement superficiel.

La division entre les surfaces exploitées intensivement et extensivement est également évidente quand on regarde les apports d'azote. Les régions prioritaires avec des pertes élevées d'azote se trouvent dans le Plateau et les grandes vallées fluviales sur des surfaces exploitées intensivement (p.ex. cultures maraîchères, pommes de terre ou maïs) ou des surfaces drainées. Les apports d'azote se montent en moyenne à 12 kg N/ha, conduisant à des différences régionales importantes et spécifiques à l'utilisation des terres. Les pertes d'azote les plus importantes se produisent sous les terres assolées (47 kg N/ha en moyenne). Ils se montent à 12 kg N/ha sous les prairies permanentes et à 6 kg N/ha sous les forêts. La pollution diffuse anthropogène (64%) prédomine sur le bruit de fond naturel (36 %).

D'après les calculs basés sur la modélisation mathématique proposée, 51'493 t d'azote total entrent dans les eaux suisses par des voies d'apport diffuses. Les apports de phosphore total se montent à 3'490 t et ceux de phosphore dissous à 909 t.

Outre les résultats pour toute la Suisse, les apports diffus d'azote et de phosphore ont été calculés en particulier pour le bassin versant du Rhin de la Suisse situé en aval des grands lacs (REZGUS) et pour les unités hydrologiques au niveau européen (« River Basin Districts » et « Spatial Units »). En outre, les apports de substances ont également été compilés pour chaque canton.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Schweizer Gewässer werden nach wie vor mit Phosphor- (P) und Stickstoff- (N) Einträgen belastet. Hinsichtlich der Reduzierung der P- und N-Einträge konnten in der Schweiz verschiedene nationale und internationale Ziele bisher nicht realisiert werden (siehe Umweltziele Landwirtschaft N und P; BAFU & BLW 2008). Diese Stoffeinträge resultieren einerseits aus punktuellen Quellen (Kläranlagen, Mischwasserentlastungen), andererseits aus diffusen Quellen (überwiegend Landwirtschaft sowie natürliche Hintergrundlast). Eine GIS-basierte, flächendeckende Modellierung der diffusen Nährstoffeinträge für die gesamte Schweiz liegt bisher nicht vor; es wurden nur verschiedene Einzugsgebiete berechnet (z.B. Rheineinzugsgebiet unterhalb der Seen, REZGUS). Die GIS-basierte, auf Hektarrasterebene durchgeführte Modellierung erlaubt die Identifizierung besonders stark zur Gewässerbelastung beitragender Flächen sowie die Identifizierung der wichtigsten Eintragspfade (Erosion, Abschwemmung, Auswaschung etc.). Die Ergebnisse lassen sich für beliebige Einheiten aggregieren (z.B. hydrologische Einzugsgebiete oder administrative Einheiten) und können somit vielfach genutzt werden (Berichterstattung für internationale Organisationen wie IKS, OSPAR, IGKB, CIPEL, OECD etc.; Stickstoff- und Phosphorflüsse in der Schweiz; Agrarumweltindikatoren, Überprüfung der Umweltziele Landwirtschaft Schweiz) und können für Szenario-Rechnungen (z.B. für Klimawandel, Massnahmenpläne etc.) genutzt werden. Aus den Ergebnissen lassen sich Empfehlungen für die Landwirtschaft zur Reduzierung diffuser Stoffeinträge auf nationaler und regionaler Ebene sowie für Flusseinzugsgebiete ableiten.

Grundlage für die Modellierung diffuser Stoffeinträge ist die Landnutzung. Mit der neuen Arealstatistik 2004/09 der Schweiz liegen nun aktuelle Datensätze vor, welche eine Neuberechnung diffuser Stoffeinträge ermöglichen. Weiterhin liegen seit den letzten Modellierungen zahlreiche andere digitale Grundlagen neu vor, die eine erhebliche Verbesserung und eine Aktualisierung bisheriger Resultate erwarten lassen.

Mit dem Modell MODIFFUS (Modell zur Abschätzung diffuser Phosphor- und Stickstoffeinträge in die Gewässer, SCHMID & PRASUHN 2000) liegt ein empirisch-statistischer Modellansatz vor, der Emissionsabschätzungen diffuser Eintragspfade ermöglicht. Dieser Modellansatz wurde bisher mehrfach weiterentwickelt und in verschiedenen Gebieten angewandt (BRAUN et al. 1991, PRASUHN 1999, PRASUHN & HURNI 1998, 1999, PRASUHN et al. 1996, SCHMID & PRASUHN 2000, PRASUHN & MOHNI 2003, SPIESS & PRASUHN 2006). Die Grundlagen des Modells MODIFFUS wurden bei BRAUN (1999), PRASUHN & BRAUN (1994), PRASUHN et al. (1996), SCHMID & PRASUHN (2000) und PRASUHN & MOHNI (2003) bereits ausführlich beschrieben. Das Modell wird jedoch sehr flexibel eingesetzt und in Abhängigkeit von der jeweiligen Fragestellung, der verfügbaren Eingangsdaten und der finanziellen und materiellen Ressourcen optimal angepasst. Durch die Verfügbarkeit neuer Grundlagendaten ergibt sich die Gelegenheit einer ersten gesamtschweizerischen Abschätzung diffuser Nährstoffeinträge. Zur Kennzeichnung der zahlreichen Anpassung im Modell MODIFFUS – und um zukünftige Modelländerungen sichtbar machen zu können – wurde die neue Modellversion **MODIFFUS 3.0** benannt.

1.2 Zielsetzung und Problemstellung

Erstmals werden die diffusen N- und P-verluste in die Gewässer flächendeckend für die Schweiz im Hektarraster modelliert. Dazu wird das an AGROSCOPE entwickelte statistisch-empirische Stoffflussmodell MODIFFUS aktualisiert und weiterentwickelt. Hierfür ist es nötig,

das bestehende Modell MODIFFUS auf Grund des neuesten Wissensstandes und anderer natürlicher Bedingungen in neuen Regionen (Rhonetal, Tessin) anzupassen und alle Berechnungsmethoden für die verschiedenen diffusen Eintragspfade zu aktualisieren. Dadurch haben sich viele methodische Veränderungen ergeben, so dass die Vergleichbarkeit mit früheren Berechnungen nur eingeschränkt möglich ist.

Es werden zunächst das methodische Vorgehen und anschliessend die Ergebnisse der Neuberechnung vorgestellt. Diese repräsentieren auf Grund der zur Verfügung stehenden und genutzten Grundlagendaten den **Stand des Jahres 2010**. Dieses Jahr wurde in der Projektbegleitgruppe als Basisjahr der Berechnungen bestimmt

1.3 Generelle Aussagekraft und Genauigkeit der Erhebungen

Für die Abschätzung der P- und N-Einträge in die Gewässer der verschiedenen Einzugsgebiete wurden Daten aus amtlichen Statistiken mit durchschnittlichen Nährstoffgehalten in den entsprechenden Transportmedien (z.B. Oberflächenabfluss oder Erosionsmaterial) verknüpft. Die Daten der amtlichen Statistiken liegen mit unterschiedlichem räumlichen Bezug vor (Betrieb, Gemeinde, Hektarraster, 2-km-Raster, Karten in verschiedenen Massstäben). Wir haben für diese Untersuchung das **Hektarraster als Berechnungsgrundlage** gewählt. Dieses Raster wird als Grundlage von der Arealstatistik abgeleitet. Alle Eingangsdaten werden auf dieses Hektarraster aggregiert oder disaggregiert. Bei der Übertragung und Verwendung von Literaturdaten ist mit Unsicherheiten und Fehlern zu rechnen, da die an einem Standort oder in einem Einzugsgebiet zu einem bestimmten Zeitpunkt gemessenen Daten streng genommen nur für diesen Standort Gültigkeit haben. Entsprechend mussten relativ viele Annahmen getroffen werden, und es wurden viele Werte auf Grund von Analogieschlüssen festgelegt, so dass eine exakte Quantifizierung und eine statistische Fehlerrechnung unmöglich sind. Somit handelt es sich in der vorliegenden Studie um eine **Abschätzung der Stoffeinträge** in die Gewässer der Schweiz, die Grössenordnungen von verschiedenen Belastungsquellen in unterschiedlichen Gebieten zeigen soll. Es muss mit einem statistischen Fehler von schätzungsweise $\pm 20\%$ für langjährige Durchschnittswerte gerechnet werden. Da **langjährige Durchschnittswerte** verwendet wurden, bleiben bestimmte Einzelereignisse wie z.B. extreme Starkniederschläge mit hoher Bodenerosion, Murgängen oder Überschwemmungen oder Unfälle mit Güllebehältern, die für ein Gewässer katastrophale Folgen haben können, unberücksichtigt.

Lokale, kleinräumige Besonderheiten (z.B. Deponien, kleine Moore etc.) wurden nicht erfasst. Die berechneten Stoffeinträge dürfen daher als **durchschnittlicher Summenwert** für ein Einzugsgebiet oder eine administrative Einheit **ab ca. 50 km² Fläche**, nicht aber für einzelne Gemeinden, Parzellen oder Rasterzellen angesehen werden. Die regionale Differenzierung innerhalb eines Einzugsgebietes basiert auf heterogenen Datensätzen unterschiedlicher räumlicher Auflösung und kann nur erste Hinweise auf potentiell gefährdete Flächen liefern.

Von den punktuellen Quellen sind die Stofffrachten aus den Abwasserreinigungsanlagen relativ zuverlässig. Die Abschätzung der Frachten aus Regenwasserentlastungen ist dagegen sehr unsicher.

1.4 Definitionen

Im Folgenden werden die wichtigsten Begriffe kurz erklärt:

- **Diffuse Quellen:** Einträge durch Oberflächenabfluss (Abschwemmung und Erosion), Sickerung (Auswaschung, Drainageverluste) und direkte atmosphärische Deposition auf Gewässeroberflächen sowie unversiegelte (Landwirtschaftliche Nutzflächen, Wald, Siedlungsgrünflächen etc.) und versiegelte Flächen, die nicht an eine Kläranlage angeschlossen sind. Weiterhin landwirtschaftliche Direkteinträge, welche beim Düngeraustrag, durch weidendes Vieh, von Hofplätzen etc. entstehen, sowie Direkteinträge durch Streu- und Laub, Badebetrieb und Wasservögel (zusammengefasst als „sonstige diffuse Einträge“).
- **Punktuelle Quellen:** Kommunale oder industrielle Abwässer, die über Kläranlagen als gereinigtes Abwasser in die Gewässer gelangen. Regenwasserentlastungen werden in der vorliegenden Studie ebenfalls zu dem punktuellen Quelle gezählt, da deren Frachten aus den Kläranlagendaten abgeleitet wurden. Somit werden siedlungswasserwirtschaftliche Aspekte sauber getrennt von den restlichen landwirtschaftlichen-natürlichen Aspekten. Dies ist auch bezüglich Massnahmenplanung relevant. In internationalen Studien (IKSR, OSPAR) zählen die Einträge aus Regenwasserentlastungen zu den diffusen Quellen; dies ist bei Vergleichen zu berücksichtigen.
- **Natürliche Hintergrundlast:** Theoretische Belastung unter potentiell natürlicher Vegetation (meist Wald) und ohne anthropogene Luftverschmutzung.
- **Diffus anthropogene Quellen:** Diffuse Quellen abzüglich natürlicher Hintergrundlast. Belastung, die überwiegend durch landwirtschaftliche Aktivitäten verursacht wird, aber auch durch Luftverschmutzung und Besiedlung.
- **Gesamt-Phosphor:** Summe von gelöstem und partikulärem organischem und anorganischem Phosphor (unfiltrierte Wasserprobe).
- **Gelöster Phosphor:** Gesamter gelöster organischer und anorganischer Phosphor (filtrierte Wasserprobe), nicht nur Ortho-Phosphat. Gelöster Phosphor gilt überwiegend als bioverfügbar und somit eutrophierungswirksam. Vereinfacht werden im Folgenden alle Einträge über Abschwemmung, Auswaschung, Drainage, Deposition und landwirtschaftliche Direkteinträge als gelöster Phosphor betrachtet, auch wenn geringe Anteile jeweils partikulär sein können. Die „sonstigen diffusen Direkteinträge“ werden zu 50 % als gelöst angenommen.
- **Partikulärer Phosphor:** Im Filterrückstand enthaltener Phosphor. An Bodenpartikel adsorbierter Phosphor, in Mineralien enthaltener Phosphor, in Biomasse (Blätter, Algen etc.) enthaltener Phosphor. Partikulärer Phosphor wird meist am Seegrund abgelagert und wirkt nur bei Rücklösung eutrophierungswirksam. Vereinfacht werden im Folgenden alle Einträge aus Bodenerosion und sonstiger Erosion, sowie 50 % der sonstigen diffusen Direkteinträge als partikulärer Phosphor angesehen.
- **Bioverfügbarer Phosphor:** Im Folgenden wird vereinfacht der gesamte gelöste diffuse Phosphoreintrag sowie der gesamte Eintrag aus punktuellen Quellen als bioverfügbar angenommen.

2 Methoden

Als Grundlage jeder Nährstoffeintragsmodellierung dienen die verschiedenen Grundlagendaten und die Bestimmung der Wasserflüsse. Daher wurde für jede Rasterzelle der potenzielle Abfluss (Niederschlag minus nutzungsspezifischer Verdunstung) ermittelt. Darauf wurden die verschiedenen Wasserflüsse (Oberflächenabfluss, Drainage- und Grundwasserabfluss) für die einzelnen Landnutzungskategorien berechnet. Die Berechnung der Stofffrachten erfolgte anschließend durch Multiplikation der Wasserflüsse mit den entsprechenden nutzungs- und gebietsspezifischen Stoffkonzentrationen. Mit demselben Modellansatz wurde die natürliche Hintergrundlast berechnet.

2.1 Grundlagendaten

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verwendeten Grundlagendaten. Diese werden in den folgenden Unterkapiteln jeweils detaillierter erläutert.

Tabelle 1: Wesentliche Grundlagendaten

Kategorie	Datenbeschreibung	Herausgeber	Zeitraum	Parameter
Arealstatistik	Landnutzungsverteilung	BFS	2004 bis 2009	
Betriebszählungs-daten	statistische Daten	BFS	2010	Tierzahl, Verteilung Kulturarten
Zusatzerhebung	Zusatzerhebung zur Betriebszählung, statistische Daten	BFS	2010	Angaben zu Zwischenfrüchten, Winterbegrünung
swissBOUNDARIES^{3D}	Hoheitsgrenzen CH/Kanton	Swisstopo	2013	Administrative Grenzen
EZGG-CH	Einzugsgebietsgliederung Schweiz	BAFU	2012	Hydrologische Einzugsgebietsgrenzen
swissTLM^{3D}	Topographisches Landschaftsmodell	Swisstopo	2014	Gewässernetz
Pegeldaten Fließgewässer	Pegeldaten	BAFU, Kantone	1999 bis 2010	Abflussdaten, Schwebstofffrachten, Gütedaten
Klima	Niederschlagsdaten	Meteo-schweiz	1961 bis 2010	tägliche Niederschlagsdaten, berücksichtigt 1999 - 2010
Klima	Evapotranspirationsdaten	WSL	1981 bis 2010	jährliche Evapotranspirationsdaten (aktuelle Evapo.), Berücksichtigt 1999 – 2010
Deposition	Stickstoffdeposition	BAFU	2007	jährliche Niederschlagsdeposition
Drainage	Digitalisierte Karten von den Kantonen St.Gallen, Basel-Landschaft, Neuenburg, Zürich, Teildigitalisierung der Siegfriedkarte	Kantone, BAFU		Erstellte Drainagekarte der Schweiz
Bodenkarten		BFS, Kantone		Bodeneigenschaften
ERK2 Erosionsrisikokarte		BLW	2010	potenzielles Erosionsrisiko
GAK2 Gewässer-anschlusskarte		BLW	2013	potenzieller Grad des Gewässeranschlusses
ARA Inventar	N & P Frachten	BAFU	2010	

2.1.1 Landnutzung

Die verwendete Landnutzung basiert auf der Arealstatistik 2009 (Befliegungszeitraum 2004-2009). Diese Daten wurden von der Servicestelle GEOSTAT (BFS 2014) zur Verfügung ge-

stellt. Auf Grund ihrer Auflösung von einer Hektare dient die Arealstatistik als Berechnungsgrundlage für das vorliegende Projekt und ein Hektarraster mit ca. 4'120'000 ha wird als kleinste geometrische Einheit verwendet. Alle anderen Daten wurden dieser Auflösung angepasst, sei es durch Aggregations- oder Disaggregationsschritte. Die Landnutzungskategorien der Arealstatistik (72 Kategorien) wurden in 18 Klassen zusammengefasst (Tab. 2).

In Abbildung 1 ist eine deutliche Unterteilung in landwirtschaftlich intensiv genutzte Gebiete (Mittelland und grosse Täler (z.B. Rhone, Inn und Ticino)), landwirtschaftlich extensiv genutzte und walddreiche Gebiete (Jura und Voralpen) und die alpinen Gebiete zu erkennen. Die Gebiete mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung können in Ackerland (9.9 %) und Grasland (8.3 %) unterteilt werden (Tab. 2). 12.4 % der Schweizer Fläche steht unter alpwirtschaftlicher Nutzung. Den grössten Flächenanteil nimmt allerdings der Wald ein, welcher in dieser Untersuchung in Waldflächen unterhalb von 1200 m (19 %) und oberhalb von 1200 m (12.3 %) unterteilt wird. Aufgrund des grossen Flächenanteils der Alpen sind 22.3 % der Schweizer Fläche durch unproduktive Vegetation, Fels, Geröll, Sand und Gletscher charakterisiert.

Tabelle 2: Landnutzungsverteilung gemäss Arealstatistik und MODIFFUS-Kategorien

Landnutzung	Fläche in Hektar	%	
Ackerland	407'069	9.9	landwirtschaftliche Nutzflächen
Alpwirtschaftliche Nutzfläche	513'860	12.4	
Gartenbau	4'525	0.1	
Heimweiden	168'106	4.1	
Obstbau	30'740	0.7	
Rebbau	15'708	0.4	
Grasland	341'661	8.3	
Siedlungsgrün	159'972	3.9	Siedlungs- flächen
Siedlung überbaut	73'643	1.8	
Strassen ausserorts	30'891	0.7	
Strassen innerorts	36'473	0.9	
unproduktive Vegetation	297'883	7.2	unproduktive Flächen
stehende Gewässer	142'681	3.5	
fliessende Gewässer	32'378	0.8	
Fels, Geröll, Sand	465'584	11.3	
Gletscher	114'262	2.8	
Wald < 1200m	784'572	19.0	Wald
Wald > 1200m	508'445	12.3	
Schweiz gesamt	4'128'453		

Durch die in der Arealstatistik 2004-09 erstmals mögliche Unterteilung des Wies- und Ackerlandes in Ackerland (offenes Ackerland und Kunstwiese) und Grasland ist es erstmals möglich, mit MODIFFUS eine gesicherte standortspezifische Berechnung der Nährstoffausträge aus Ackerland und Grasland durchzuführen.

2.1.1.1 Verteilung der Strassen

Unter Verwendung der Bauzonen (ARE 2012) wurde eine Differenzierung der Landnutzungskategorie Strassen durchgeführt. Im Folgenden wird in Strassen ausserorts und innerorts unterschieden. Grundsätzlich gilt, dass Strassen (Arealstatistik) innerhalb der bebauten Zone als Strassen innerorts angenommen werden. Damit einhergehend wurde die Annahme getroffen, dass abfliessendes Wasser von diesen Flächen der Kanalisation und damit einer ARA zugeführt wird. Somit zählen der Abfluss und der Abtrag von Nährstoffen zu den punktuellen Einträgen. Hingegen finden Strassen ausserorts Berücksichtigung in der Berechnung diffuser Nährstoffeinträge.

2.1.1.2 Verteilung der Wälder

Mit Hilfe von swissALTI^{3D} (Swisstopo 2014a) wurde bei Flächen mit der Landnutzung Wald eine höhenabhängige Unterteilung durchgeführt. Dabei wurde die Unterteilung an der Höhengrenze von 1200 m. ü. NN. vorgenommen, um einer veränderten Abflussbildung unter Wald mit zunehmender Höhe Rechnung zu tragen.

2.1.1.3 Kulturartenverteilung 2010

Mit Hilfe der Betriebszählung 2010 (BFS 2013a) erlangt man einen Eindruck über die spezifische Verteilung der Kulturarten für das Jahr 2010, während die aktuelle Arealstatistik einen langfristigen Blick auf die Landnutzungsverteilung der Jahre 2004 – 2009 (Zeitraum der Befliegung) zeigt (Tab. 3).

Tabelle 3: Betrachtete Landnutzungsflächen gemäss BFS (2013a) in ha

		2010
Hauptgruppen	offene Ackerfläche	271'968
	Kunstwiesen	131'401
	Ackerland (offene Ackerflächen & Kunstwiesen)	403'368
	Dauergrünfläche	612'265
	Dauerkulturen	23'444
	Übrige	12'670
	Landwirtschaftliche Nutzfläche (LN)	1'051'747

2.1.1.1 Nutzung der Landwirtschaftlichen Betriebszählung: Zusatzerhebung 2010

Aus der Zusatzerhebung der Betriebszählung von 2010 (BFS 2013b) fliessen die Zahlen zur Bodenbedeckung im Winter in die Berechnung des Nitratausgangswertes auf Ackerflächen ein. Die Berücksichtigung von Schwarzbrachen oder Stoppelbrachen führt zu einem erhöhten Nitratausgangswert auf Ackerflächen.

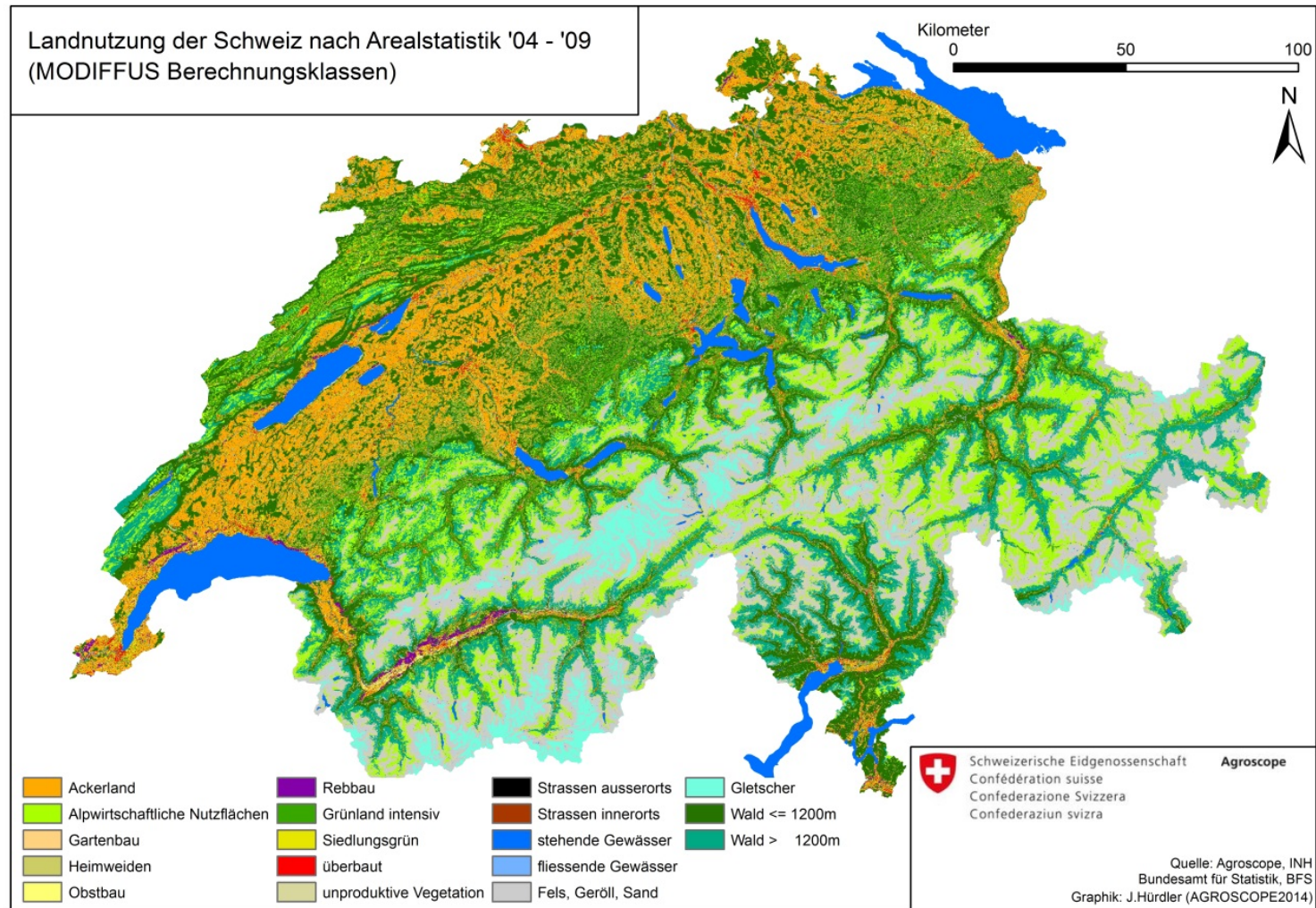


Abbildung 1: MODIFFUS Landnutzungsklassen basierend auf Arealstatistik 2009

2.1.2 Einzugsgebiete

Für die abschliessende Ergebnisdarstellung wurden verschiedene administrative und hydrologische Ebenen zur Berechnung und Auswertung verwendet. Die dafür gewählte Datengrundlage wurde zum einen dem Datensatz swissBOUNDARIES^{3D} (Swisstopo 2013) des Bundesamtes für Landestopografie entnommen. Der Stand der Daten wird mit dem 1.1.2013 angegeben, alle vorliegenden Daten, welche als Berechnungsgrundlage aus dem Basisjahr 2010 entnommen wurden, wurden auf die am 1.1.2013 gültigen Gemeindegrenzen angepasst. Zum anderen wurden die vom BAFU bereitgestellten Einzugsgebietsgrenzen für das Reporting 2012 an die Europäische Umweltagentur (EUA) genutzt. Hierbei wird die Analyse auf Basis der River Basin Districts und der Spatial Units EUA gemacht.

Für den Pegelabgleich (Abflussmenge) und die Validierung (Güte und Schwebstoffgehalt) wurde die Einzugsgebietsgliederung der Schweiz (EZGG-CH) des BAFU (2012) genutzt.

2.1.3 Gewässernetz

Für die genaue Betrachtung der fliessenden und stehenden Gewässer wurde das Topografische Landschaftsmodell TLM swissTLM^{3D} (Swisstopo 2014b) verwendet. Bereits ein grosser Teil der aus dem VEKTOR25-Datensatz überführten Gewässerattribute wurde aktualisiert. Nur ein kleiner Teil der Zentralschweiz ist noch auf dem Stand des VEKTOR25-Datensatzes.

2.1.4 Abfluss-, Schwebstoff- und Gütemessdaten

Für die Kalibrierung und abschliessende Validierung der Berechnungsergebnisse werden Abfluss- und Gütemessdaten verschiedener Pegelmessstationen genutzt. Diese Daten wurden freundlicherweise vom Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Hydrologie, bereitgestellt. Zusätzlich konnten wir Messdaten der Kantone Bern (AWA, Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern) und Zürich (AWEL, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft; Abteilung Gewässerschutz) verwenden.

2.1.5 Klimadaten

Da MODIFFUS 3.0 ein mittleres Jahr betrachtet, wurden die Klimadaten ebenfalls auf ein langjähriges mittleres Jahr gemittelt.

2.1.5.1 Niederschlag

Die Niederschlagsdaten wurden den jährlichen Niederschlägen aus den MeteoSwiss Grid-Data Product RhiresY v1.0 (MeteoSwiss, 2010) entnommen und von der gegebenen Auflösung (1 km * 1 km) auf das Hektarraster resampled. Daraus wurden dann mittlere Niederschläge über die Periode 1999 – 2009 gebildet, um die Beeinflussung von Extremereignissen so gering wie möglich zu halten, aber im Gegenzug auch die Effekte eines Klimatrends auszuschliessen (Abb. 2).

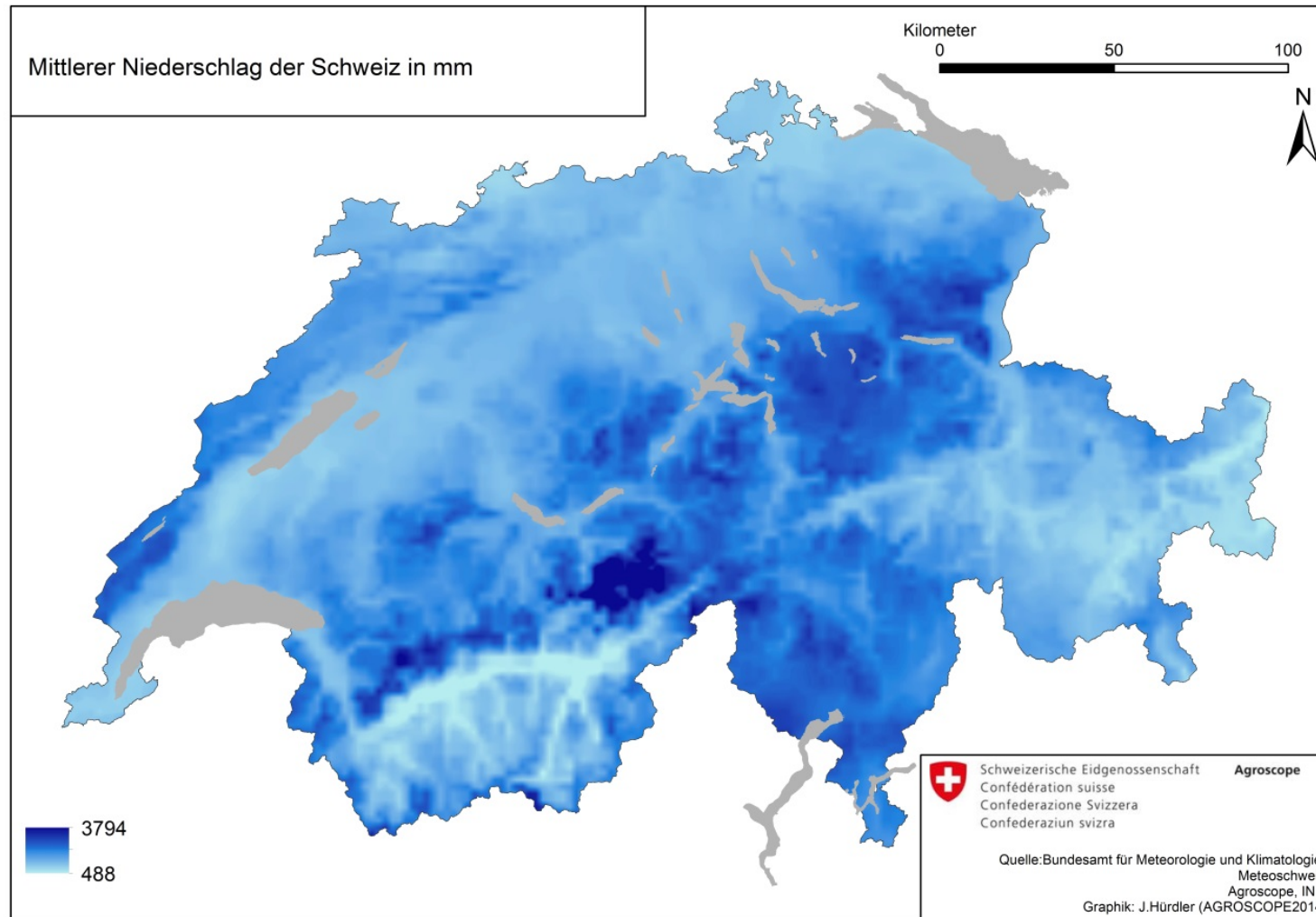


Abbildung 2: Mittlerer Niederschlag der Schweiz (Periode 1999 bis 2009) in mm

2.1.5.2 Evapotranspiration

Das gleiche Vorgehen wurde bei den Verdunstungsdaten gewählt, welche uns von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL 2012) zur Verfügung gestellt wurden. Die jährlichen nutzungsspezifischen Evapotranspirationsdaten sind im Zusammenhang mit dem Projekt „Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz“ (CCHydro) entstanden und liegen in einer 2 km * 2 km Auflösung vor. Es wurde ein Mittelwert für die Zeitperiode 1999 – 2009 erstellt und auf ein Hektarraster disaggregiert (Abb. 3).

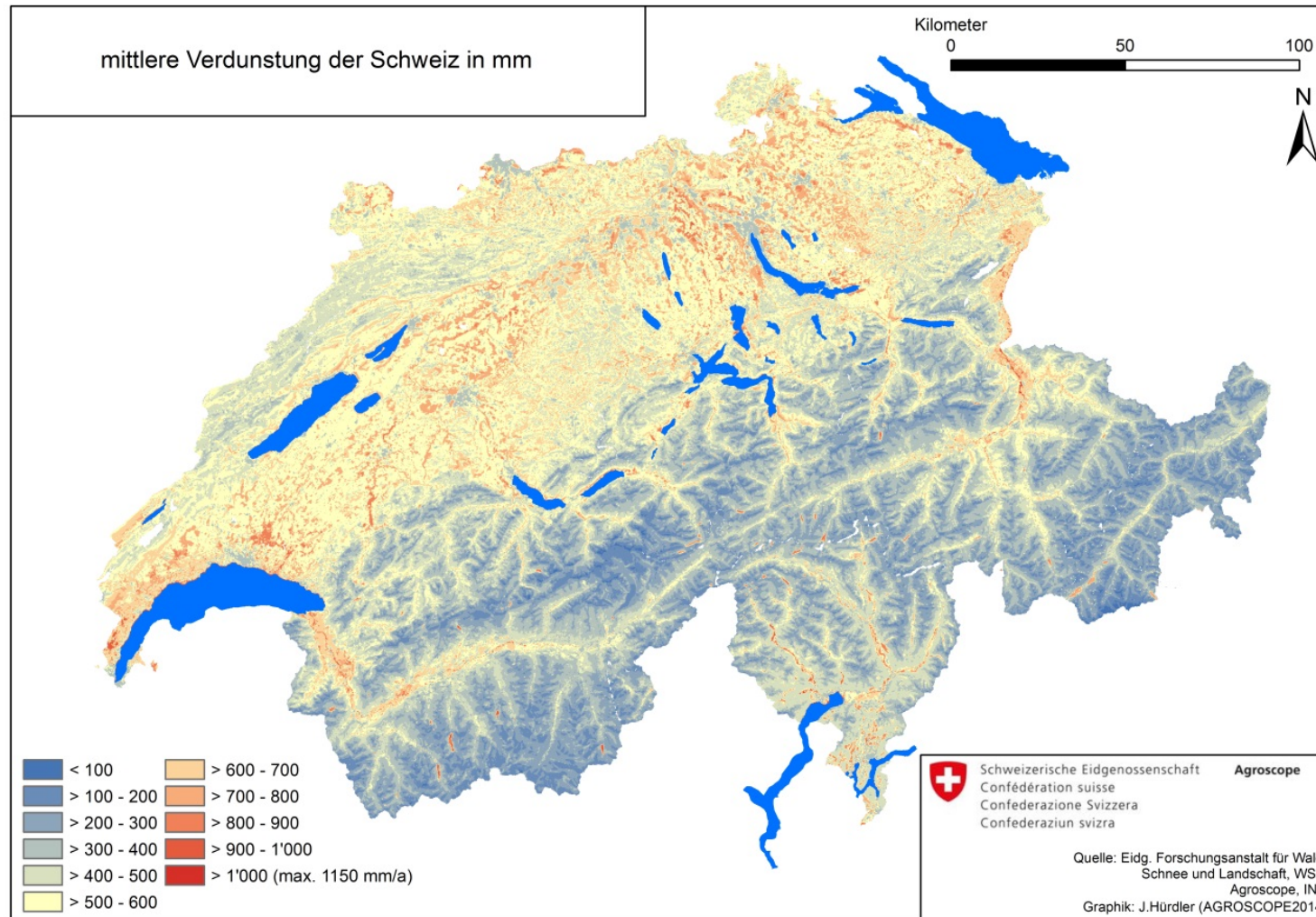


Abbildung 3: Mittlere Evapotranspiration der Schweiz (Periode 1999 bis 2009) in mm

2.1.5.3 Abfluss

Aus den erstellten Eingangsdatensätzen Niederschlag und Verdunstung wurde der mittlere potentielle Abfluss (1999 – 2009) hergeleitet. Diese vereinfachte Wasserbilanz dient als Grundlage für die Aufteilung in die Wasserflüsse Oberflächenabfluss, Drainageabfluss und Sickerwasser.

2.1.6 Stickstoffdeposition

Für die Nährstoffeintragsabschätzung mit MODIFFUS wurde die N-Depositionskarte, Stand 2007 (BAFU 2014) genutzt. Diese liegt in einem 1 * 1 km Raster vor und wurde auf das Hektar-Raster disaggregiert (Abb. 4).

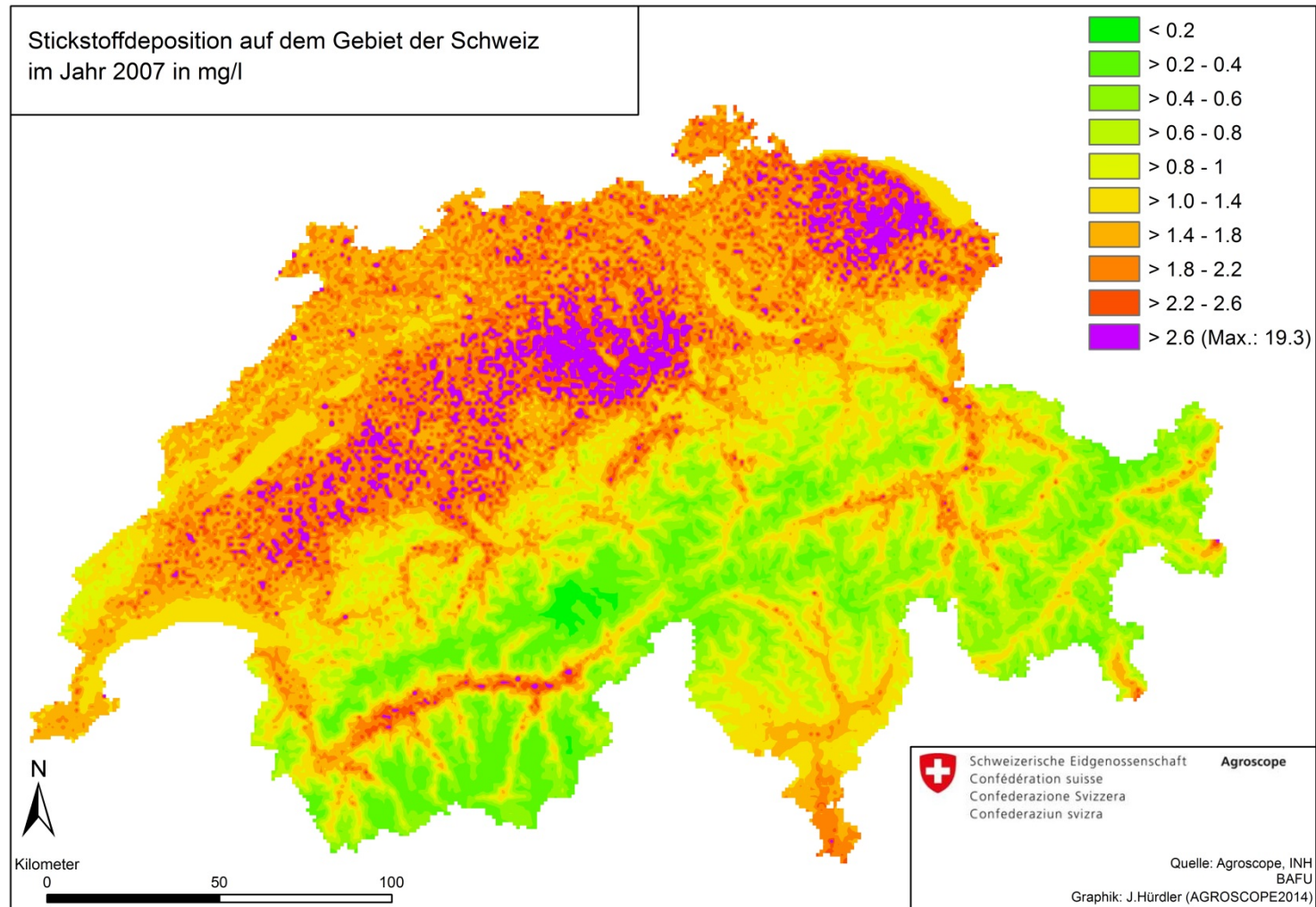


Abbildung 4: Stickstoffdeposition auf dem Gebiet der Schweiz (Stand 2007)

2.1.7 Drainage

Die Nährstoffeinträge über Drainagen werden auf direktem Weg den Oberflächengewässern zugeführt und stellen daher einen relevanten Eintragspfad dar. Da es keine digitale Grundlage für die Betrachtung der Drainageflächen auf Schweizer Ebene gibt, wurde in diesem Projekt ein Weg gefunden, eine schweizweite Karte mit drainierten Flächen zu erstellen. Das angewendete Verfahren wird im Folgenden ausführlich erläutert, da erstmals eine solche kartographische Grundlage erstellt wurde.

Vier Kantone (St.Gallen, Neuenburg, Basel-Landschaft und Zürich) haben digitalisierte Drainagekarten zur Verfügung gestellt, anhand derer eine Analyse verschiedener Parameter durchgeführt wurde.

Eine Ableitung der Parameter erfolgte aus der Verschneidung der vorhandenen Datenbasis (drainierte Flächen) in den vier Kantonen mit den folgenden Grundlagenkarten

- Bodeneignungskarte (BEK200)
 - o Kennwerte des Bodens
 - Wasserspeicherungskapazität (5 & 6 [gut & sehr gut]) und/oder
 - Wasserdurchlässigkeit (4, 3, 2 [schwach gehemmt, stark gehemmt und gehemmt]) und/oder
 - Vernässungsgrad (2, 3, 4 [grundfeucht, schwach grundnass, grundnass])
- Arealstatistik (AS04/09 mit MODIFFUS-LN-Klassifizierung)
 - o Kennwerte der Landnutzung
 - Ackerland
 - Grasland
- Hangneigung (SWISSAlti^{3D})
 - o Kennwerte des Reliefs
 - Neigung 0 bis 6°

Berücksichtigung für die Drainageflächenausweisung fanden Bodeneinheiten, welche in den vier Kantonen mit digitalen Drainagekarten zu mindestens 10 % vorhanden waren.

Die Linien in Abbildung 5 zeigen, wie stark die Gebiete mit den Neigungsgraden 0° bis 6° Anteil an der gesamten drainierten Fläche haben. Der graue Bereich zeigt an, dass je nach Kanton mindestens 64 % (Kt. Basel-Landschaft) der drainierten Flächen bis zu einer Neigung von 6° zu verorten sind. Hingegen werden im Kanton Neuenburg bereits durch die drainierten Flächen bis zum Neigungsgrad 6° 92 % aller drainierten Flächen berücksichtigt. Im Kanton Zürich sind aber die meisten Drainageflächen verortet, daher erscheint die Obergrenze von 6° als sinnvoll. Somit wird für die schweizweite Ausscheidung der drainierten Flächen vereinfacht unterstellt, dass alle Flächen >6° Hangneigung sich selber entwässern und nicht drainiert sind.

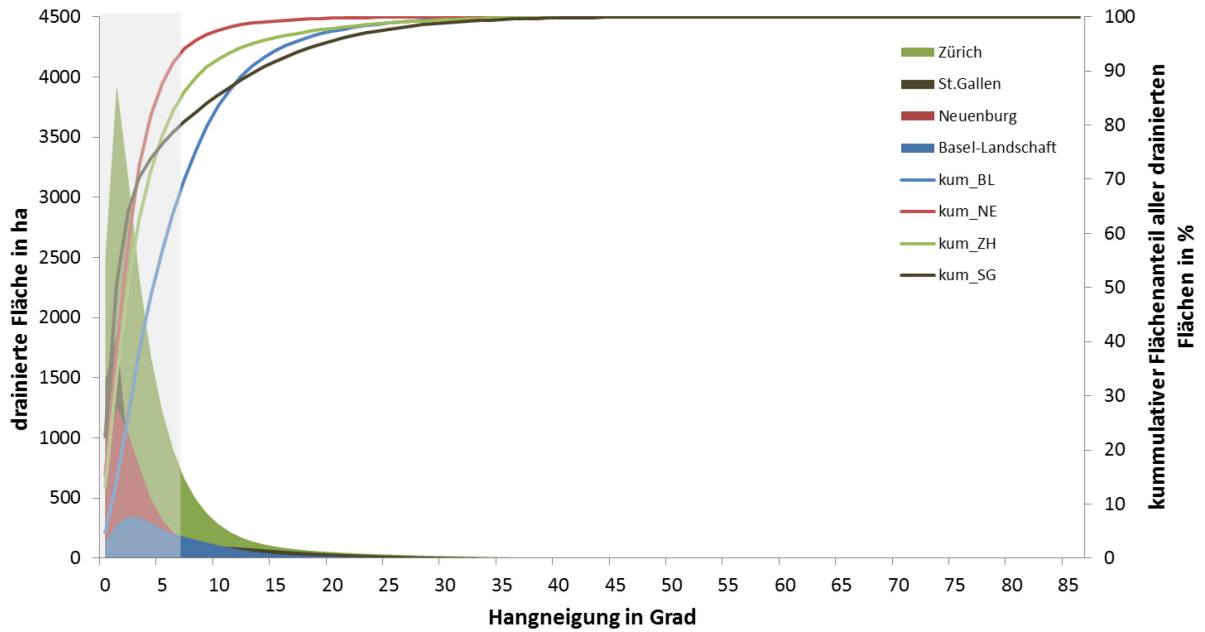


Abbildung 5: Verteilung der digital vorhandenen, drainierten Flächen nach Kanton, Neigungsgrad und deren kumulative Entwicklung in Abhängigkeit zum Neigungsgrad

Unter den betrachteten Landnutzungsklassen (Ackerland, Grasland), welche für die Ausweisung potentiell drainierter Flächen ausgewählt wurden, gibt es Unterschiede in der Verteilung über die Hangneigung. Beiden gleich ist der generell rückläufige Trend mit zunehmender Hangneigung (Abb. 6 & 7). Der Rückgang bei Ackerland fällt steiler aus. Das wird auch deutlich in der unterschiedlichen Gewichtung der Hangneigungen. Die am geringsten vertretene Neigung bei Grasland ist 0° (Abb. 6). Bei Ackerland ist es umgekehrt, die Flächen mit einer Neigung von 6° sind am geringsten vertreten (Abb. 7).

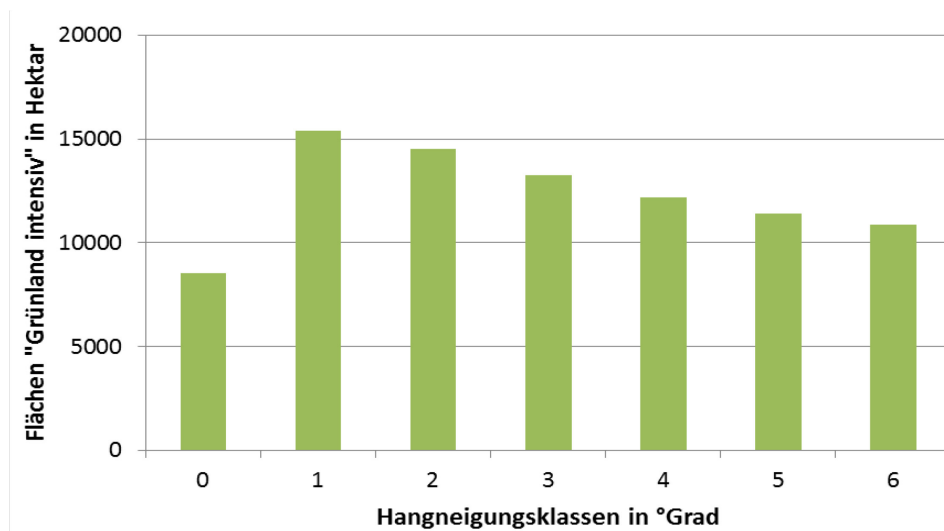


Abbildung 6: Flächenverteilung der Hangneigungsklassen "Grasland" in der Schweiz

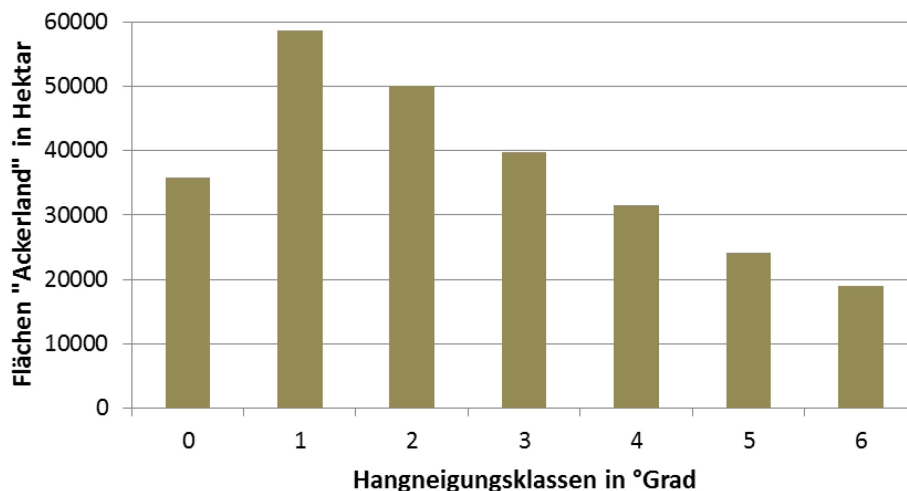


Abbildung 7: Flächenverteilung der Hangneigungsklassen "Ackerland" in der Schweiz

Die totale Fläche „Grasland“ bis zu einer maximalen Hangneigung von 6° (86'193 ha) ist relativ gleichmässig auf die Hangneigungsklassen verteilt. Abgesehen von den Flächen mit einer Hangneigung von 0° (10 %) sind die Graslandflächen zwischen 18 % (1°) und 13 % (6°) verteilt (Abb. 6). Hingegen schwankt die Verteilung der absoluten Fläche von „Ackerland“ (258'880 ha) auf die Hangneigungsklassen stärker. Ackerlandflächen mit einer Hangneigung von 1° sind mit 23 % am stärksten vertreten (Abb. 7). Insgesamt ist aber zu erkennen, dass das Grasland eine relativ gleichmässige Verteilung hat. Hingegen entfallen bei den Ackerlandflächen nahezu 75 % auf die Hangneigung 0° - 3° (Abb. 7), da eine ackerbauliche Bewirtschaftung mit zunehmender Neigung grundsätzlich erschwert ist.

Bei der räumlichen Verteilung dieser Flächen bestätigt sich dieses Bild (Abb. 1). Ackerland ist hauptsächlich in den flacheren Gebieten der Schweiz (Mittelland) zu erkennen. Die grünen Flächen (Grasland) dominieren in den Übergangsbereichen von Mittelland zum Jura und den alpinen Bereichen.

Um eine regionale Anpassung der bisher ausgewiesenen drainierten Flächen zu ermöglichen, erfolgt mit Hilfe der statistischen Erhebungen des BLW (BÉGUIN & SMOLA 2008) der nächste Schritt. Hier liegen für jeden Kanton Flächenangaben zur drainierten Landwirtschaftsfläche vor. Anhand der Hangneigungen wird ein Ranking der auszuweisenden Flächen vorgenommen. Die Kategorisierung des Hangneigungsranking erfolgte in fünf Stufen. Dadurch wurde eine Annäherung der ausgewiesenen Flächen an die statistischen Werte erzielt. Bei der Betrachtung der Gesamtfläche erscheint eine Abweichung unter 1 % vertretbar, da der Anspruch nicht in einer flächengetreuen Ausweisung liegt. Die statistische Erhebung weist keine Daten für die Kantone Appenzell Innerrhoden und Basel-Stadt aus, daher werden bei der Ausweisung mittlere Hangneigungen verwendet, was mit der Hangneigungskategorie 4 gleichzusetzen ist.

Um eine möglichst genaue Verteilung der drainierten Flächen abzubilden, konnte bei der Erstellung der Drainagekarte eine im Auftrag vom BAFU digitalisierte Karte aller in der Siegfriedkarte ausgewiesenen Feuchtgebiete herangezogen werden. Die Digitalisierungsarbeit (WÜST-GALLEY et al. 2015) erfasst alle Feuchtgebiete der Schweiz während der Kartierungsarbeiten zur Erstellung der unterschiedlichen Bearbeitungsstände der Siegfriedkarte.

Der verfolgte Ansatz bei dieser Arbeit stützt sich auf die Annahme, dass Gebiete, welche zu dem Zeitpunkt der Erstellung der Siegfriedkarte als Feuchtgebiete ausgewiesen wurden und

heute landwirtschaftlich genutzt werden, drainiert sein müssen. Daher wurde die Datengrundlage mit den landwirtschaftlich genutzten Flächen verschnitten. In weiteren Arbeitsschritten wurden nur die übereinstimmenden Flächen verwendet.

Im weiteren Verlauf wurden die digitalisierten Feuchtgebiete (Siegfriedkarte) mit den bereits ausgewiesenen Drainageflächen zusammengeführt. In Bereichen, in denen beide Ausgangsdatsätze flächentreu waren, wurden keine Veränderungen vorgenommen, ebenso in Gebieten, in denen nur bereits ausgewiesene Drainageflächen vorherrschten. In Bereichen, in denen keine Drainageflächen ausgewiesen wurden, aber Feuchtgebiete aus der Siegfriedkarte hervorgegangen sind, wurden diese Flächen in die Drainagekarte übernommen.

Viele Feuchtgebietsflächen stimmten mit den bereits ausgewiesenen Drainageflächen überein. Durch den bis hier gewählten Ansatz der Drainageflächenausweisung wurde bereits ein sehr hoher Anteil ehemaliger Feuchtgebiete abgedeckt. Nur ein geringer Anteil der digitalisierten Flächen (7'700 ha) stimmte nicht überein. Daher wurden diese Flächen der Drainagekarte hinzugefügt.

Durch die zusätzliche Integration der 7'700 ha ehemaligen Feuchtgebiete zu den bisher ausgewiesenen Drainageflächen entsteht eine geringe Abweichung der Drainageflächen gegenüber den statistischen Erhebungen von BÉGUIN & SMOLA (2008). Da in diesem Bericht auch private Landeigentümer befragt wurden und möglicherweise nicht alle Befragten oder Drainageflächen besitzende Landeigentümer geantwortet haben, stellen diese geringen Unterschiede (ca. 4 %, Tab. 4) keine relevante Abweichung dar.

Die in Abbildung 8 dargestellte Karte zeigt die für das Projekt entwickelte Karte der Drainageflächen. Sie dient als Grundlage bei der Berechnung der Auswaschung von Nährstoffen und der Abschätzung der Wasserabflüsse.

Tabelle 4: Ausgewiesene Drainageflächen (Drainagekarte der Schweiz)

Kantons- nummer	Kanton	Kan- ton Kürzel	Drainagen ausge- wiesen in ha	Drainagen BLW 2008 in ha
1	Zürich	ZH	19'671	17'226
2	Bern	BE	33'893	30'000
3	Luzern	LU	6'053	4'800
4	Uri	UR	247	270
5	Schwyz	SZ	4'299	3'900
6	Obwalden	OW	545	466
7	Nidwalden	NW	504	462
8	Glarus	GL	748	740
9	Zug	ZG	1'958	1'495
10	Fribourg	FR	19'929	16'000
11	Solothurn	SO	6'610	7'000
12	Basel-Stadt	BS	34	-
13	Basel-Land- schaft	BL	4'913	4'700
14	Schaffhausen	SH	1'422	1'170
15	Appenzell Ausserrhoden	AR	1'483	3'000
16	Appenzell Innerrhoden	AI	515	-
17	St. Gallen	SG	14'797	14'000
18	Graubünden	GR	44	1'715
19	Aargau	AG	12'212	12'000
20	Thurgau	TG	10'925	12'000
21	Ticino	TI	721	500
22	Vaud	VD	42'679	43'649
23	Valais	VS	3'061	4'000
24	Neuchâtel	NE	5'714	5'600
25	Geneve	GE	4'928	4'800
26	Jura	JU	2'665	2'738
	Gesamt	CH	200'570	192'231

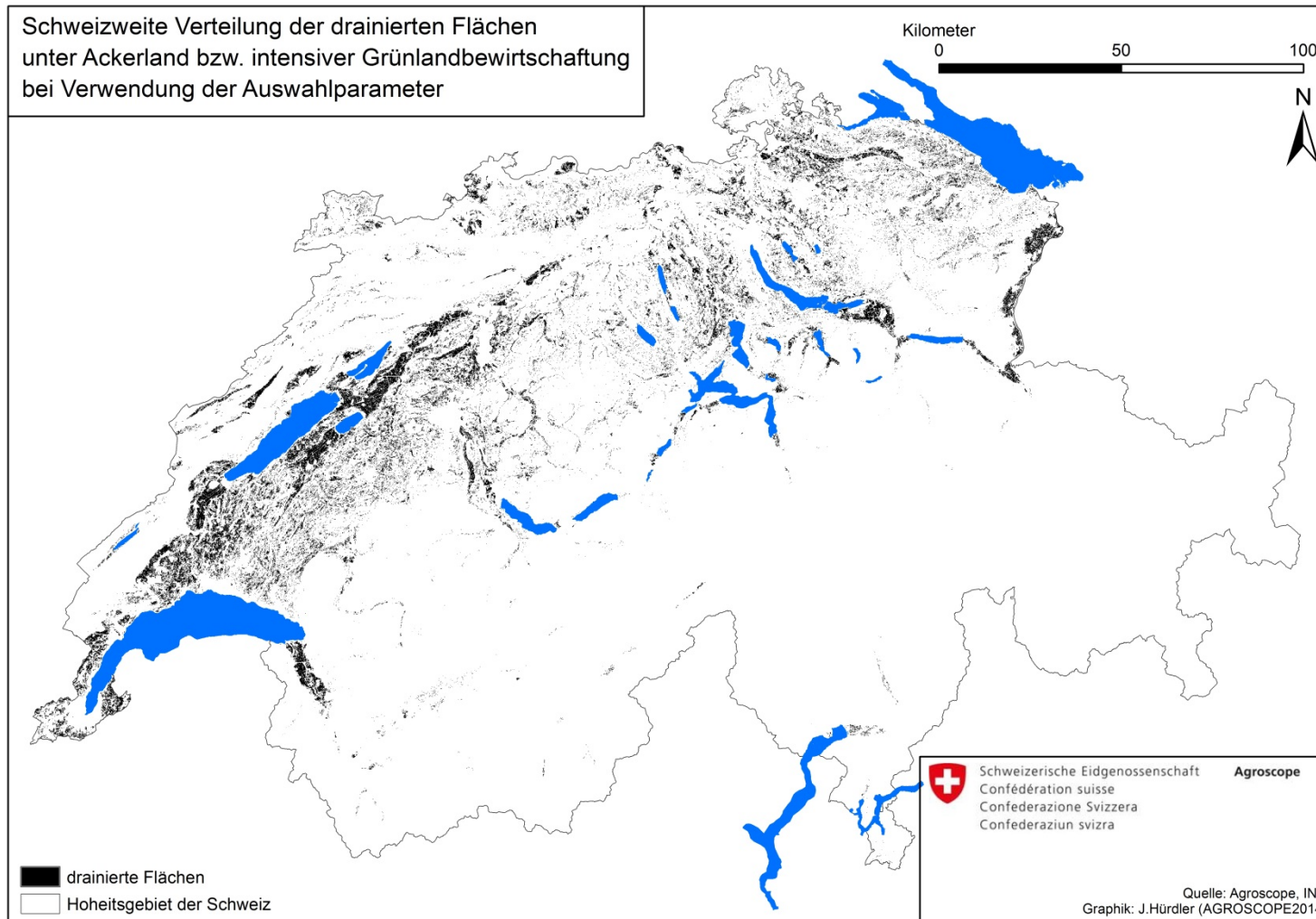


Abbildung 8: Karte potentiell drainierter Ackerland- und Graslandstandorte

2.1.8 Bodeneigenschaften

Die Bodeneigenschaften wurden auf Grund mangelnder geeigneter Bodenkarten aus einem Mosaik verschiedener kantonaler Bodenkarten und der Bodeneignungskarte (BEK200) (BFS 2004) abgeleitet. Der Anspruch des Projektes war es, die bestmöglichen Daten zu verwenden. Daher wurde uns durch die Mithilfe der zuständigen kantonalen Stellen (AG; BL; BS; GR; LU; SG; SO; TG; ZH; ZU) die Möglichkeit gegeben, in einem Teil der Schweiz die Bodeneigenschaften aus einer feiner aufgelösten Datengrundlage abzuleiten.

2.1.8.1 Abschwemmungsgefährdung

Relevante Kriterien sind die Wasserdurchlässigkeit (doppelt gewichtet) und der Vernässungsgrad (Abb. 9). Die entsprechenden Codes der Bodenkarten wurden miteinander verrechnet und klassiert (5 Klassen). Damit wird unterstellt, dass mit zunehmender Durchlässigkeit die Gefahr von Oberflächenabfluss abnimmt bzw. bei gehemmter Durchlässigkeit die Gefahr von Wassersättigung bis zur Oberfläche zunimmt und damit die Oberflächenabflussgefahr steigt. Liegt eine Vernässung vor, ist der Boden häufig bis zur Oberfläche gesättigt und in Hanglagen kann Oberflächenabfluss einsetzen.

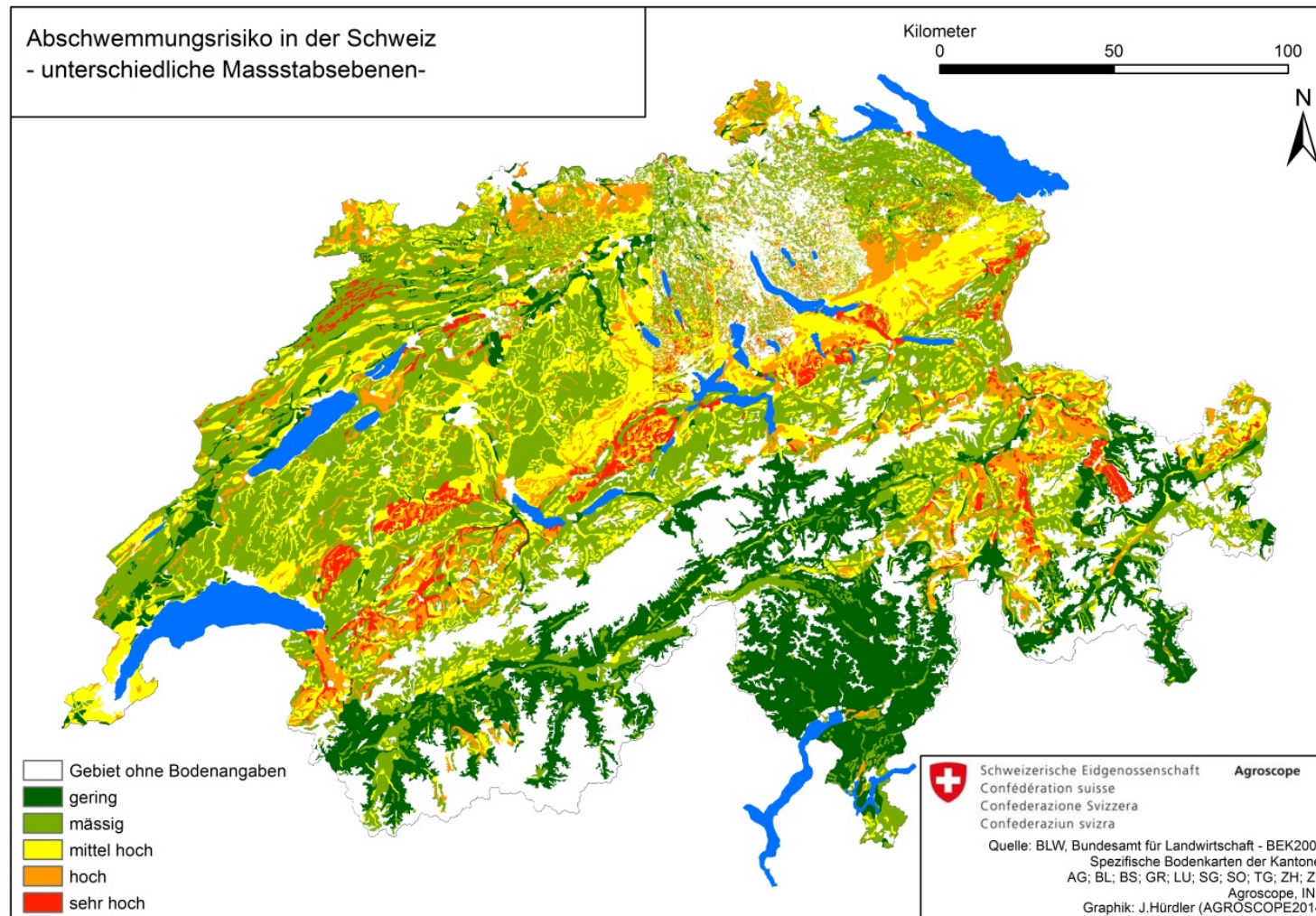


Abbildung 9: Karte des Abschwemmungsrisikos auf Böden der Schweiz

2.1.8.2 Auswaschungsgefährdung

Hauptkriterium für die Auswaschungsgefährdung ist das Wasserspeichervermögen (doppelt gewichtet), weiteres Kriterium ist die Wasserdurchlässigkeit. Je höher das Wasserspeichervermögen, desto geringer ist die Auswaschungsgefahr (Abb. 10). Ist die Wasserdurchlässigkeit gehemmt, kann es zu Wasserstau (Pseudogleye) und zu Denitrifikationsverlusten kommen, was die Nitratauswaschungsgefahr vermindert. Vernässung deutet auf Grund- oder Stauwasser hin (Gleye, Pseudogleye), was ebenfalls zu Denitrifikationsverlusten führen kann. Organische Moor- und Torfböden wurden generell in die zweithöchste Klasse eingestuft, wegen des hohen Mineralisierungspotentials.

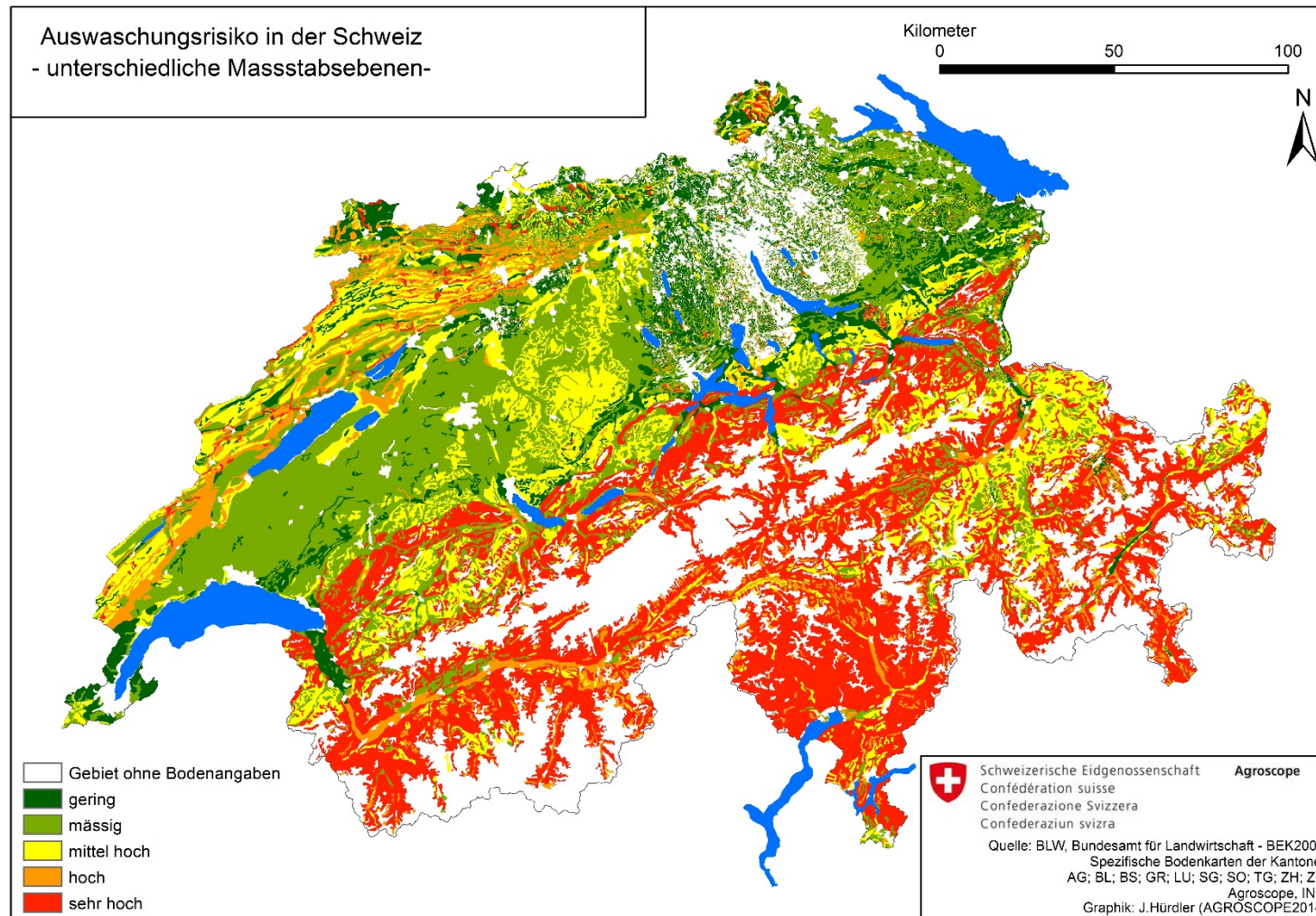


Abbildung 10: Karte des Auswaschungsrisikos der Böden der Schweiz

2.1.8.3 Erosionsgefährdung

Die Erosionsgefährdung der Böden (Erodibilität) wurde bei der Erstellung der Erosionsrisikokarte berücksichtigt (siehe Kap. 2.1.9) und wird daher hier nicht separat ausgewiesen.

2.1.9 Erosionsrisikokarte ERK2

Für das vorliegende Projekt konnte die Erosionsrisikokarte (GISLER et al. 2010) erstmals verwendet werden. Sie zeigt das potenzielle Erosionsrisiko der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz in einer 2-Meter-Auflösung in Tonnen Bodenmaterial pro Hektar pro Jahr. Mit der potenziellen Menge Bodenerosionsmaterial beziffert die Karte die Schäden, die auf dem jeweiligen Feld durch Bodenerosion theoretisch - unter Annahme eines permanent unbedeckten Bodens - möglich sind (On-Site-Schäden). In Verbindung mit Angaben zum Bedeckungs- und Bewirtschaftungsfaktor (C-Faktor), die aus den Berechnungen des Agrarumweltindikators „Erosionsrisiko“ (ZA-AUI 2014) abgeleitet wurden, ermöglicht diese neue Datengrundlage eine detailgetreue Abschätzung der effektiven Erosion auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in der Schweiz.

Da die 2 * 2 Meter-Auflösung der ERK2 die Rechenkapazität überfordert, wurde auch diese Datengrundlage in das Hektarraster überführt (Abb. 11). Für diesen Zweck wurden die Ackerland-, Gartenbau- und Rebbau-Flächen der Arealstatistik gesondert aus der ERK2 (2*2m Raster) extrahiert. Um eine Beeinflussung der verschiedenen Landnutzungsflächen untereinander auszuschliessen, wurden die separat extrahierten Flächen auch separat aggregiert. Darüber hinaus wurde das maximale potentielle Erosionsrisiko auf 500 t/ha/Jahr limitiert.

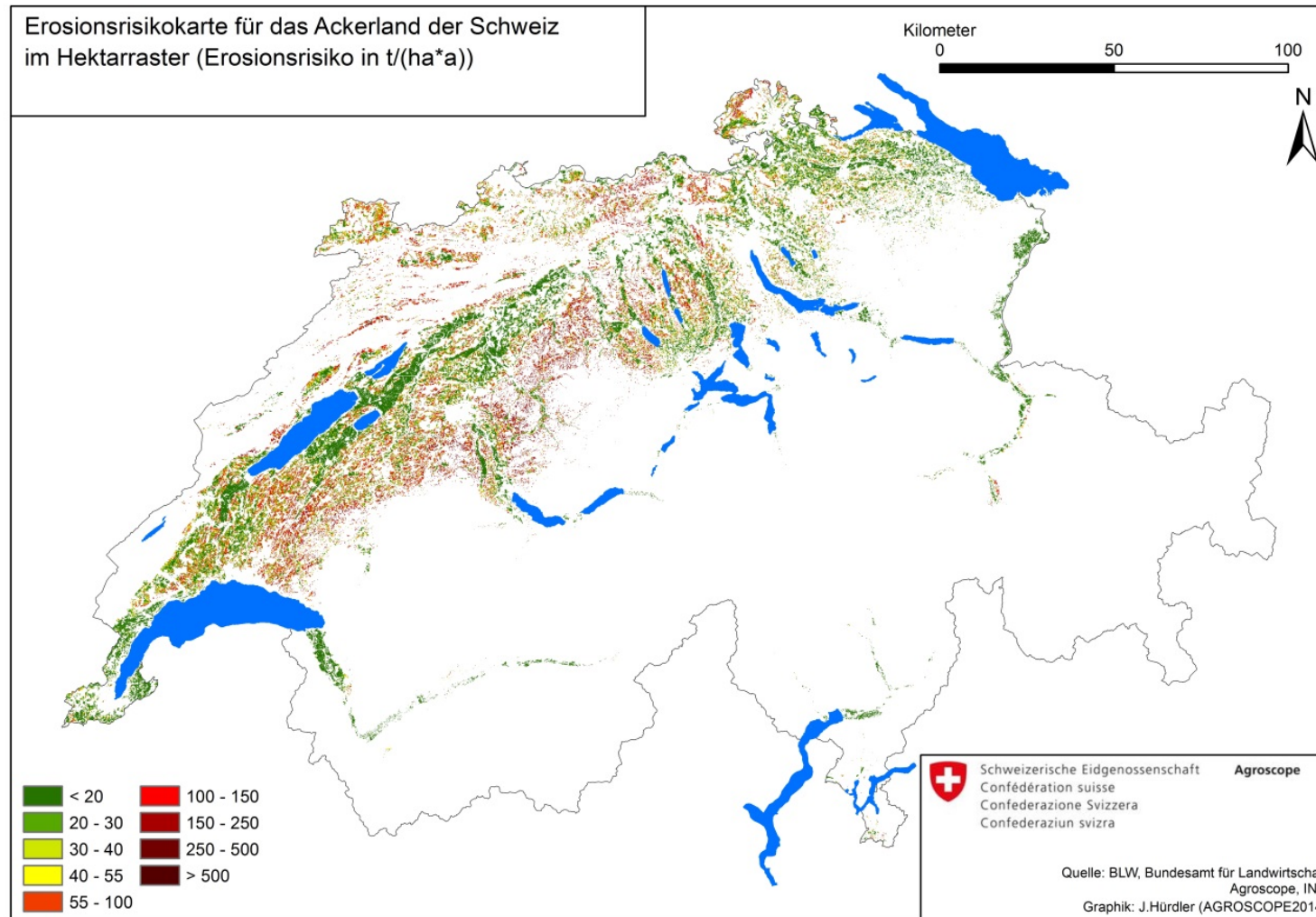


Abbildung 11: Karte des potentiellen Erosionsrisikos auf Ackerlandstandorten

2.1.10 Gewässeranschlusskarte (GAK2)

Auf Grundlage der Erosionsrisikokarte (ERK2) wurde eine potentielle Gewässeranschlusskarte (GAK2) (ALDER et al. 2013) erosionsgefährdeter Flächen der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche in der Schweiz erstellt. Der diffuse Stoffeintrag erfolgt in der Schweiz entweder direkt von Flächen, die an das Gewässer angrenzen, oder indirekt von Flächen, die in gewisser Entfernung vom Gewässer gelegen sind, aber über Einlaufschächte und Meteorwasserableitungen an den Vorfluter angeschlossen sind. Die Gewässeranschlusskarte bietet diesem Projekt die Möglichkeit, landwirtschaftliche Flächen, die potenziell ans Gewässer angeschlossen sind, zu ermitteln und in Abhängigkeit des Anschlussgrades differenziert zu betrachten. Dadurch erlangt MODIFFUS 3.0 eine genauere Aussage in Bezug auf die Effekte von erodiertem Material und dem gekoppelten Eintrag von diffusen Nährstoffen als die Vorgängerversionen.

Wie auch bei der ERK2 stellt die 2 * 2 Meter-Auflösung der GAK2 eine Überforderung der Rechenkapazität dar. Daher wurde auch diese Datengrundlage in das Hektarraster überführt (Abb. 12). Für diesen Zweck wurden die Ackerland- und Graslandflächen gesondert aus der GAK2 (2*2m Raster) extrahiert. Um eine Beeinflussung der verschiedenen Landnutzungsflächen untereinander auszuschliessen, werden die extrahierten Flächen separat mit der Methode „Neighborhood – Blockstatistics“ auf das Hektarraster aggregiert. Die Unterscheidung in der Aggregationsmethode zwischen der ERK2 und der GAK2 kommt durch die verschiedenen zu betrachtende Datengrundlage (kontinuierliche Variablen bzw. klassifizierte Daten) zustande.

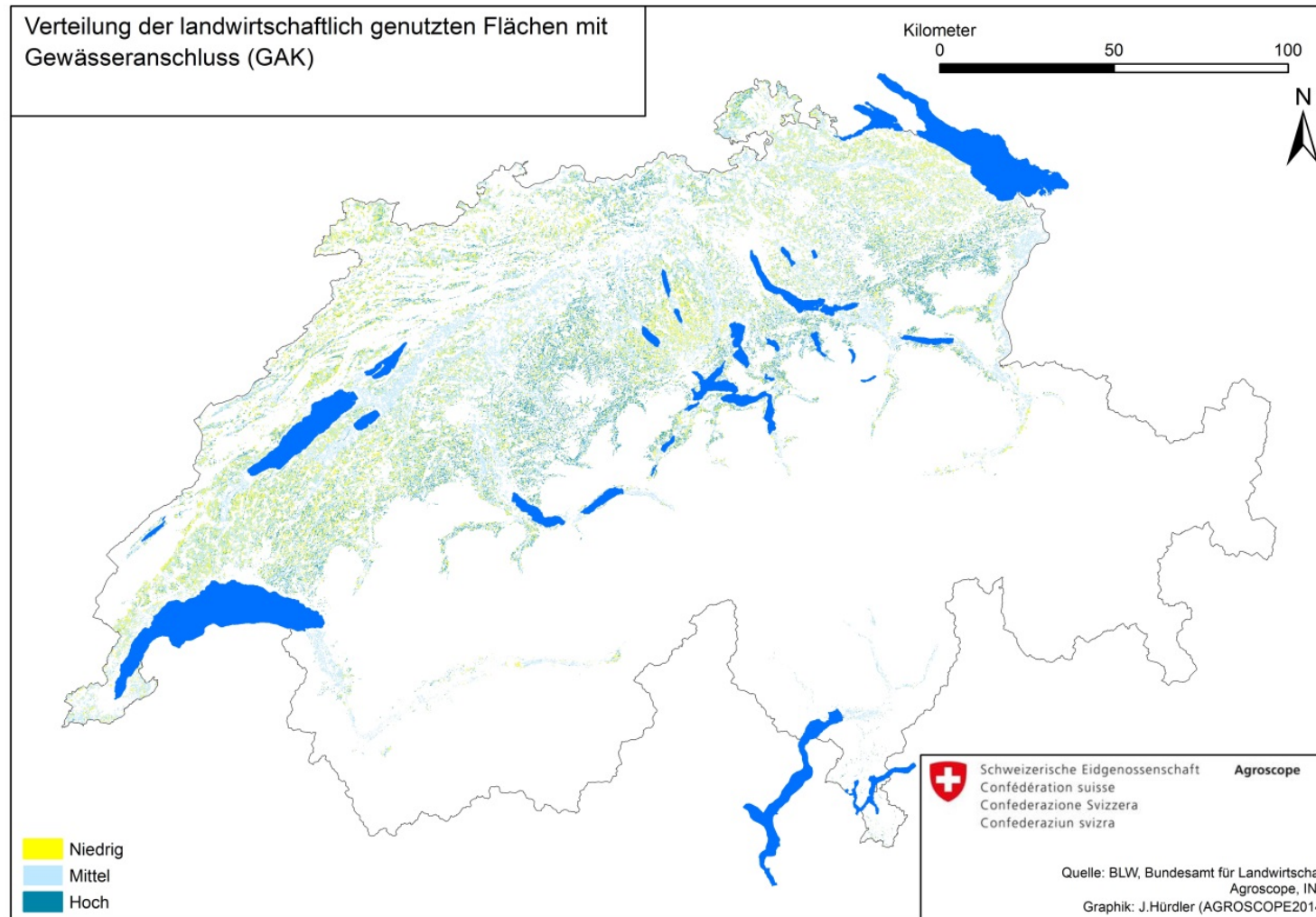


Abbildung 12: Karte des potentiellen Gewässeranschlusses landwirtschaftlich genutzter Flächen

2.1.11 Phosphor- und Stickstoffanfall in Hofdüngern

Der P- und N-Anfall aus Hofdüngern wurde aus den Tierzahlen der Eidgenössische Betriebszählung 2010 (BFS 2013a) für jede Gemeinde berechnet. Die Richtwerte für die Nährstoffausscheidungen Kot und Harn pro Einheit wurden GRUDAF (2009) entnommen. Der berechnete Nährstoffanfall wurde mit der düngbaren Fläche der Gemeinde verrechnet. Dabei bleiben Hofdüngerexporte oder -importe ebenso unberücksichtigt wie die Sömmerung und der Einsatz von Ökofutter. Einen hohen Hofdüngeranfall pro Hektare düngbare Fläche erhält man in Regionen, welche durch eine hohe Anzahl von DGVE pro Hektare charakterisiert sind (Abb. 13 und 14).

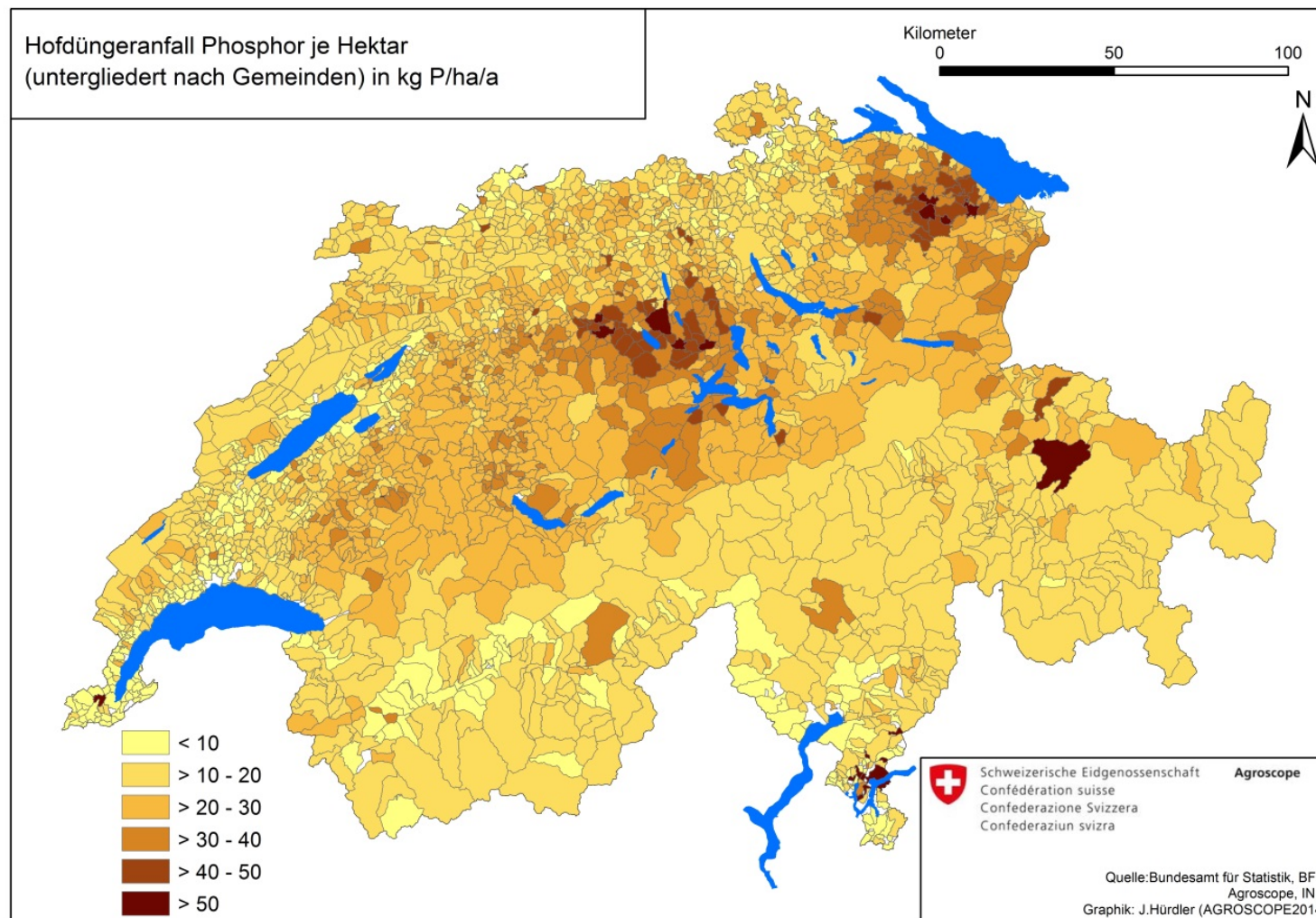


Abbildung 13: Karte des gemeindespezifischen Phosphoranfalls aus Hofdüngern für das Jahr 2010, bezogen auf die düngbare Fläche

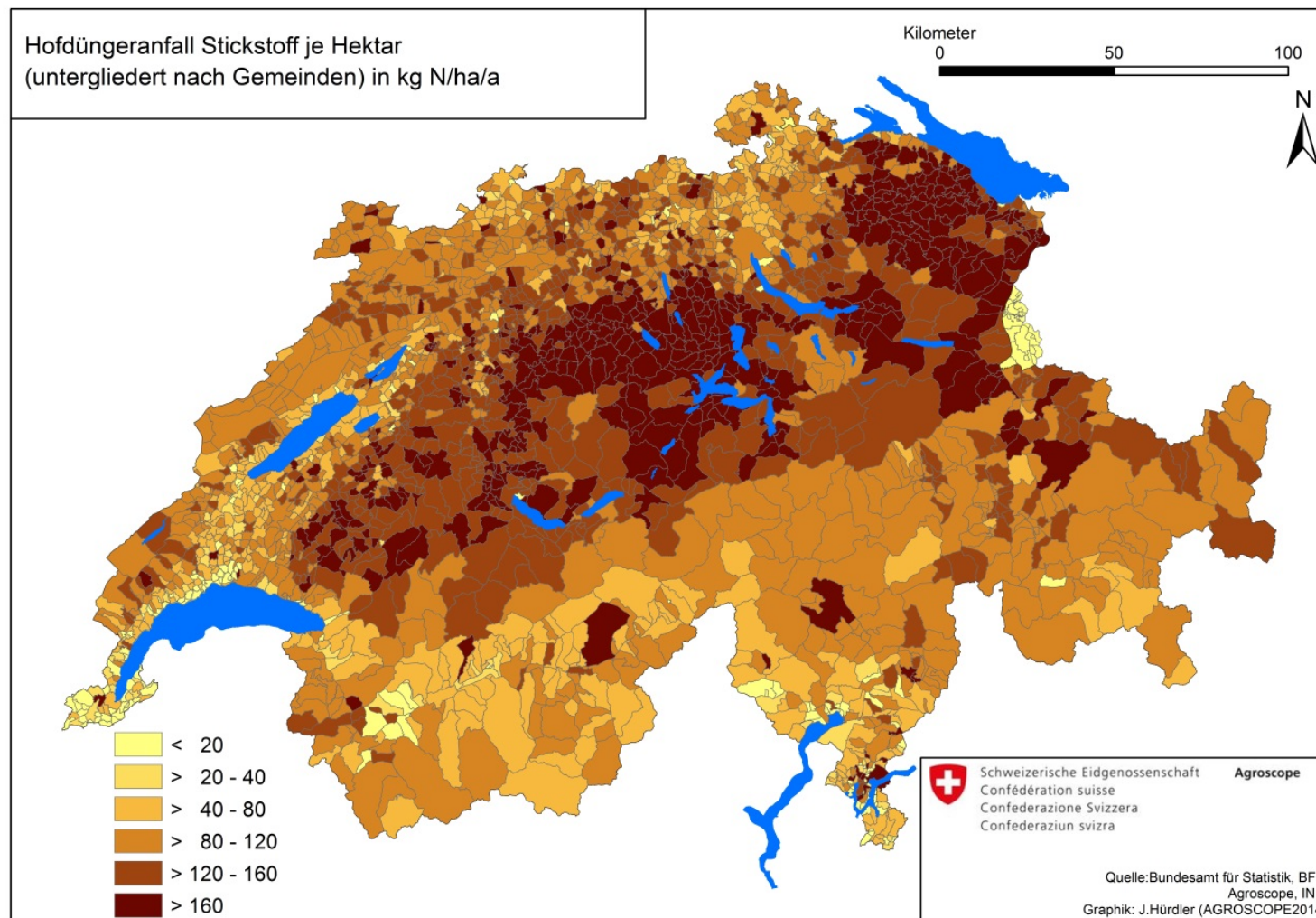


Abbildung 14: Karte des gemeindespezifischen Stickstoffanfalls aus Hofdüngern für das Jahr 2010, bezogen auf die düngbare Fläche

2.1.12 Daten zu Abwasserreinigungsanlagen (ARA) und Regenüberläufen

Das Projekt befasst sich mit den **diffusen** Nährstoffeinträgen in die Gewässer der Schweiz. Für eine Validierung der abgeschätzten diffusen Nährstoffeinträge ist eine Berücksichtigung der punktuellen Nährstoffeinträge aus ARA und Regenentlastungen zwingend notwendig, um an den Pegeln einen umfassenden Eindruck der Nährstofffrachtsituation in den Oberflächengewässern zu erhalten. Daher wurden die Daten zu den Einträgen aus punktuellen Quellen für das Jahr 2010 vom BAFU, Abteilung Wasser, geliefert. Die N-Einträge aus Abwasserreinigungsanlagen (ARA) wurden aus STRÄHL et al. (2013) entnommen, P-Einträge durch eine Abfrage des ARA-Inventars. Ausschlaggebend für die geografische Zuteilung ist der jeweilige ARA-Auslauf ins Gewässer. Da die Frachten aus Regenentlastungen nicht gemessen werden, wurde in Abstimmung mit der Abteilung Wasser (BAFU) eine pauschale Berechnung dieser Frachten vorgenommen. Die Daten für Phosphor sind somit mit gewissen Unsicherheiten behaftet.

2.2 Berechnung mit MODIFFUS 3.0

Die Berechnung der P- und N-Einträge aus diffusen Quellen in die Gewässer erfolgte über das Geoinformationssystem ArcGIS 10.2. Eine grundsätzliche Aufbereitung verschiedener Grundlagendaten (z.B. Hofdüngeranfall, Verteilung intensiv, wenig intensiv und extensiv genutzter Graslandflächen) wurde mit dem Tabellenkalkulationsprogramm EXCEL durchgeführt. Somit entstand für jeden Grundlagendatensatz ein flächendeckendes Raster. Diese Rasterdatensätze wurden durch verschiedene Rechenoptionen, gemäss dem Berechnungsansatz von MODIFFUS 3.0, für jeden Eintragspfad in ArcGIS 10.2 verrechnet.

2.2.1 Modellkonzept

Die letzte Version des Nährstoffeintragsmodells „MODIFFUS“ basierte auf einer rasterbezogenen Mischkalkulation auf Basis von Excel und GIS (PRASUHN & MOHNI 2003). Hierbei wurde aufbauend auf einer für jeden Rasterpunkt gesonderten Ermittlung der potentiellen Abflüsse eine Abschätzung der verschiedenen Wasserflüsse (Oberflächenabfluss, Drainage- und Grundwasserabfluss) für die einzelnen Landnutzungskategorien vorgenommen. Anschliessend wurde die rasterbezogene Abschätzung der Stoffflüsse vorgenommen.

Aktuelle Modellberechnung

Auf Grund der bisher kleinen bis mittleren hydrologischen bzw. administrativen Betrachtungseinheiten waren die Berechnungsschritte mit Hilfe von Excel möglich. Mit dem Schritt zur Berechnung der schweizerischen Gesamtfläche (4'128'500 ha) erfolgt auch ein Anstieg des Datenumfangs. Dies übersteigt den Rahmen einer Berechnung mit Hilfe von Excel (1'048'576 Zeilen) um ein Vierfaches.

Ein neues Modellkonzept (Abb.15) wurde ausgearbeitet. Hierbei wird der Berechnungsfokus auf das Geoinformationssystem (GIS) ArcMap10.2 gelegt. Der Hauptteil der Berechnungen wird im GIS durchgeführt. Mit Hilfe einer geeigneten Geodatenbankstruktur werden Eingangsdaten, Teilergebnisse und Endergebnisse differenziert bereitgehalten. Durch die zwischengeschalteten Berechnungsmodule werden die Grundlagenraster mit Berechnungsfaktoren verrechnet. Diese anpassungsfähigen, eigenständigen Module können jederzeit angepasst werden, wodurch aktuelle Erkenntnisse der Wissenschaft jederzeit berücksichtigt werden können.

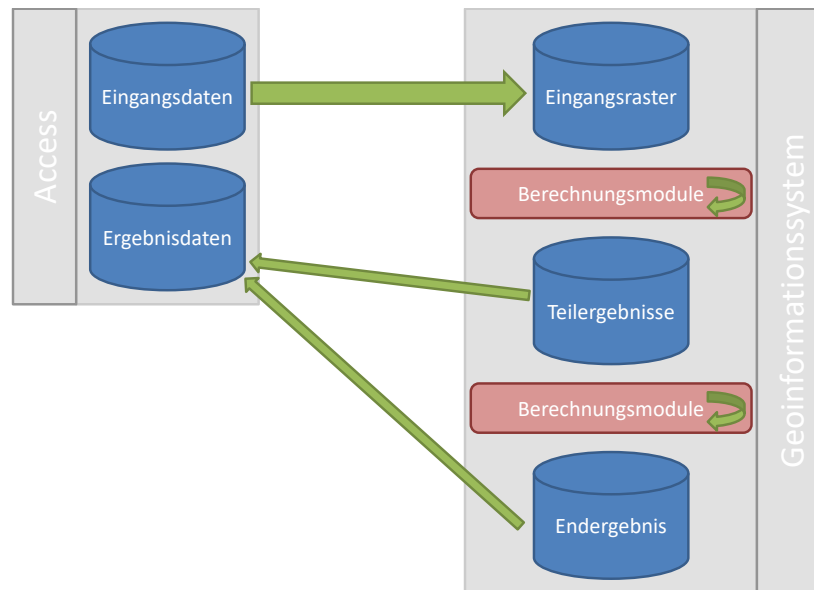


Abbildung 15: Modellkonzept MODIFFUS 3.0

Daten wie Gewässergüte- und Abflussdaten werden in einer Access-Datenbankstruktur bereitgehalten. Es werden auch Endergebnisse in einer eigenständigen Datenbank aufbewahrt, von welcher aus Ergebnisauswertungen und Ergebnisdarstellungen vorgenommen werden können.

Dieses Zweikomponenten-Konzept kann die neu entstanden Möglichkeiten des GIS voll ausschöpfen. Darüber hinaus besteht durch das modulare Konzept die Möglichkeit, auf Änderungen im Klima, in der landwirtschaftlichen Praxis oder in gesetzlichen Vorgaben einzugehen (Szenarienberechnung).

Die den Berechnungen der Wasser- und Stoffflüsse zugrunde liegenden Formeln, Algorithmen und Annahmen entsprechen in vielen Fällen den bisherigen Berechnungen von MODIFFUS nach PRASUHN & MOHNI (2003) und wurden nur dann verändert, wenn begründete neue Erkenntnisse oder neue Grundlagendaten (z.B. Gewässeranschlusskarte) dies notwendig machten.

2.2.2 Berechnung der Wasserflüsse

Der potenzielle Abfluss wurde als atmosphärische Wasserbilanz aus den Eingangsdaten mittlerer Niederschlag 1999 – 2009 (METEOSWISS 2012) und mittlere aktuelle Verdunstung 1999 – 2009 (WSL 2012) bilanziert. Auftretende Abweichungen zu gemessenen Abflüssen an Pegelmessstellen konnten durch Anpassung an einzugsgebietsbezogene Besonderheiten wie Wasserentnahmen und Wasserzugaben durch Wasserkraftwerke, nachgewiesene unterirdische Wasserab- oder -zuflüsse und Wasserentnahmen zur Trinkwassergewinnung nahezu ausgeglichen werden.

Dieser potenzielle Abfluss diene im Folgenden als Grundlage zur Betrachtung der differenzierten diffusen Abflusspfade Oberflächenabfluss, Abfluss über Drainagen und Sickerwasser. Die hierfür notwendigen Schritte werden im Folgenden erläutert.

2.2.2.1 Oberflächenabfluss (= Abfluss über die Geländeoberfläche)

Die Herleitung des Oberflächenabflusses ist in drei Schritte unterteilt, welche die Berücksichtigung der Parameter Landnutzung, Gewässeranschluss und Bodeneigenschaften (Abschwemmungsrisiko) beinhalten. Grundsätzlich wurde durch die Verwendung der Gewässeranschlusskarte (GAK2), deren Anwendungsgebiet die landwirtschaftlich genutzte Fläche in der Talzone, Hügelzone, Bergzone I & II betrifft, eine Generierung von Oberflächenabfluss auf Flächen mit einer Hangneigung von 2 % und mehr angenommen.

Für den **ersten Schritt** wird der potenzielle Abfluss durch eine Parametrisierung der jeweiligen Landnutzungsklassen und deren Auswirkung auf die Generierung von Oberflächenabfluss angepasst. Mit Hilfe der klassifizierten Arealstatistik AS04/09 (MODIFFUS Landnutzungsklassen) konnten landnutzungsbezogene Faktoren für die Oberflächenabflussbildung ausgewiesen werden. In Anlehnung an PRASUHN & MOHNI (2003) wurden die in Tabelle 5 aufgeführten Oberflächenabflusswerte für die Berechnung herangezogen. Dabei wurde unterstellt, dass auf Ackerland und Grasland nur 75 % des Oberflächenabflusses in die Oberflächengewässer gelangt, die übrigen 25 % versickern auf dem Fließweg, bzw. sammeln sich in Mulden und Senken und versickern dort.

Zusätzlich wurde eine Unterscheidung der Strassenflächen in innerorts und ausserorts vorgenommen. Da bei Strassenflächen innerorts eine Versiegelung zu 100 % angenommen wird und die dabei anfallenden oberflächlichen Abflussmengen durch die Kanalisation (Mischkanalisation/Abwasserreinigungsanlagen, bzw. mittels Trennkanalisation) den Oberflächengewässern direkt zugeführt werden, werden sie in diesem Fall als punktuelle Einträge betrachtet. Für die Abflussberechnung fließen sie aber mit einem Faktor von 100 % in die Berechnung ein.

Strassen ausserorts wurden mit einem Faktor von 40 % bei der Berechnung der Oberflächenabflüsse berücksichtigt. In Anlehnung an GUJER (2007) und die Generelle Entwässerungsplanung (GEP) setzen wir für eine Strasse (Asphalt) einen Abflussbeiwert von 0,8 an. Durch die verteilende Spritzwirkung vorbeifahrender Autos wird davon ausgegangen, dass es zu einer starken Verteilung von Wasser, welches sich auf der Strassenoberfläche befindet, kommt. In Folge der Verteilung kann es nicht in die Kanalisation abgeführt werden und unterliegt somit der Versickerung. Es wird davon ausgegangen, dass auf Strassen ausserorts zwischen 40 und 60 % des anfallenden Oberflächenabflusses versickern.

In Anlehnung an PRASUHN & MOHNI (2003) wird bei der Landnutzungs-kategorie Wald ebenfalls eine Unterscheidung vorgenommen. Generell wird davon ausgegangen, dass es auf Grund starker Evapotranspiration und aufnahmefähiger Böden keinen Oberflächenabfluss unter Wald <1200 Meter über NN gibt. Die Unterscheidung anhand der Höhengrenze 1200 Meter

über NN erfolgt durch die Annahme steigender Niederschläge, sinkender Evapotranspiration, karger Böden und geringerer Vegetationsdichte mit zunehmender Höhe. Somit erfolgt die Parametrisierung des Oberflächenabflusswertes von 0 % für Wälder unterhalb der Grenze von 1200 Meter über NN und von 2 % oberhalb dieser Höhengrenze.

Tabelle 5: Faktoren für Oberflächenabfluss. Differenzierung nach MODIFFUS Landnutzungsklassen in Prozent der potentiellen Abflussmenge

MODIFFUS Landnutzungsklasse	Oberflächenabflusswert in %
Ackerland	6
Alpwirtschaftliche Nutzflächen	5
Gartenbau	6
Heimweiden	7
Obstbau	6
Rebbau	6
Grasland	6
Siedlungsgrün	7
Siedlung überbaut	100
Gewässer	100
Unproduktive Vegetation	4
Vegetationslose Flächen	100
Wald ≤ 1200 Meter über NN	0
Wald > 1200 Meter über NN	2
Strassen ausserorts	40
Strassen innerorts	100

Im **zweiten Schritt** wird die Gewässeranschlusskarte (GAK2) in die aktualisierte Nährstoff-eintragsberechnung einbezogen. Die erstmalige Berücksichtigung dieser Informationsquelle ermöglicht eine detaillierte Betrachtung des Potenzials der angesprochenen Flächen. Auf Grund der räumlichen Begrenzung der GAK2 wurde für die landwirtschaftlichen Nutzflächen in Teilen von Graubünden, besonders im Innertal, welche nur in der Bergzone 3 & 4 lokalisiert sind, ein mittlerer Gewässeranschluss pauschal angenommen.

Tabelle 6: Klassifizierung der Gewässeranschlusskarte (GAK2)

Gewässeranschluss- klasse	Klassifizie- rung	Gewässeranschlussfaktor in %
0	Nicht	0
1	niedrig	75
2	Mittel	100
3	Hoch	125

Die Klassifizierung in Tabelle 6 entspricht einer Steigerung des potenziellen Abflusses von einer Fläche mit landwirtschaftlicher Nutzung. In Bereichen, welche mit der Klasse „0“ bedacht sind, wird kein Abfluss erwartet, da hier die Hangneigung unter 2 % ist. Flächen mit der Gewässeranschlussklasse „2“ werden mit einem mittleren Potenzial durch ihren Gewässeranschluss betrachtet, daher werden hier keine Anpassungen der Eingangsdaten mit Hilfe der Gewässeranschlusskarte vorgenommen. Flächen mit der Gewässeranschlussklasse „3“ werden in unseren Berechnungen als „Hotspot“-Gebiete betrachtet. Diesem herausragenden Status wird mit einer 25 %igen Steigerung des berechneten Oberflächenabflusses Rechnung getragen.

Mit Hilfe des **dritten Schritts** wird der Einfluss der Bodeneigenschaften auf den Oberflächenabfluss berücksichtigt. Hierfür wird das Abschwemmungsrisiko der Böden in die Berechnung des Oberflächenabflusses einbezogen. Die landwirtschaftlich genutzten Böden der Schweiz weisen hauptsächlich ein mässiges (Klasse 2) Abschwemmungsrisiko auf (Abb. 16). Allerdings sind besonders Böden in den Alpen und an den Jurahängen durch ein erhöhtes Abschwemmungsrisiko geprägt. Um einer Verzerrung der Erhebung, begründet durch die höhere Praktikabilität von Feldmessungen in Regionen mit geringerem Abschwemmungsrisiko entgegen zu wirken, werden die bisher im Feld ermittelten Oberflächenabflusswerte der Abschwemmungsrisikoklasse 3 zugeordnet.

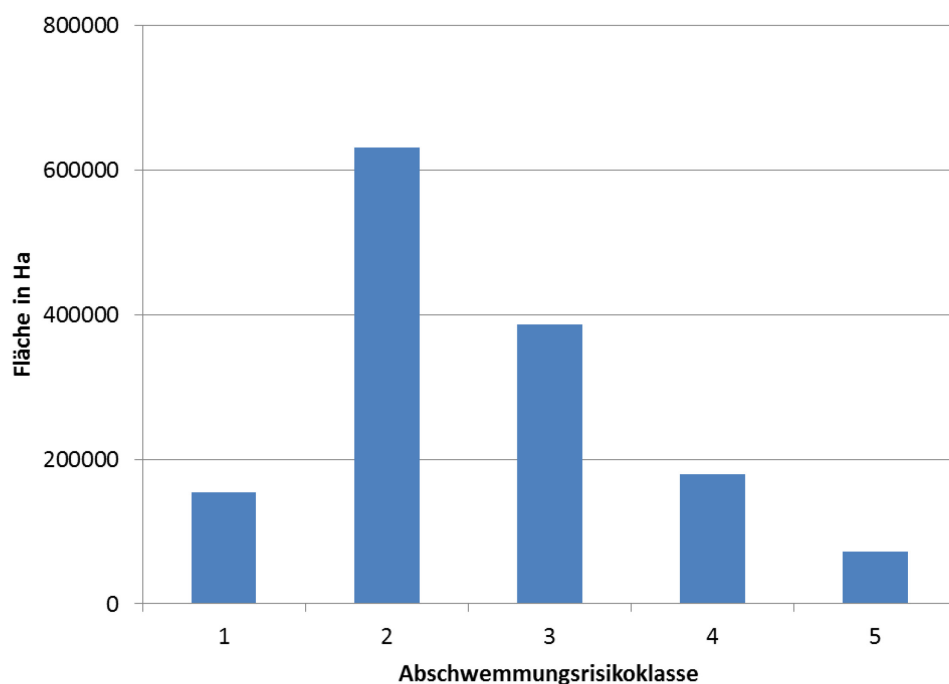


Abbildung 16: Verteilung der Abschwemmungsrisiken auf Böden der landwirtschaftlich genutzten Fläche in der Schweiz

Das ergibt für die Anpassungsfaktoren eine Gleichverteilung zu den Seiten mit erhöhtem Risiko und geringerem Risiko (Tab. 7). Für die Risikoklasse 1 wurde der Oberflächenabfluss um 20 % verringert, für die Risikoklasse 2 nur um 10 %. Um 10 % wurde der Oberflächenabfluss erhöht für die Risikoklasse 4 und eine 20 %ige Steigerung erfahren Gebiete, welche durch die Risikoklasse 5 charakterisiert werden.

Tabelle 7: Verteilung der Anpassungsfaktoren bezogen auf das Abschwemmungsrisiko

Abschwemmungsrisikoklasse	Klassenbezeichnung	Anpassungsfaktor in %
1	gering	80
2	mässig	90
3	mässig hoch	100
4	hoch	110
5	sehr hoch	120

2.2.2.2 *Drainageabfluss (Abfluss aus geschlossenen künstlichen Drainagen)*

Drainageabflüsse werden nur für Bereiche angenommen, in denen anhand der neu erstellten Drainagekarte der Schweiz eine Drainage ausgewiesen wurde. Grundsätzlich beruht die Abschätzung der Abflussmengen durch Drainagen auf den Literaturangaben in PRASUHN & BRAUN (1994). Wie bei PRASUHN & MOHNI (2003) wurden aber die Drainageabflussmengen mit Hilfe einer linearen Beziehung in Abhängigkeit von der Sickerwassermenge je Hektar modifiziert. Somit gelangen in den drainierten Gebieten zwischen 58 % und 86 % des Sickerwassers je Hektar durch Drainagen in die Fliessgewässer.

2.2.2.3 *Zwischenabfluss, Quellenabfluss und Grundwasserabfluss (Sickerwasser)*

Die totale Sickerwassermenge wird als Summe von Zwischenabfluss, Quellenabfluss und Grundwasserabfluss berechnet, da es keine quantitativen Angaben zum Verhältnis dieser Abflussformen gibt. Eine Grundwassermodellierung ist nicht Bestandteil dieses Projektes, somit wird das Sickerwasser analog zu PRASUHN & BRAUN (1994) berechnet (siehe auch BEHRENDT et al. 1999, 2003). Hierbei errechnet sich die totale Sickerwassermenge aus der Differenz zwischen der potenziellen Abflussmenge und der Summe aus Oberflächenabfluss und Drainageabfluss.

2.2.2.4 *Natürliche Hintergrundlast*

Bei der Berechnung der Wasserflüsse der natürlichen Hintergrundlast wurde davon ausgegangen, dass in allen Einzugsgebieten die potenziell natürliche Vegetation bis zur Waldgrenze Wald ist. Neben Wald existieren noch wenige Flächen mit unproduktiver Vegetation, die vegetationslosen Flächen sowie die Gewässer. Durch das Retentionsverhalten des Waldes (grössere Evapotranspiration) gelangt insgesamt weniger Wasser zum Abfluss.

2.2.3 Berechnung der Stoffflüsse

2.2.3.1 Nährstoffeinträge durch Abschwemmung

Unter Abschwemmung wird der Transport von nicht an Bodenpartikel gebundenen Nährstoffen mit dem auf der Bodenoberfläche abfließenden Wasser verstanden, unabhängig davon, ob Bodenerosion stattfindet oder nicht. Dabei werden vor allem Nährstoffe abgeschwemmt, die sich in der obersten Bodenschicht oder nach einem Düngeraustrag auf der Boden- und Pflanzenoberfläche befinden. Die im Niederschlag selbst enthaltenen Nährstoffe tragen ebenfalls zu diesen Nährstoffeinträgen bei.

P-Abschwemmung

Bei der Berechnung der P-Abschwemmung wurde in Anlehnung an Literaturwerte zunächst eine mittlere P-Abschwemmungskonzentration pro Landnutzungskategorie für das Untersuchungsgebiet festgelegt (Tab. 8):

Tabelle 8: Nutzungsspezifischer Ausgangswert für die Berechnung der P-Abschwemmung (mg P/l)

Landnutzungskategorie	Mittelwert mg P/l
vegetationslose Flächen	Konzentration im Niederschlag / 5
Wald	Konzentration im Niederschlag * 2
unproduktive Vegetation	Konzentration im Niederschlag * 2
Strassen und Wege ausserorts	Konzentration im Niederschlag * 2
alpwirtschaftliche Nutzflächen	Konzentration im Niederschlag * 8
extensive Wiesen und Weiden	Konzentration im Niederschlag * 8
wenig intensive Wiesen	0.6
Dauerwiesen und Heimweiden	1.2
Obstbau	1.2
Kunstwiesen	1.2
offenes Ackerland	0.8
Rebbau	0.8
Gartenbau	0.8

Die aufgeführten Mittelwerte wurden als Ausgangswerte flächendeckend für das ganze Untersuchungsgebiet verwendet und mit folgenden Korrekturfaktoren regional angepasst:

$$\begin{aligned} &\text{Phosphorausgangswert (mg P/l)} \times \text{Niederschlagskonzentrationsfaktor} \\ &\quad \times \text{Hofdüngereffizienzfaktor} \\ &\quad \times \text{P-Testzahlfaktor} \\ &\quad \times \text{Graslandintensitätsfaktor} \\ &\quad \times \text{Ackerlandintensitätsfaktor} \\ &= \text{Phosphorkonzentration (mg P/l)} \end{aligned}$$

Die berechneten Konzentrationen wurden mit dem jeweiligen berechneten Oberflächenabflussmengen verrechnet. Gewässeranschluss und Bodeneigenschaften wurden bereits bei der Berechnung der Oberflächenabflussbildung berücksichtigt.

Niederschlagskonzentrationsfaktor:

Für ungedüngte oder wenig gedüngte Flächen (Wald, extensive Wiesen und Weiden, alpwirtschaftliche Nutzfläche, unproduktive Vegetation, Strassen und Wege ausserorts, vegetationslose Flächen) wurde ausschliesslich die berechnete P-Konzentration im Niederschlag der jeweiligen Fläche aus Tabelle 8 herangezogen. Für die anderen, gedüngten Flächen wurde pro Gebiet ein Niederschlagskonzentrationsfaktor in Abhängigkeit von der Höhe der regionsspezifischen P-Niederschlagskonzentration (Tab. 9) berechnet. Die hierfür genutzten Konzentrationen im Niederschlag wurden PRASUHN & BRAUN (1994) entnommen, aber um 10 % gegenüber 1994 reduziert, wegen verbesserter Anbaumethoden in der Landwirtschaft und verbesserten Filteranlagen.

Tabelle 9: Regionsspezifische Niederschlagskonzentration der P-Deposition

Bioregion	mg P/l
Jura	0.032
Mittelland	0.036
Voralpine Region	0.029
Alpine Region	0.022

Hofdüngerfaktor:

Es wird davon ausgegangen, dass mit zunehmendem Hofdüngeranfall das P-Abschwemmungsrisiko steigt. Der Hofdüngerfaktor wird nur auf Dauerwiesen, Heimweiden, Obstbau und Kunstwiesen angewendet und bezieht sich auf den gemeindespezifischen Hofdüngeranfall in kg P/ha, der anhand der Tierzahlen der Betriebszählungsdaten (BFS 2013a) für die düngbare Fläche berechnet wurde. Die berechneten Faktoren schwanken zwischen 1 und 1.2, da eine Düngung mit Hofdüngern immer ein Mehr an Nährstoffinput darstellt.

P-Testzahlfaktor:

Es wird angenommen, dass der pflanzenverfügbare P-Gehalt im Oberboden einen Einfluss auf die Höhe der P-Abschwemmung hat, da mit zunehmendem P-Gehalt an der Bodenoberfläche die P-Konzentration im Oberflächenabfluss steigt. Da zum Zeitpunkt der Berechnungen keine Angaben zu P-Testzahlen auf schweizweiter Ebene gemacht werden konnten, wurde ein gemeindespezifischer P-Testzahlfaktor in Abhängigkeit der Hofdüngermenge abgeleitet. Der P-Testzahlfaktor wird bei den Dauerwiesen, Heimweiden, Kunstwiesen und Ackerland eingesetzt. Die Gewichtung liegt bei 1 bis 1.3.

Graslandintensitätsfaktor:

Auf extensiv und wenig intensiv genutztem Grasland wird mit einer geringeren P-Abschwemmung gerechnet als auf intensiv genutztem Grasland. Es wurde der prozentuale Anteil an extensiven Wiesen und Weiden sowie wenig intensiven Wiesen an den Dauerwiesen aus den Betriebszählungsdaten (BFS 2013a) für jede Gemeinde berechnet und mit den entsprechenden Konzentrationswerten aus obiger Tabelle verrechnet. Da die Lage der extensiven und wenig intensiven Flächen nicht bekannt ist, wird die berechnete mittlere P-Konzentration auf die gesamte Dauerwiesenfläche jeder Gemeinde umgelegt.

Ackerlandintensitätsfaktor:

Es wird davon ausgegangen, dass auf offenem Ackerland im Mittel weniger Hofdünger ausgebracht werden als auf Kunstwiesen, und dass es auf offenem Ackerland eher zu Boden-erosion kommt als auf Kunstwiesen. So wird ein Teil des abgeschwemmten P an Bodenpartikel gebunden und mit dem Erosionsmaterial ausgetragen. Daher wurde der Anteil an Kunstwiesen am gesamten Ackerland aus Betriebszählungsdaten (BFS 2013a) für jede Gemeinde berechnet und mit dem entsprechenden Konzentrationswert aus obiger Tabelle verrechnet. Da die Lage der Kunstwiesen nicht bekannt ist bzw. von Jahr zu Jahr wechselt, wird die berechnete mittlere P-Konzentration auf die gesamte Ackerfläche jeder Gemeinde umgelegt.

N-Abschwemmung:

Bei der Berechnung der N-Abschwemmung wurde aus den Daten der N-Depositionskarte (Abb. 4) und der Niederschlagskarte (Abb. 2) eine landnutzungsspezifische mittlere N-Konzentration im Niederschlag abgeleitet. Die Angaben in Tab. 10 geben nur einen groben Überblick. In MODIFFUS erfolgte eine genaue Berechnung pro Rasterzelle. Die berechneten Konzentrationen wurden dann mit den jeweiligen berechneten Oberflächenabflussmengen verrechnet. Gewässeranschluss und Bodeneigenschaften wurden bereits bei der Berechnung der Oberflächenabflussbildung berücksichtigt.

Tabelle 10: Nutzungsspezifischer Ausgangswert für die Berechnung der N-Abschwemmung (mg N/l) und die mittlere Nutzungsspezifische N-Deposition (kg N/ha)

Landnutzungskategorie MODIFFUS 3.0	Mittlere N-Konzentration (mg/l)	Mittlere Gesamtdeposition (kg/ha)
Ackerland	2.06	23.5
Alpwirtschaftliche Nutzflächen	0.87	13.4
Gartenbau	1.96	22.4
Heimweiden	2.00	25.8
Obstbau	2.15	24.5
Rebbau	1.69	17.1
Grasland extensiv	1.02	14.0
Grasland intensiv	1.87	25.1
Siedlungsgrün	1.80	21.5
Siedlung überbaut	1.79	21.4
Gewässer	1.28	15.4
Unproduktive Vegetation	0.76	11.2
Vegetationslose Flächen	0.48	7.6
Strassen ausserorts	1.80	22.6
Strassen innerorts	1.80	21.2
Wald <= 1200 Meter über NN	1.83	24.1
Wald > 1200 Meter über NN	1.04	15.1

2.2.3.2 Nährstoffeinträge durch Erosion

Bodenerosion auf Ackerland

Unter Bodenerosion wird der Abtrag des Bodens durch Wasser auf Ackerland (inkl. Wein- und Gartenbau) verstanden. Die Höhe der potentiellen Bodenerosion wurde der Erosionsrisikokarte ERK2 entnommen. Diese ist unter Berücksichtigung der Hangneigung, sowie –länge, Niederschlagsverhältnisse und der Bodeneigenschaften entstanden.

Die beeinflussenden Faktoren für die potentielle Erosion zeichnen sich durch ein über die Zeit relativ gleichbleibendes Verhalten aus. Um die realen Bedingungen abzudecken, ist eine Berücksichtigung der anthropogenen Beeinflussung nötig.

Hierfür fliessen in die Berechnung C-Faktoren ein, welche die aktuelle Landnutzung, Bodenbearbeitung und -bewirtschaftung berücksichtigen. Die kulturspezifischen C-Faktoren (Tab. 11) wurden aus den Datensätzen der einzelnen Anbauparzellen der Jahre 2009-2012 des AUI-Betriebsnetzes (ca. 300 Betriebe) für diese Arbeit neu abgeleitet. Sie beziehen sich jeweils auf 365 Tage und umfassen somit auch Phasen der Vorkultur sowie die Winternutzung. Ebenfalls berücksichtigt sind die von den jeweiligen Betrieben eingesetzten Bodenbearbeitungsverfahren (Pflug, Mulchsaat, Direktsaat etc.).

Tabelle 11: C-Faktoren für verschiedene Kulturen gemäss Betriebszählungskategorien

Ackerfrucht	C-Faktor
Sommergerste	0.085
Wintergerste	0.060
Hafer	0.092
Triticale	0.063
Mischel Futtergetreide	0.076
Futterweizen	0.099
Körnermais	0.203
Emmer Einkorn	0.115
Sommerweizen (ohne Futterweizen swiss granum)	0.119
Winterweizen (ohne Futterweizen swiss granum)	0.122
Roggen	0.054
Mischel Brotgetreide	0.088
Dinkel	0.115
Saatmais	0.237
Silo- & Grünmais	0.186
Zuckerrüben	0.174
Futterrüben	0.150
Kartoffeln	0.223
Pflanzkartoffeln	0.294
Sommerraps Speiseölgewinnung	0.064
Winterraps Speiseölgewinnung	0.064
Soja	0.211
Sonnenblumen Speiseölgewinnung	0.181
Hanf	0.084

Hanf (THC-arme)	0.082
Lein	0.100
Hanf (nach BLW & UE)	0.082
Ackerbohnen	0.092
Eiweisserbsen	0.088
Lupinen	0.102
Ölkürbisse	0.400
Tabak	0.164
Hirse	0.081
Gemüse	0.400
Einjährige Beeren	0.100
Einjährige nachwachsende Rohstoffe	0.100
Einjährige Gewürz- & Medizinalpflanzen	0.100
Einjährige gärtnerische Freilandkulturen	0.100
Buntbrache	0.030
Rotationsbrache	0.100
Saum auf Ackerfläche	0.030
Phacelia für Samenproduktion	0.100
Übrige Kultur für Samenproduktion	0.100
Sommerraps nachwachsender Rohstoff	0.064
Winterraps nachwachsender Rohstoff	0.070
Sonnenblumen nachwachsender Rohstoff	0.191
Übrige offene Ackerfläche beitragsberechtigt	0.100
Übrige offene Ackerfläche nicht beitragsberechtigt	0.100
Kunstwiesen	0.010

Da über die Arealstatistik keine kulturspezifische Differenzierung der Ackerlandfläche vorgenommen werden kann, musste ein gewichteter gemeindespezifischer C-Faktor gebildet werden. Über die Betriebszählungsdaten (BFS 2013a) konnten flächengewichtete C-Faktoren anhand der verschiedenen Kulturen für jede Gemeinde gebildet werden. Diese wurden mit der potenziellen Erosion aus der ERK2 verrechnet und ergaben eine reale Erosion.

Sonstige Erosion

Neben der Bodenerosion auf Ackerland findet auf allen anderen Flächen – mit Ausnahme von versiegelten Flächen (überbaute Siedlungsflächen, Strassen und Wege innerorts) oder stehenden Gewässern – zusätzliche sonstige Erosion statt. Diese umfasst eine mehr oder weniger natürliche Erosion (vgl. PRASUHN & BRAUN 1994). Die Erosionsabschätzung erfolgt in Abhängigkeit der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge der betreffenden Hektare. Da bei der Abschätzung eine Abhängigkeit von extrem hohen bzw. extrem niedrigen mittleren Jahresniederschlagsmengen vermieden werden musste, wurde eine Analyse der Perzentil-Verteilung der mittleren Jahresniederschlagsmengen vorgenommen. Die Begrenzung für die sonstige Erosion auf ein Effektminimum und Effektmaximum wurde bei den Perzentilen 21 % (1182 mm/Jahr) als Effektminimum und bei 45 % (1971 mm/Jahr) als Effektmaximum gesetzt (Abb. 17). Für eine einheitliche Begrenzung wurden die Werte 1200 mm/Jahr als Minimum und 2000 mm/Jahr als Maximum gewählt. Dieser Wertebereich umfasst ~56 % der Schweizer Landesfläche.

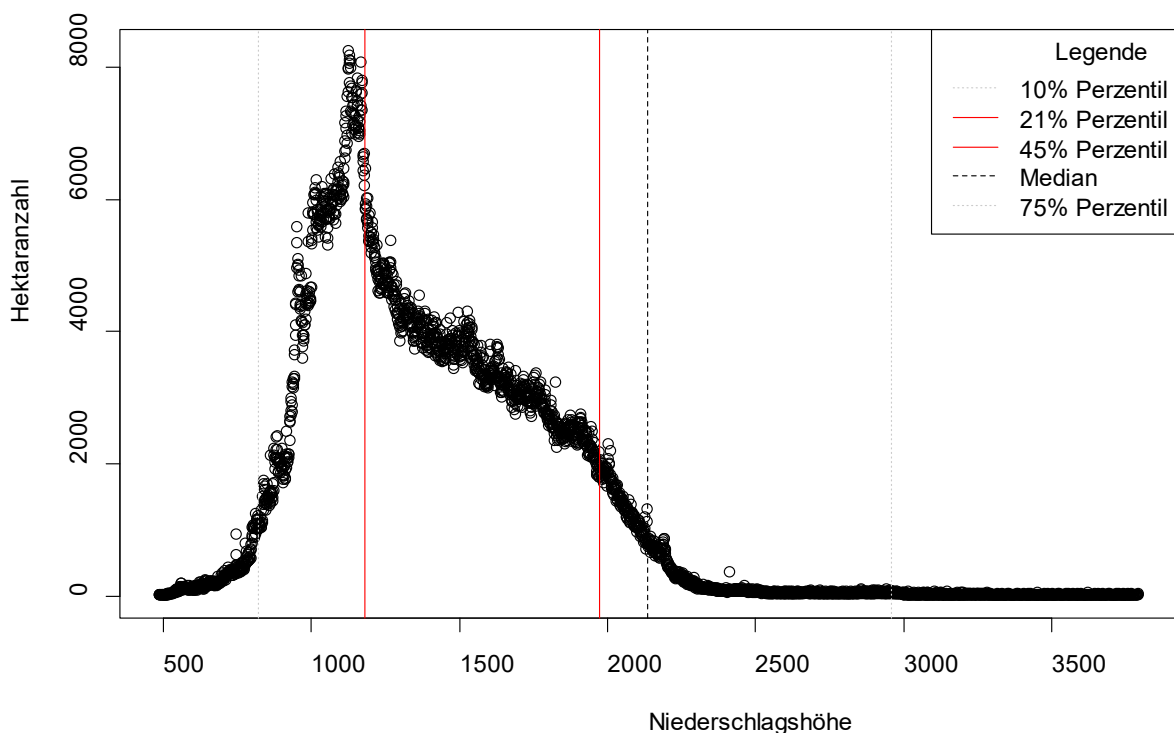


Abbildung 17: Hektarbasierte Niederschlagsverteilung der Schweiz als Grundlage für die Abschätzung der sonstigen Erosion

Die Gebiete mit einem geringeren Niederschlagswert (≤ 1200 mm/Jahr) werden mit dem niedrigsten Wert der sonstigen Erosion gleichbleibend belegt, das gleiche Verfahren wird für die Gebiete mit einem höheren Niederschlagswert als das Effektmaximum (≥ 2000 mm/Jahr) angewendet. Hier wird den Gebieten der höchste Wert der sonstigen Erosion gleichbleibend vergeben.

Die mittlere Sonstige Erosion auf Gletschern oder Firnflächen beträgt nach der Erosionsabschätzung unter Berücksichtigung der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge 2,83 t/ha/Jahr (siehe Tab. 12). Im Vergleich zum flächengewichteten Wert für sonstige Erosion in der gesamten Schweiz (0,92 t/ha/Jahr) ist dieser Wert 3 mal so hoch. Hier zeigt sich schon die grosse Bedeutung von Gletscherflächen für partikuläre Stoffverluste.

Tabelle 12: Abgeleitete mittlere Sonstige Erosion (t/ha/Jahr) für vegetationslose Flächen in der Schweiz

Code Arealstatistik	Bezeichnung	Fläche in Ha	Min	Max	Mittel
69	Fels	204953	0.052	4.65	2.27
70	Geröll und Sand	260631	0.052	4.65	1.78
72	Gletscher und Firn	114262	0.052	4.65	2.83

Zwischen den Effektextremwerten wurde ein exponentieller Ansatz verwendet um die Entwicklung der Sonstigen Erosion in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge zu gewichten (Abb. 18).

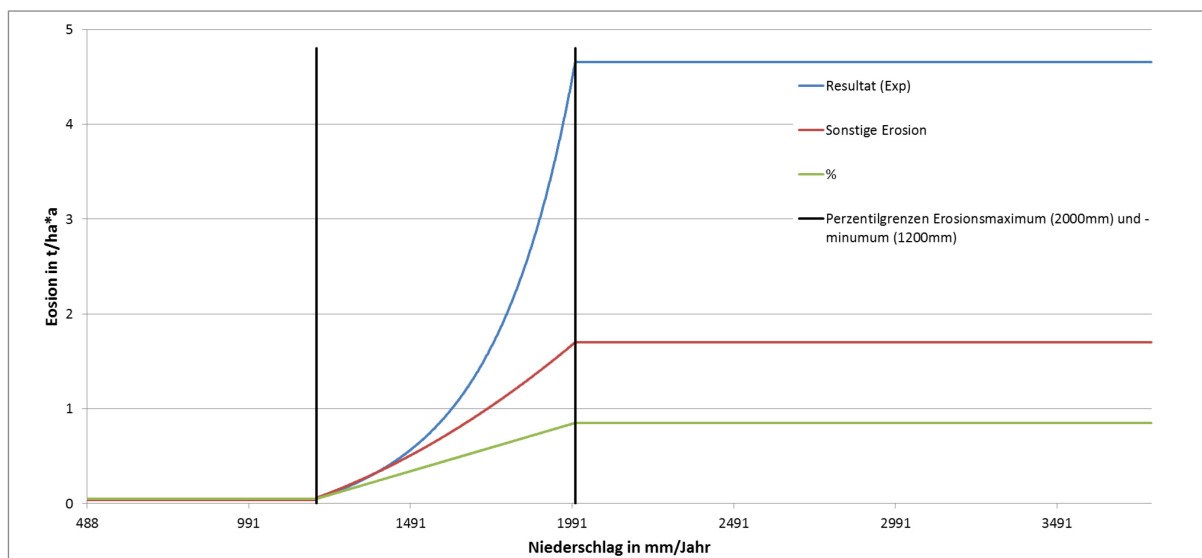


Abbildung 18: Abschätzung der sonstigen Erosion in Abhängigkeit von der jährlichen Niederschlagsmenge

In Verschiedenen Studien wurde aber festgestellt, dass in Einzugsgebieten, welche durch Gletscher geprägt sind, entschieden höhere Schwebstofffrachten gemessen werden (ZESSNER et al. 2011). In Österreich wurden für von Gletschern geprägte Flächen eine Modellierungspauschale von 35 t/ha * Jahr erodiertes Material angenommen. Dieser Wert übersteigt den mittleren Wert für offene Gebirgsflächen um das 8.75 fache. Nimmt man diesen Wert auch für die von Gletschern geprägten Flächen in den Schweizer Alpen an, kommt man auf einen Wert von 24.76 t/ha/Jahr. In Anbetracht des zunehmenden Gletscherrückgangs (Klimawandel) und des schleppenden nachwachsen von fixierender Vegetation ist ein erhöhter Erosionswert für die von Gletschern geprägten Flächen anzunehmen und daher auch vertretbar. Daher wird für diese Flächen von 25 t/ha/Jahr erodiertem Material ausgegangen.

Erosionsmaterialeintrag in Gewässer

Generell gelangt nur ein geringer Anteil des erodierten Bodenmaterials in die Oberflächengewässer. Mit Hilfe der GAK2 ist es gelungen, den Gewässeranschluss des jeweiligen Hektar-rasters zu bestimmen und eine Verfrachtung des erodierten Bodenmaterials in Abhängigkeit der regionalen Gegebenheiten zu bewerten. Die differenzierte Berücksichtigung des Eintrags erodierten Materials schlüsselt sich in Abhängigkeit der Klassifizierung (Abb. 12) des potenziellen Gewässeranschlusses (niedrig = 10 %; mittel = 20 %; hoch = 30 %) auf.

2.2.3.3 Nährstoffgehalt des erodierten Bodenmaterials

Angaben über P-Gesamtgehalte von Oberböden unter landwirtschaftlicher Nutzung liegen in der Schweiz nur vereinzelt vor (Zusammenstellung von Daten siehe PRASUHN & MOHNI 2003). Verschiedene neuere Datensätze liegen in der gleichen Grössenordnung. Auch wenn die Mittelwerte in den aufgeführten Untersuchungen meist zwischen 900 und 1'000 mg P/kg Boden liegen, ergeben sich für Einzelwerte sehr grosse Spannweiten. LINDENTHAL (2000) zeigt für Österreich, dass die P-Gehalte eine starke räumliche Heterogenität in Abhängigkeit von Geologie und Nutzung aufweisen, was eine kleinräumig differenzierte Betrachtung erfordern würde. Dies ist für das Untersuchungsgebiet nicht möglich. Daher wurde für alle Ackerböden im Untersuchungsgebiet ein mittlerer P-Gehalt des Oberbodens von 960 mg/kg in Anlehnung an PRASUHN & GRÜNIG (2001) verwendet. Eine regionale Differenzierung erfolgt über den P-Testzahlfaktor.

Es lagen keine flächendeckenden Werte zur P-Versorgung der Böden vor. Daher wurde ein P-Testzahlfaktor in Abhängigkeit der Hofdüngermenge je Gemeinde abgeleitet. Der P-Testzahlfaktor wird bei den Dauerwiesen, Heimweiden, Kunstwiesen und Ackerland eingesetzt. Die Gewichtung liegt bei 1 bis 1.3.

Somit wurden für die Ackerböden der einzelnen Gemeinden P-Gehalte zwischen 960 und 1'248 mg P/kg Boden und für alle Gebiete ein N-Gehalt von 2'000 mg N/kg Boden angenommen. Tendenziell ist mit einer Zunahme der P-Gesamtgehalte im Boden gegenüber den Werten von Prasuhn & Braun (1994) zu rechnen, da aufgrund weiterhin bestehender P-Überschüsse mit einer P-Anreicherung im Oberboden zu rechnen ist (PRASUHN & GRÜNIG 2001).

Für den Nährstoffgehalt des Materials aus der sonstigen Erosion wurde analog zu PRASUHN & BRAUN (1994), PRASUHN et al. (1996), PRASUHN & MOHNI (2003) ein Gehalt von 300 mg P/kg (Kalkstein & Dolomit) bis 400 mg P/kg (sonstige Gesteinsgruppen) und 600 mg N/kg bis 1'500 mg N/kg zu Grunde gelegt (Tab. 13), darüber hinaus wurde eine Unterteilung der unproduktiven Flächen in den Alpen vorgenommen.

Tabelle 13: Angenommener Stickstoffgehalt im Oberboden

Biogeografische Regionen	mg N/kg
Jura	1'000
Mittelland	1'500
Alpen	600
Alpen (Geröll, Sand, Fels)	150
Alpen (Gletscher)	100

Für die P-Anreicherung im Erosionsmaterial wurde einheitlich wie schon bei PRASUHN & MOHNI (2003) ein Faktor von 1.86 nach WILKE & SCHAUB (1996) verwendet. Bei Materialeinträgen durch sonstige Erosion wird keine Anreicherung angenommen.

2.2.3.4 Nährstoffeinträge durch Auswaschung

Nitratauswaschung:

Für die Berechnung der Nitratauswaschung wurde ein neuer Modellansatz konzipiert, der die geographischen und ökologischen Besonderheiten der gesamten Schweiz berücksichtigt. Die Werte sind daher nur bedingt vergleichbar mit den Resultaten der Berichte für den Kt. Bern (PRASUHN & MOHNI 2003) oder für den Kt. Zürich (SCHMID & PRASUHN 2000).

Berechnung der nutzungsspezifischen N-Auswaschung

In Anlehnung an Literaturwerte wurde zunächst ein **Nitratausgangswert** (kg N/ha) pro Landnutzungskategorie für das Untersuchungsgebiet festgelegt (Tab. 14):

Tabelle 14: Nutzungsspezifischer Ausgangsmittelwert für die Berechnung der Nitratauswaschung (kg N/ha)

Landnutzungskategorie	Ausgangsmittelwert (kg N/ha)
Wald	5.5
Unproduktive Vegetation	6.5
Strassen Ausserorts	9
Dauerwiesen	13
Heimweiden	Unterteilt nach Lage (Berg (15-20)/ Tal (20-25)) und Intensität der Nutzung
alpwirtschaftliche Nutzfläche	13
Siedlungsgrünflächen	25
Obstbau	13
Rebbau	30
Gartenbau	45
Ackerland	Nitratmatrix

Beim Ackerland konnte aufgrund der grossen Unterschiede zwischen den Kulturen kein einheitlicher Ausgangswert für die Nitratauswaschung verwendet werden, sondern es mussten kulturspezifische Nitratausgangswerte entwickelt werden. In einem ersten Schritt wurden die Resultate aller praxisrelevanten Verfahren von schweizerischen Lysimeterversuchen der letzten vier Jahrzehnte zusammengestellt. Die N-Mengen, die unter den Kulturkombinationen (Hauptkultur des aktuellen Jahres mit eventueller Zwischenkultur und Nachkultur im Folgejahr) im Zeitabschnitt zwischen Juli des aktuellen Jahres und Juni des folgenden Jahres ausgewaschen worden waren, dienten zur Ableitung von durchschnittlichen Ausgangswerten für Kulturkombinationen, die in einer so genannten Nitratmatrix (Version 14.1; PRASUHN & SPIESS 2003) angeordnet wurden. Dieses Vorgehen wurde gewählt, weil verschiedene Lysimeterversuche gezeigt hatten, dass die ausgewaschene Nitratmenge nicht einer einzelnen Kultur zugeordnet werden kann und dass die Kulturübergänge bedeutend sind für die Höhe der Nitratauswaschung (NIEVERGELT 2002; STAUFFER & SPIESS 2001).

Vielen der über 400 möglichen Kulturkombinationen (mit oder ohne Zwischenkultur) konnte ein aus Lysimeterversuchen abgeleiteter, durchschnittlicher Nitratauswaschungswert zugewiesen werden, der überwiegende Teil musste jedoch anhand von Analogieschlüssen von ähnlichen Kulturkombinationen sowie von Literaturwerten abgeschätzt werden.

Da gesamtschweizerisch nur die Flächen der Ackerkulturen erhoben werden und nicht die Häufigkeit der verschiedenen Kulturkombinationen, konnten die Werte der Nitratmatrix nicht direkt für die Berechnung der Nitratauswaschung verwendet werden. In einem zweiten Schritt musste deshalb ein kulturspezifischer Ausgangswert aus den Werten für die Kulturkombinationen abgeleitet werden, indem abgeschätzt wurde, welche Nachkulturen wie häufig auf eine bestimmte Kultur folgen.

Neuere Untersuchungen zeigen, dass unter Weidenutzung je nach Lage und Intensität der Nutzung erhebliche N-Mengen ausgewaschen werden können. Daher wurde für MODIFFUS 3.0 ein neuer Ansatz entwickelt. Für die Heimweiden wurde eine Differenzierung nach Lage, ob sich die Heimweide in Regionen über 1000 m Höhe oder unter 1000 m Höhe befinden, und Intensität der Nutzung vorgenommen (Tab.14).

Die aufgeführten Mittelwerte wurden als Ausgangswerte flächendeckend für die jeweilige Landnutzungskategorie im gesamten Untersuchungsgebiet verwendet. Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich über mehrere geographische Regionen mit grossen Unterschieden bezüglich verschiedener Standortfaktoren (z.B. Sickerwassermenge von 0 bis 2'790mm, Höhenlage von 192 - über 4'590 m etc.) und Bewirtschaftungsfaktoren. Entsprechend erhält jede Hektare einen Nitratausgangswert, der mit folgenden Korrekturfaktoren regional angepasst wird:

$$\begin{aligned} &\text{Nitratausgangswert (kg N/ha)} \\ &\quad \times \text{Sickerwasserfaktor} \\ &\quad \times \text{Höhenfaktor} \\ &\quad \times \text{Bodenfaktor} \\ &\quad \times \text{Hofdüngerfaktor} \\ &\quad \times \text{Graslandintensitätsfaktor} \\ &\quad \times \text{Denitrifikationsfaktor} \\ &\quad \times \text{Drainagefaktor} \\ &\quad = \text{Nitratfracht (kg N/ha)} \end{aligned}$$

Sickerwasserfaktor:

Der Sickerwasserfaktor wird für alle Nutzungskategorien hektarweise angewandt und berechnet die Ausgangsfracht in Abhängigkeit von der Sickerwassermenge. Es wird davon ausgegangen, dass mit zunehmender Sickerwassermenge die Auswaschung – trotz Verdünnungseffekte – leicht zunimmt. Die Gewichtung des Sickerwassereinflusses wurde auf 20 % festgelegt. Somit ergibt sich eine Reduktion des Ausgangswertes von 10 % bei 200 mm Sickerwasser (Faktor 0.9) und einen Zuschlag von 10 % bei 2'000 mm Sickerwasser (Faktor 1.1).

Höhenfaktor:

Die Gebietshöhe wirkt sich auf die anthropogene Luftverschmutzung und über die Temperatur auf die Dauer der Vegetationszeit, auf die mineralisierte N-Menge, den Pflanzenentzug und die Denitrifikation aus. Mit zunehmender Gebietshöhe wird daher die Nitratauswaschung abnehmen. Es wurde eine lineare Beziehung zugrunde gelegt. Da die Höhenunterschiede im Untersuchungsgebiet mit über 4'000 m Höhendifferenz sehr gross sind, wurde die Gewichtung

des Höhenfaktors sehr hoch angesetzt. Es ergeben sich folgende Faktoren, die hektarweise für alle Nutzungskategorien berechnet werden: 1.2 bei < 260 m ü.M. und 0.2 bei > 2490 m ü.M.

Bodenfaktor:

Der Einfluss der Bodeneigenschaften auf die Auswaschungsgefahr wurde über das Auswaschungsrisiko der Böden berücksichtigt. Ein Grossteil der Böden in der Schweiz weist ein mässiges bis mittleres Auswaschungsrisiko auf. Stark auswaschungsgefährdete Böden kommen vermehrt in den Alpen und im Jura vor. Hierbei handelt es sich häufig um sehr flachgründige und skelettreiche Böden, die nicht landwirtschaftlich genutzt werden. Die Risikoklasse 2 entspricht von den Bodeneigenschaften her am ehesten den Böden aus der verwendeten Literatur (vorwiegend Lysimeterversuche), welche auch am ehesten landwirtschaftlich genutzt werden. Für Böden der Risikoklasse 1 wurde eine Verminderung der Stoffkonzentration um 5 % (Faktor 0.95) gegenüber der Risikoklasse 2 (Mittelwert) angenommen, bei Risikoklasse 3 / 4 / 5 eine Erhöhung um 5 / 10 / 15 % (Faktoren 1.05 / 1.1 / 1.15). Die Berechnung erfolgt hektarweise für alle Nutzungskategorien, wobei durch die räumliche Auflösung der Bodenkarte im Grossteil der Schweiz nur eine grobe regionale Differenzierung möglich ist. In Bereichen, in denen von den Kantonen bereitgestellten Bodenkarten mit einer höheren Auflösung genutzt werden konnten, ist mit einer besseren regionalen Differenzierung zu rechnen.

Hofdüngerfaktor:

Es wird davon ausgegangen, dass mit zunehmendem Hofdüngeranfall das Nitratauswaschungsrisiko steigt. Der Hofdüngerfaktor wird nur auf der LN angewendet und bezieht sich auf den gemeindespezifischen Hofdüngeranfall in kg N/ha, der anhand der Tierzahlen der Betriebszählungsdaten (BFS 2013a) für die düngbare Fläche berechnet wurde. Da die Werte nicht flächenspezifisch, sondern nur als Gemeindemittelwerte vorlagen, wurde nur eine relativ schwache Gewichtung gewählt; dafür wird dieser Wert aber für alle düngbaren Flächen einer Gemeinde wirksam. Die Gewichtung liegt bei +5 % (Faktor 1.05) bei 250 kg N/ha und 0 % (Faktor 1.0) bei keinem Hofdüngeranfall. Auch hier wurde eine lineare Beziehung zugrunde gelegt.

Graslandintensitätsfaktor:

Auf extensiv genutztem Grasland wird mit einer geringeren Nitratauswaschung gerechnet als auf intensiv genutztem. Es wurde der prozentuale Anteil an extensiven Wiesen und extensiven Weiden am gesamten Grasland für jede Gemeinde berechnet. Auf diesem prozentualen Anteil der gesamten Graslandfläche wird mit einer 20 %igen Reduktion (Faktor 0.8) der Nitratauswaschung gerechnet. Da die Lage der extensiven Flächen in den Gemeinden nicht bekannt ist, wird die Verminderung auf die gesamte Graslandfläche in jeder Gemeindeumgelegt.

Denitrifikationsfaktor:

Je nach Standortfaktoren ist mit mehr oder weniger hohen Denitrifikationsverlusten im Boden zu rechnen. Als Kriterien für die Höhe der Denitrifikation wurden der Vernässungsgrad des Bodens aus der Bodeneignungskarte und das Vorhandensein einer Drainage herangezogen. Folgende Denitrifikationsfaktoren wurden hektarweise für alle landwirtschaftlichen Nutzungskategorien verwendet (Tab. 15):

Tabelle 15: Ableitung des Denitrifikationsfaktors aus den Bodeneigenschaften

	Denitrifikationsfaktor in %	Vernässungsgrad des Bodens	
drainierte Flächen	0.8	Moorböden	Bodentyp F1
	0.9	grundnasse Böden	Vernässungsklasse 4
	1.0	schwach grundnasse Böden	Vernässungsklasse 3
	1.0	grundfeuchte Böden	Vernässungsklasse 2
	1.0	nicht vernässte Böden	Vernässungsklasse 1 bis 0
undrainierte Flächen	0.6	Moorböden	Bodentyp F1
	0.6	grundnasse Böden	Vernässungsklasse 4
	0.7	schwach grundnasse Böden	Vernässungsklasse 3
	0.8	grundfeuchte Böden	Vernässungsklasse 2
	1.0	nicht vernässte Böden	Vernässungsklasse 1 bis 0

Drainagefaktor:

Auf drainierten Flächen wird mit einer höheren Nitratauswaschung gerechnet. Für den Drainageeffekt auf die Nitratauswaschung wurde – neben den geringeren Denitrifikationsverlusten - ein Zuschlag von 10 % (Faktor 1.1) bei drainierter Fläche für Acker- und Grasland berücksichtigt.

Phosphorauswaschung

Bei der Berechnung der P-Auswaschung wurde ähnlich wie bei der Nitratauswaschung vorgegangen. In Anlehnung an Literaturwerte wurde zunächst eine **mittlere P-Ausgangsfracht** (kg P/ha und Jahr) pro Landnutzungskategorie für das Untersuchungsgebiet festgelegt:

Tabelle 16: Nutzungsspezifischer Ausgangswert für die Berechnung der P-Auswaschung (kg P/ha)

Landnutzungskategorie	Ausgangsmittelwert (kg P/ha)
Wald	0.05
Unproduktive Vegetation	0.05
Strassen & Wege ausserorts	0.05
Dauerwiesen	0.06
Heimweiden	0.06
Alpwirtschaftliche Nutzfläche	0.06
Obstbau	0.06
Siedlungsgrünflächen	0.08
Rebbau	0.07
Gartenbau	0.07
Ackerland	0.07

Die aufgeführten Mittelwerte (Tab. 16) wurden als Ausgangswerte flächendeckend für die ganze Schweiz verwendet und mit folgenden Korrekturfaktoren regional angepasst:

$$\begin{aligned} &\text{Phosphorausgangswert (kg P/ha)} \\ &\quad \times \text{Sickerwasserfaktor} \\ &\quad \times \text{Bodenfaktor} \\ &\quad \times \text{Hofdüngerfaktor} \\ &\quad \times \text{P-Testzahlfaktor} \\ &\quad \times \text{Drainagefaktor} \\ &\quad = \text{Phosphorfracht (kg P/ha)} \end{aligned}$$

Im Vergleich zur Nitratauswaschung entfallen der Höhen-, Graslandintensitäts- und Denitrifikationsfaktor, neu kommt der P-Testzahlfaktor hinzu.

Sickerwasserfaktor:

analog zur Nitratauswaschung

Bodenfaktor:

analog zur Nitratauswaschung

Hofdüngereffektor:

Analog zur Nitratauswaschung. Die Gewichtung liegt bei +10 % (Faktor 1.1) bei 50 kg P/ha und 0 % (Faktor 1.0) bei keinem Hofdüngereffall. Auch hier wurde eine lineare Beziehung zugrunde gelegt.

P-Testzahlfaktor:

Es wird angenommen, dass der pflanzenverfügbare P-Gehalt im Oberboden bei durchlässigen Böden oder über Makroporenfluss einen Einfluss auf die Höhe der P-Auswaschung hat. Da für die Berechnung keine schweizweiten P-Testzahlen zur Verfügung gestellt werden konnten, wurde ein pauschaler Ansatz in Abhängigkeit vom P-Hofdüngereffall erstellt. Die Differenzierung in sechs Klassen hat eine Spannweite von +5 % bis +30 % (Tab. 17).

Tabelle 17: Klassifizierung des P-Testzahlfaktors in Abhängigkeit vom Hofdüngereffall

kg P/ha	Prozentualer Anstieg	P - Testzahlfaktor
< 5	5	1.05
> 5-15	10	1.10
>15-25	15	1.15
>25-35	20	1.20
>35-45	25	1.25
>45	30	1.30

Drainageeffektor:

Auf drainierten Flächen wird mit einer deutlich höheren P-Auswaschung gerechnet, da die Bodenpassage erheblich verkürzt ist und über Makroporenfluss direkt Oberflächenabfluss in die Drainage gelangen kann. Für den Drainageeffekt auf die P-Auswaschung wurde ein Zuschlag von Faktor 6 bei drainierter Fläche für Acker- und Grasland verwendet.

2.2.3.5 Atmosphärische Nährstoffdeposition auf die Gewässer

Bei der atmosphärischen Nährstoffdeposition auf die Gewässer wird nur die aus der Atmosphäre direkt auf die Gewässeroberfläche gelangende Menge abgeschätzt.

Stickstoffdeposition:

Für die Einträge per N-Deposition wurden die Daten von 2007 aus der N-Depositionskarte verwendet (Kap. 2.1.6).

Phosphordeposition:

Auch beim P sollte in den letzten Jahren aufgrund der Massnahmen für Luftreinhaltung eine Reduktion der Deposition stattgefunden haben. Die Staubemissionen haben in der Schweiz nach BUWAL (1995) von 1990 bis 2000 um 27 % abgenommen und haben vermutlich auch weiterhin abgenommen. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass Veränderungen bei der Landnutzung (Winterbegrünung, Direktsaat, etc.) zu einer verringerten Entwicklung von Staub

in der Landwirtschaft führen. Die in Bezug auf allgemeine Literaturangaben angenommenen mittleren P-Konzentrationen aus PRASUHN & MOHNI (2003) wurden daher pauschal um 10 % reduziert (Tab. 18).

Tabelle 18: Regionsspezifische Niederschlagskonzentration der P - Deposition

Bioregion	mg P/l
Jura	0.032
Mittelland	0.036
Voralpine Region	0.029
Alpine Region	0.022

2.2.3.6 Nährstoffeinträge durch landwirtschaftliche und sonstige Direkteinträge

Unter Nährstoffeinträgen durch landwirtschaftliche und sonstige Direkteinträge werden folgende Quellen verstanden:

- Einträge von Hofflächen
- Direkteinträge beim Weiden entlang von Gewässern
- Weidetrieb auf Strassen
- Düngeraustrag entlang von Gewässern
- Düngeraustrag entlang von Strassen
- Sonstige diffuse Direkteinträge (Laub- und Streueintrag, Badebetrieb, Futter- und Düngemittel für fischereiliche Zwecke und Wassergeflügel)

Aufgrund der geringen Relevanz dieser Quellen wird auf eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Abschätzungsmethoden an dieser Stelle verzichtet und auf PRASUHN & MOHNI (2003) verwiesen. Die Berechnungen beruhen auf zahlreichen Annahmen, so dass die Resultate nur als Grössenordnungen zu verstehen sind. Deshalb wurde in der vorliegenden Berechnung auf eine detaillierte Berechnung dieser Eintragspfade verzichtet. Stattdessen wurden pauschale Werte auf der Basis der Mittelwerte aller landwirtschaftlicher und sonstiger Direkteinträge aus PRASUHN & MOHNI (2003) verwendet.

Die Einträge wurden auf das Hektarraster verteilt. Auf Grund fehlender Angaben zu deren räumlichen Verbreitung wurden sie gleichmässig auf ausgewählte Nutzungstypen verteilt. Für Wald wurden aufgrund des zu erwartenden höheren Laub- und Streueintrags höhere Werte angesetzt (Tab. 19).

Tabelle 19: Pauschale Frachtannahme landwirtschaftlicher und sonstiger Direkteinträge

Nutzung	g P/ha	g N/ha
Landwirtschaftliche Nutzfläche	10	50
Wald	50	500

2.2.3.7 *Natürliche Hintergrundlast*

Die Berechnung der Stoffflüsse der natürlichen Hintergrundlast geht von folgenden Annahmen bzw. Änderungen aus: Berücksichtigung der veränderten Landnutzung (Wald statt Grasland, Ackerland und Siedlungsfläche) und der daraus resultierenden Wasserflüsse. Die in Kapitel 2.2.3.4 (Tab. 14) verwendeten N-Konzentrationen im Sickerwasser unter Wald und unproduktiver Vegetation wurden um 25 % reduziert. Damit wurde der anthropogenen Luftverschmutzung und der forstwirtschaftlichen Nutzung Rechnung getragen. Für die P-Konzentrationen im Sickerwasser wurden die gleichen Werte verwendet, welche für das Sickerwasser im Wald bzw. bei unproduktiver Vegetation zugrunde gelegt wurden (s. Kap. 2.2.3.4, Tab. 16). Damit wurde unterstellt, dass die anthropogene Luftverschmutzung und die forstwirtschaftliche Nutzung keinen Einfluss auf die Sickerwasserkonzentration von P im Wald und bei unproduktiver Vegetation ausüben.

Bei der atmosphärischen Deposition auf Gewässer wurden die in Kapitel 2.2.3.5 verwendeten P-Einträge in allen Gebieten aufgrund der anthropogenen Luftverschmutzung um 50 % vermindert. Für die N-Einträge wurde ein mittlerer Depositionswert von 8 kg N/ha flächendeckend fixiert, da eine pauschale Reduktion der Werte aus der N-Depositionskarte weiterhin eine Berücksichtigung lokaler anthropogener Effekte zur Folge hätte. Bei diesen Annahmen handelt es sich um grobe Schätzwerte.

Ausser der atmosphärischen Deposition auf Gewässer gibt es nur noch den Blattfall als Direkteintrag. Der stärkere Laubeintrag und der daraus gelöste P und N wurden insofern berücksichtigt, als der Flächenbezug die Gesamtfläche abzüglich der Fläche der Gewässer umfasst und die Werte der "sonstigen diffusen Direkteinträge" übernommen wurden.

Die sonstige Erosion wurde um den Flächenanteil der Siedlungsfläche erweitert. Anschließend wurde eine Minderung um 20 % in allen Einzugsgebieten vorgenommen. Damit wird unterstellt, dass 20 % der als sonstige Erosion bezeichneten Erosion anthropogenen Ursprungs sind (z.B. unbefestigte Wege, Überweidung und Viehtritt auf Grasland etc.). Die Gletschergebiete unterliegen keiner Reduktion.

3 Ergebnisse

3.1 Wasserflüsse

Die Abschätzung der Wasserflüsse erfolgte über die Verrechnung von mittlerem Niederschlag und mittlerer Verdunstung. Aus dem potenziellen Abfluss wurden verschiedene Abflusspfade abgeleitet. Dabei wurden Abflussmengen für den Oberflächenabfluss, den Drainageabfluss (auf drainierten Flächen) und der Abfluss über Sickerwasser ermittelt.

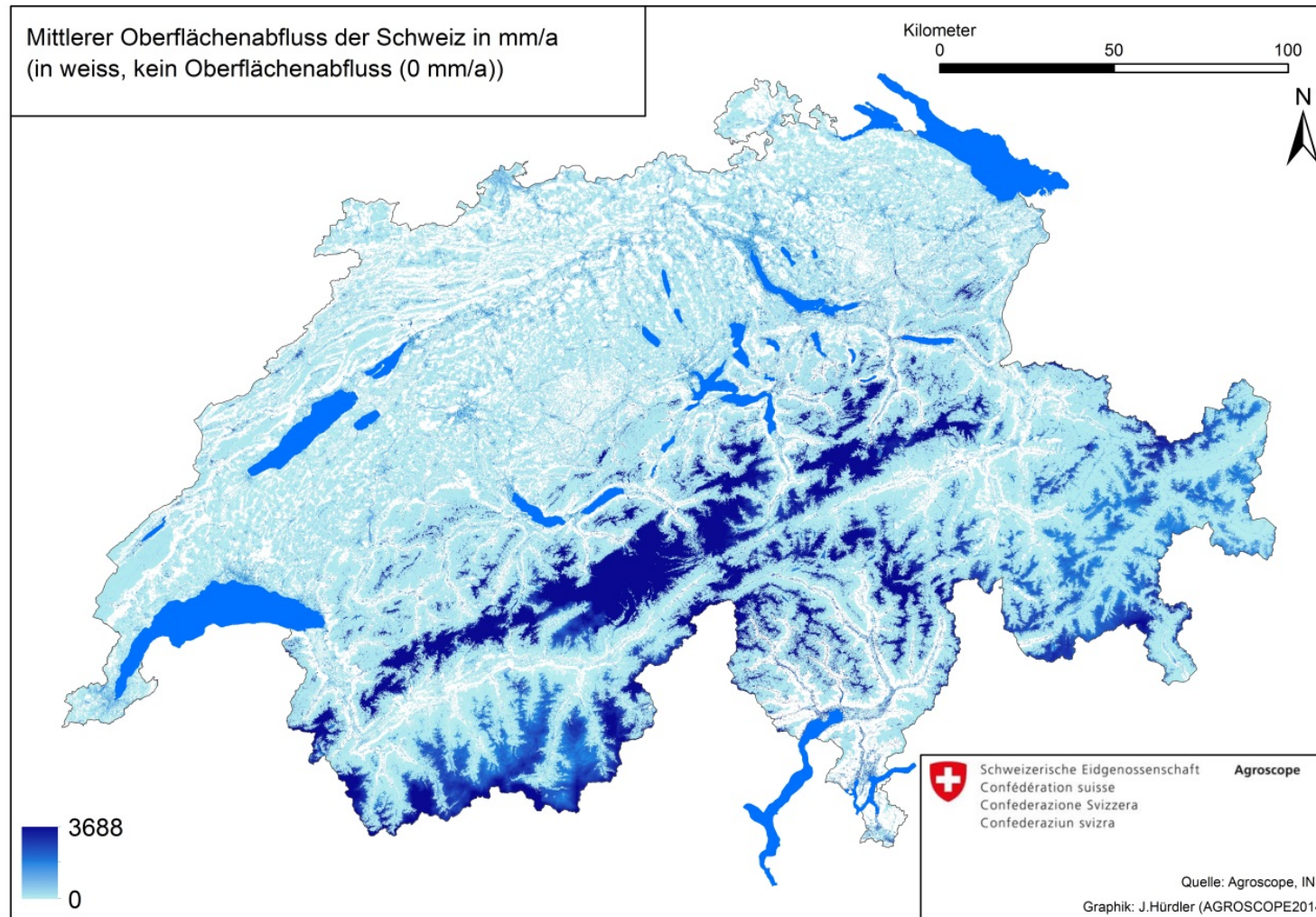


Abbildung 19: Mittlerer Oberflächenabfluss der Schweiz

Klar zu erkennen sind in Abbildung 19 weisse Bereiche, in denen es keinen Oberflächenabfluss gibt. Hierbei handelt es sich um Waldbestände unter 1200m Höhe. Darüber hinaus heben sich besonders die hochalpinen Bereiche deutlich hervor. Die dunkelblauen Bereiche haben die höchsten oberflächlichen Abflüsse. Sie sind durch unproduktive Vegetation und vegetationslose Flächen charakterisiert, in denen bei der MODIFFUS-Berechnung ein hoher Anteil bzw. 100 % des potenziellen Abflusses als Oberflächenabfluss angenommen wurde.

Da die Oberflächenabflussmenge als prozentualer Anteil vom Niederschlag berechnet wurde, erhalten niederschlagsreiche Regionen auch deutlich höhere Abflussmengen. Das ist hauptsächlich bei der Abschätzung des Sickerwasserabflusses zu erkennen. Die weissen Bereiche in Abbildung 20 stellen den Gegensatz zu den in Abbildung 19 dunkelblauen Bereichen dar. Da auf vegetationslosen Flächen 100 % des potenziellen Abflusses als Oberflächenabfluss angenommen wurden, haben diese Bereiche kein Sickerwasser. Gut ersichtlich sind beim Sickerwasserabfluss die inneralpinen Trockentäler, welche durch den Regenschatten wenig Niederschlag, aber hohe Verdunstung haben (Abb. 20). Deutlich heben sich die voralpinen und alpinen Gebiete ab, sowie das Tessin. Das ist auf die hohen Niederschlagswerte zurück zu führen.

In Gebieten mit landwirtschaftlicher Nutzung (Ackerland, Grasland) erfolgt zusätzlich Abfluss unter Drainagen; allerdings nur auf den Flächen, auf denen Drainagen ausgewiesen wurden. Hier gelangen zwischen 58 % und 86 % des Sickerwassers - unter Berücksichtigung einer linearen Beziehung - durch Drainagen in die Fliessgewässer (nicht als Karte dargestellt).

Durch die Berücksichtigung von künstlichen Wasserentnahmen, Wasserzugaben, bzw. gesicherten natürlichen Wasserüberträgen durch Grundwasserzu- bzw. -abflüssen konnte eine Abflussskalibrierung auf Einzugsgebietsebene erfolgen.

Tabelle 20: Wasserbilanz Schweiz (inklusive Aufteilung der Wasserflüsse) (korrigiert 1.7.2019)

Wasserbilanz	Mio. m ³	mm	
Niederschlag	57'960	1404	
Verdunstung	18'600	451	
potentieller Abfluss	38'890	942	
Wasserflüsse	Mio. m3	mm	% Anteil an potentiellem Abfluss
Oberflächenabfluss	10'720	260	28
Drainageabfluss	890	22	2
Sickerwasserabfluss	27'300	661	70

Die modellierte mittlere Wasserbilanz der Schweiz ergibt 1'404 mm Niederschlag, von denen 32 % verdunsten und 67 % als potentieller Abfluss (inklusive Speicherung im Boden und in Gletschern) für die verschiedenen Wasserflüsse als Restglied bleiben (Tab. 20). Dies stimmt gut mit den Werten von HUBACHER & SCHÄDLER (2010) überein, die 1'431 mm Niederschlag, 464 mm Verdunstung und 981 mm Abfluss für das Gebiet der Schweiz (ohne Zuflüsse aus und Abflüsse ins Ausland) für die Periode 1901-2000 angeben.

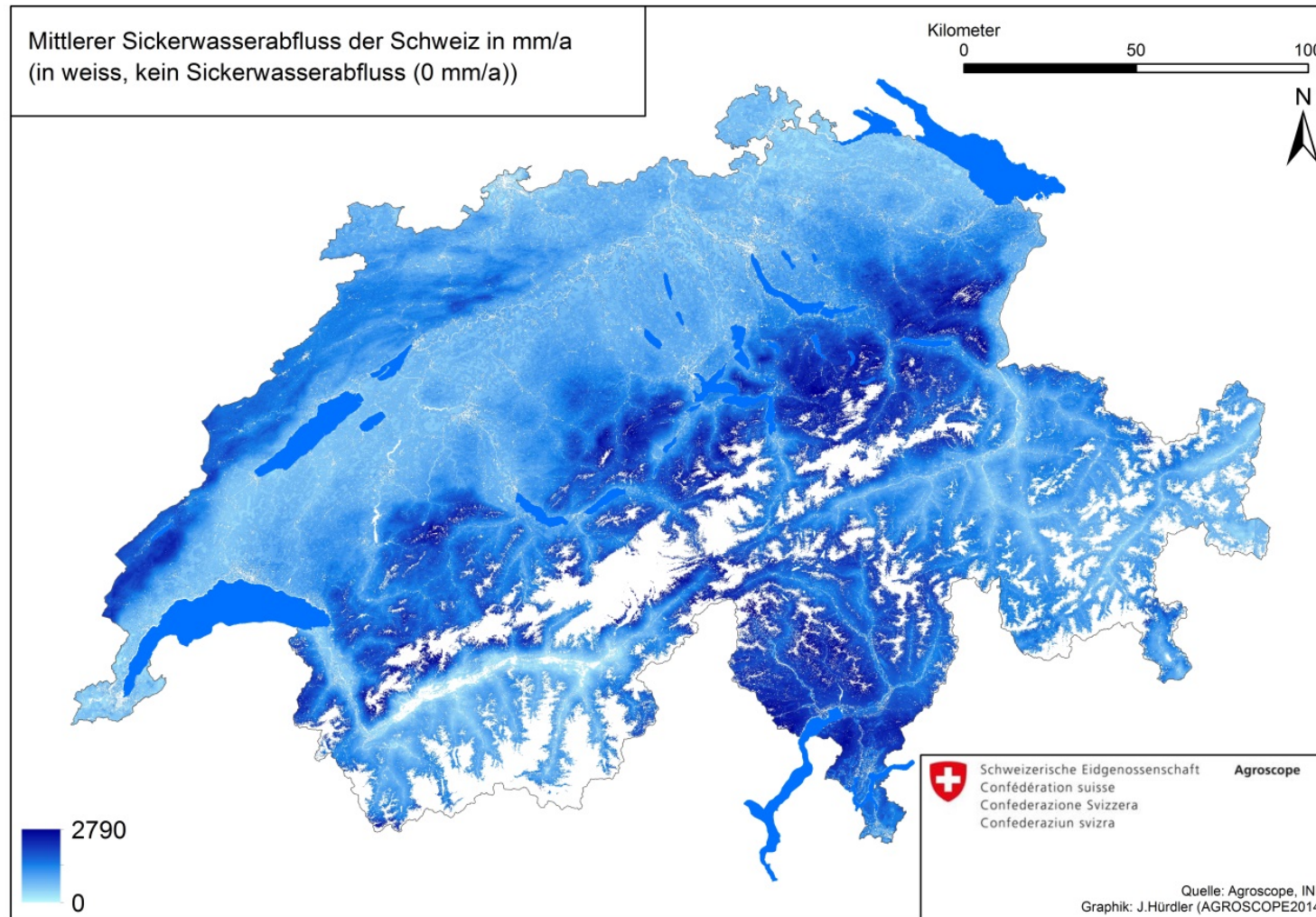


Abbildung 20: Mittlerer Sickerwasserabfluss der Schweiz

3.2 Gesamt-Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen für die Schweiz

Bei den N-Einträgen wird – im Gegensatz zu den P-Einträgen – auf eine Unterteilung in partikulären und gelösten N bei der Ergebnisdarstellung verzichtet. Nach PRASUHN & MOHNI (2003) sind die partikulären N-Einträge (z.B. in Form von organischem N aus der Erosion) mit 7 % der Gesamt-N-Einträge relativ gering. Im Folgenden werden also immer Gesamt-N-Einträge dargestellt.

Die Verteilung der diffusen N-Einträge unterstreicht die Abgrenzung landwirtschaftlich intensiv genutzter Gebiete und extensiv bzw. nicht genutzter Gebiete aus der Landnutzungsbeschreibung (Abb. 21). Es gibt eine klare Abgrenzung der Mittellandgebiete und der grossen Flusstäler (gelbe bis rote Bereiche) und der hellgrünen Bereiche, in denen eine eher extensive Landnutzung zu verzeichnen ist, oder sogar dunkelgrüne Bereiche, in denen hauptsächlich unproduktive Vegetation und vegetationslose Flächen vorherrschen.

Durch die aktuelle MODIFFUS-Abschätzung wurde ein **Stickstoffeintrag von 51'493 t** über diffuse Eintragspfade in die Gewässer der Schweiz ermittelt (Tab. 21). Das entspricht einem **flächenspezifischen diffusen Eintrag von 12 kg N/ha/Jahr**. Die spezifischen Eintragsmengen unterscheiden sich stark in Bezug auf ihre Eintragsquelle. Ackerland verzeichnet mit 19'449 t N den höchsten Anteil (38 %) am gesamten N-Austrag aus der Schweizer Landfläche (Tab. 21). Hierbei ist zu beachten, dass Eintragsquellen nicht ausschliesslich durch die absoluten Eintragsmengen betrachtet werden dürfen. **Ackerland** verzeichnet mit **48 kg N/ha/Jahr** ebenfalls den höchsten Rang bei den flächenspezifischen N-Einträgen, direkt gefolgt von Gartenbau (42 kg N/ha) und Rebbau (33 kg N/ha). Auf Grund ihrer geringen flächenmässigen Verbreitung in der Schweiz ist deren Einfluss auf die Gewässer der Schweiz aber gering (Gartenbau 189 t (0 %), Rebbau 516 t (1 %)). Lokal begrenzte Einträge scheinen für diese Eintragsquellen durchaus relevant und können die Gewässer erheblich belasten. Im Gegensatz dazu können Gebiete mit einem geringen flächenspezifischen Eintragswert (Wald $\leq 1200\text{m}$ 6 kg N/ha oder Grasland 12 kg N/ha) auf Grund ihres grossen Flächenanteils einen erheblichen Anteil an den absoluten N-Einträgen haben (Wald $\leq 1200\text{m}$ = 4'766 t (9 %) oder Grasland = 4'044 t (8 %)).

Gebiete mit den höchsten diffusen N-Einträgen sind z.B. das Berner Seeland, das Rhonetal zwischen Monthey und Villeneuve, die Ebene bei Oensingen oder das Rheintal zwischen Bad Ragaz und Diepoldsau.

Tabelle 21: Gesamt-Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer der Schweiz – nach absoluter Höhe der Einträge sortiert.

Landnutzung	Gesamt-Stickstoff		
	(t N/Jahr)	(% Verteilung)	(kg N/ha/Jahr)
Ackerland	19449	38	48
Wald unter 1200m	4766	9	6
Grasland	4044	8	12
Alpwirtschaftliche Nutzfläche	3965	8	8
Siedlungsgrün	3679	7	23
Heimweiden	3664	7	22
Geröll, Sand, Fels	3101	6	7
Wald über 1200m	2590	5	5
stehende Gewässer	2072	4	15
unproduktive Vegetation	1221	2	4
Gletscher	882	2	8
fliessende Gewässer	581	1	18
Rebbau	516	1	33
Strassen ausserorts	392	1	13
Obstbau	383	1	12
Gartenbau	189	0	42
Strassen innerorts	0	0	0
Siedlung überbaut	0	0	0
Gesamt Schweiz	51'493		12

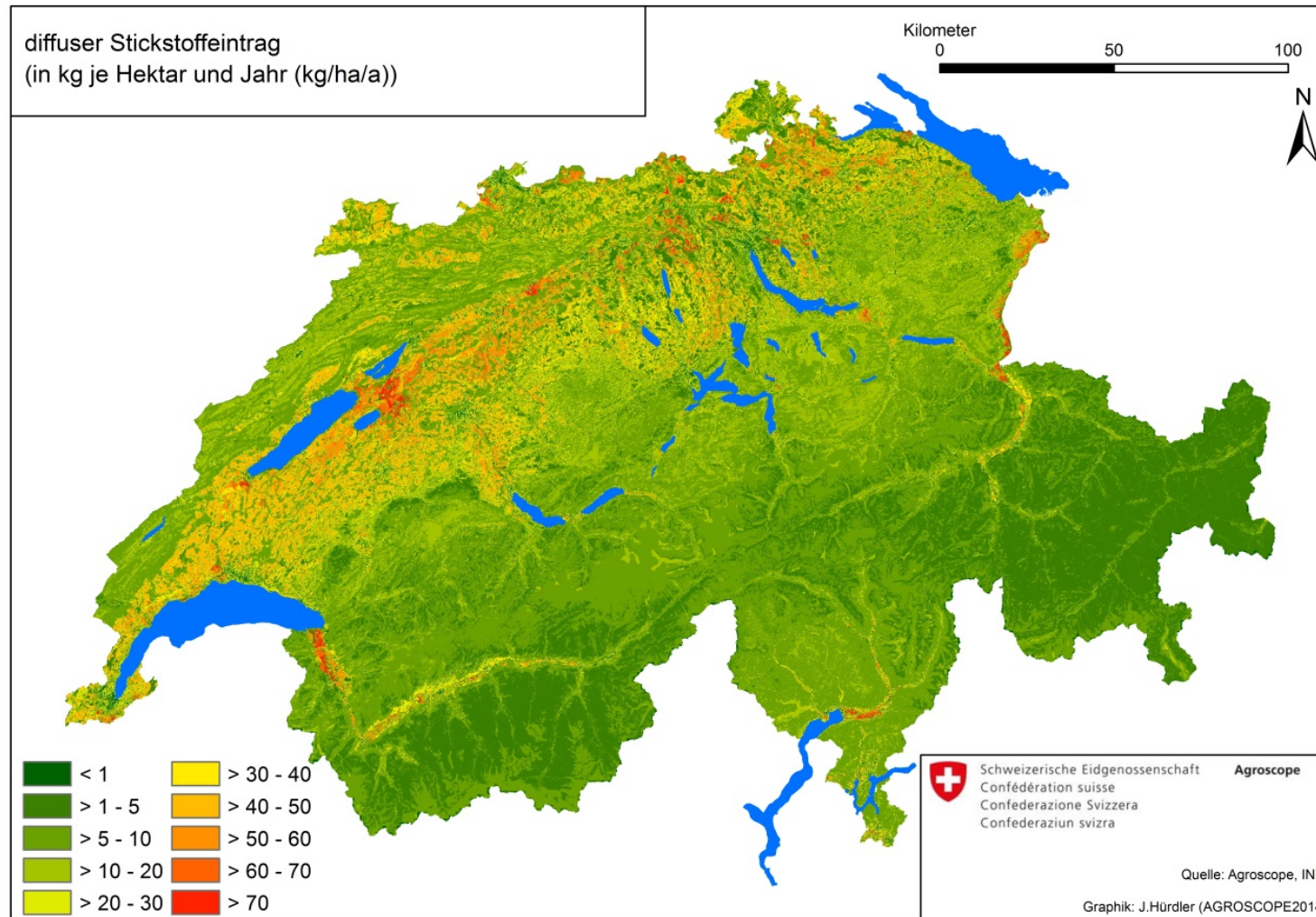


Abbildung 21: Diffuser Stickstoffeintrag

Abbildung 22 zeigt exemplarisch die N-Verluste für einen ausgewählten Pfad (Auswaschung inklusive Drainagen) und eine ausgewählte Nutzungskategorie (Ackerland). Es überwiegt eine gelbe bis rötliche Färbung. Das ist gleichbedeutend mit einer mittleren Auswaschung von 45 kg N/ha. Die stark orangen und roten Flächen stechen aus dem Gesamtbild hervor. Das ist ein Zeichen für Regionen mit drainierten Flächen und intensiver ackerbaulicher Nutzung wie z.B. Gemüseanbau. Es sind kaum Flächen mit einer flächenspezifischen Auswaschung unter 30 kg N/ha vorhanden.

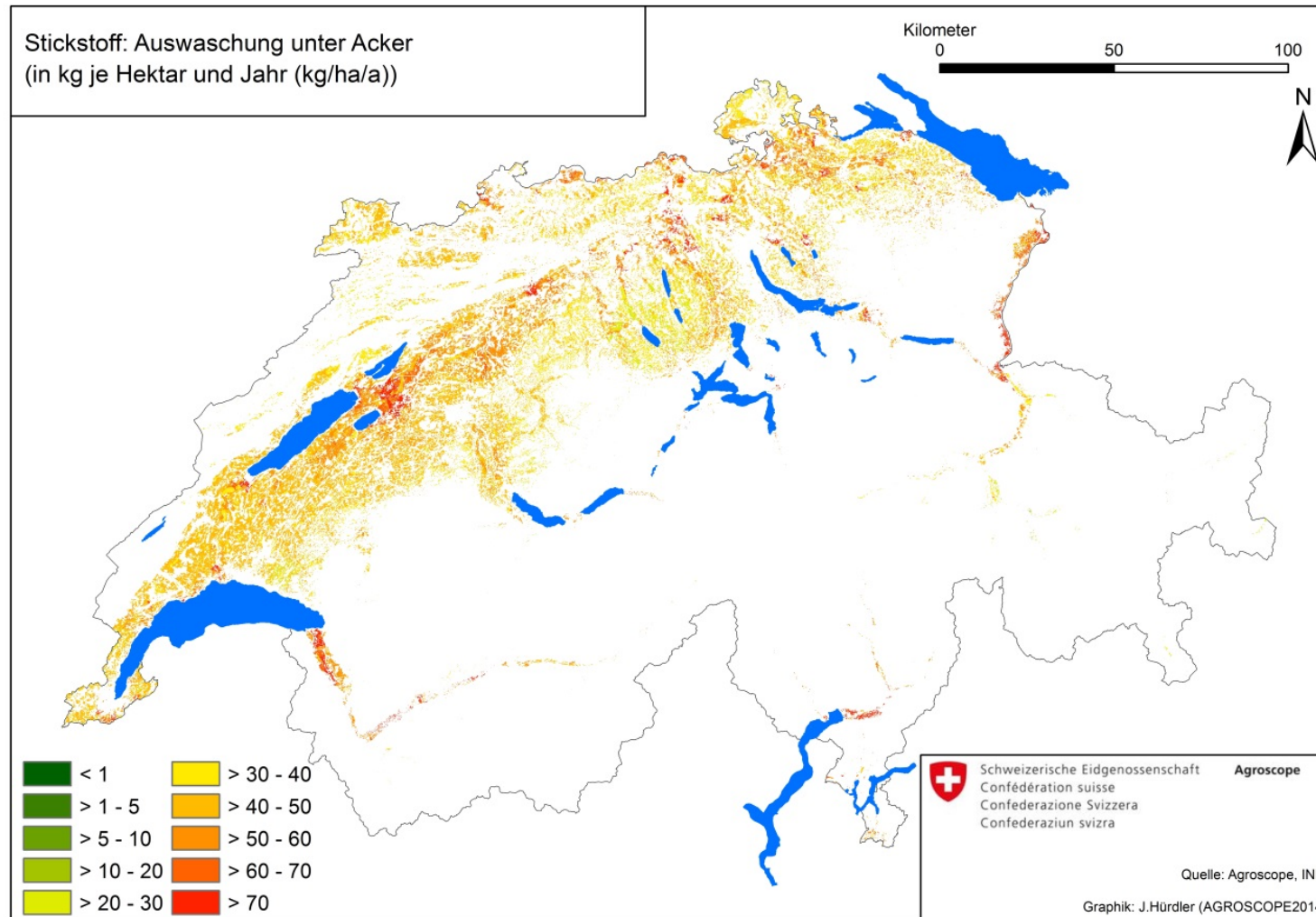


Abbildung 22: Stickstoffauswaschung unter Ackerstandorten

3.3 Phosphoreinträge aus diffusen Quellen für die Schweiz

3.3.1 Gesamt-Phosphor

Die graphische Darstellung der diffusen Gesamt-P-Einträge zeichnet ein deutliches Bild (Abb. 23). Die alpinen Bereiche heben sich durch eine intensive Farbgebung ins Rot vor. Besonders die Gletschergebiete und das Berner Oberland weisen teilweise P-Einträge von über 1.8 kg P/ha auf. Diese Gebiete haben gemäss Berechnungen grosse Mengen an Sedimentabtrag, was durch das Phänomen der Gletschermilch visuell repräsentiert wird, aber auch durch gemessene Sedimentfrachten nachgewiesen werden kann. Dies lässt auf einen hohen partikulär gebundenen P-Austrag schliessen. Die restlichen Alpen, Voralpen und das Tessin werden durch die Kombination von hohen ganzjährigen Niederschlägen und der vorherrschenden Landnutzung „Fels, Geröll, Sand“ und „unproduktive Vegetation“ bestimmt, was ebenfalls zu hohen partikulär gebundenen P-Austrägen führt. Da für diese Gebiete keine speziellen Untersuchungen bzw. Messresultate vorliegen, sind die Berechnungen für diese Bereiche mit grossen Unsicherheiten behaftet. Darüber hinaus sind die partikulär gebundenen P-Einträge hauptsächlich als natürliche Hintergrundlast zu betrachten und liegen dem Ökosystem nicht als bioverfügbarer P vor. Im Wallis und Graubünden sind die partikulären P-Einträge dagegen überwiegend vergleichsweise gering – mit Ausnahme der Gletscher – bedingt durch die niedrigen Niederschläge.

Die aktuelle MODIFFUS Abschätzung weist einen schweizweiten diffusen **Gesamt-Phosphoreintrag von 3'490 t** auf (Tab. 22). Das entspricht einem **flächenspezifischen diffusen Eintrag von 0.85 kg P/ha/Jahr**. Dominiert werden die diffusen Gesamt-P-Einträge von den Einträgen über Gletscher, welche absolut gesehen (1'135 t (33 %)), wie auch flächenspezifisch (9.93 kg P/ha) die grösste Eintragsquelle darstellen. Der Rebbau hat auf Grund erhöhtem erosiven Abtrag (partikulär gebundener P) einen hohen flächenspezifischen P-Eintrag in die Oberflächengewässer. Allerdings ist der Anteil absolut gesehen zu vernachlässigen, da Reben flächenmässig eine nachgeordnete Rolle in der Schweiz innehaben. Relevanter sind die Eintragsquellen Ackerland, Heimweiden, Grasland und alpwirtschaftliche Nutzflächen. Die flächenspezifischen P-Einträge sind auf einem hohen Niveau (0.69 – 0.90 kg P/ha), und durch eine weite Verbreitung dieser Landnutzungen in der Schweiz machen sie absolut zusammen einen grossen Anteil (ca. 30 %) der diffusen P-Einträge in die Schweizer Oberflächengewässer aus. Abb. 24 zeigt exemplarisch die Gesamt-P-Einträge über den Pfad Bodenerosion und die Landnutzung Ackerland. Es überwiegen die Flächen mit vergleichsweise geringen Einträgen (grüne Flächen). Flächen mit hohen Einträgen (rote Flächen) kommen verstreut fast überall vor.

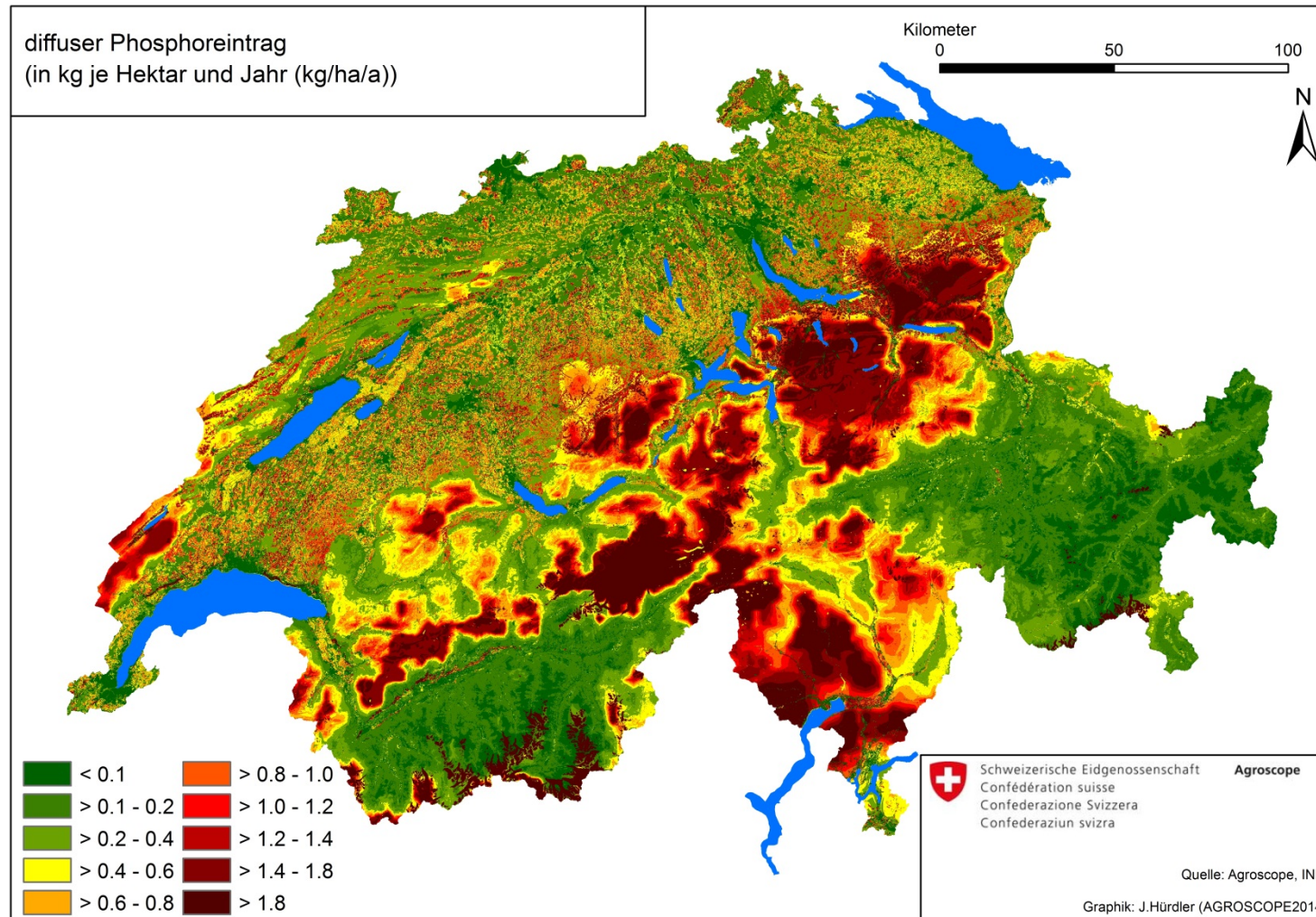


Abbildung 23: Diffuser Phosphoreintrag (Gesamt-Phosphor)

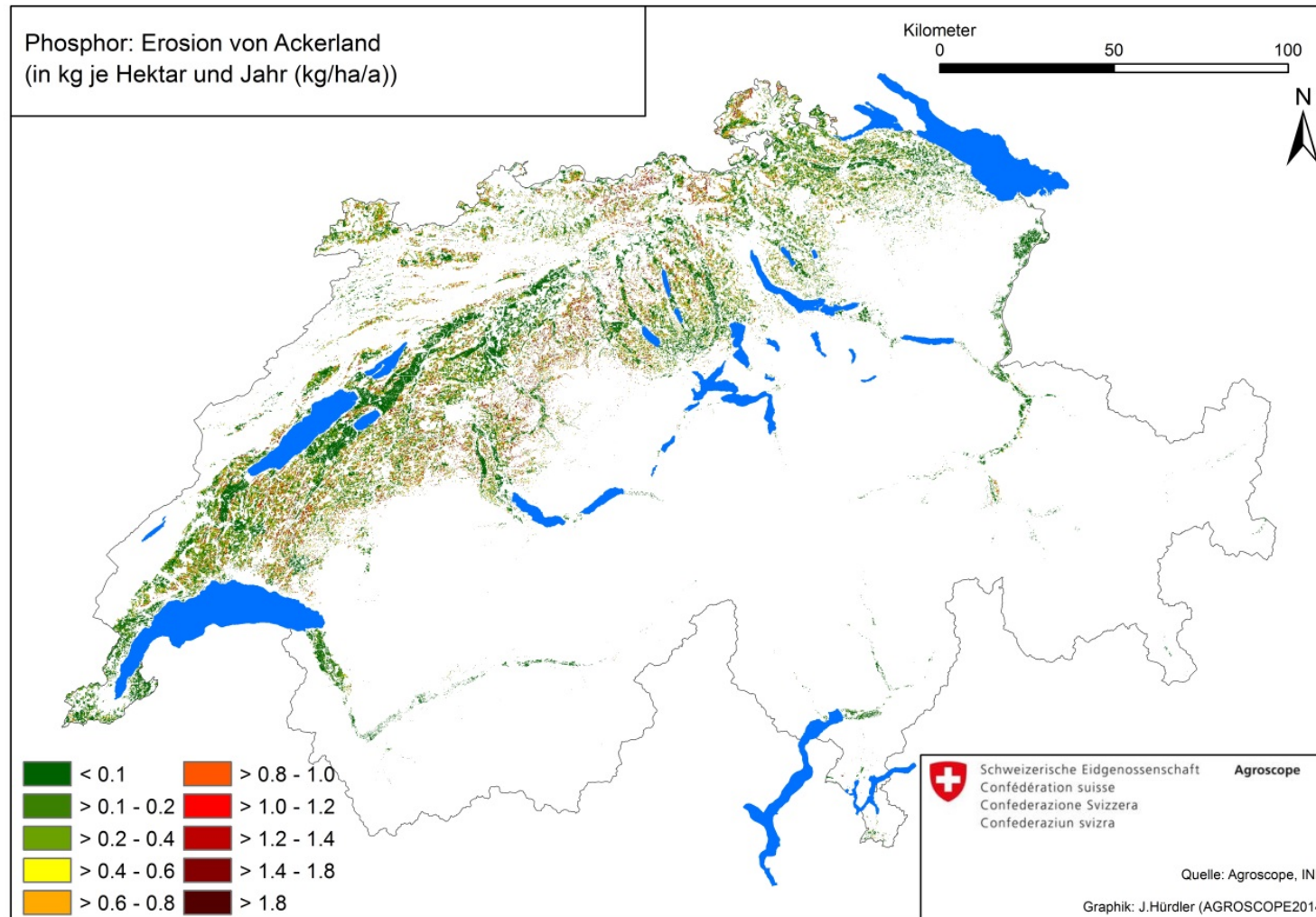


Abbildung 24: Diffuser Phosphoreintrag über Erosion von Ackerland

Tabelle 22: Gesamt-Phosphoreinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer der Schweiz – nach absoluter Höhe der Einträge sortiert.

Landnutzung	Gesamt-Phosphor		
	(t P/Jahr)	(% Verteilung)	(kg P/ha/Jahr)
Gletscher	1'135	32.5	9.93
Ackerland	364	8.1	0.90
Alpwirtschaftliche Nutzfläche	355	10.4	0.69
Geröll, Sand, Fels	312	8.9	0.67
Wald über 1200m	297	8.5	0.58
Wald unter 1200m	290	8.3	0.37
Grasland	255	7.3	0.75
unproduktive Vegetation	177	5.1	0.60
Heimweiden	142	4.1	0.85
stehende Gewässer	56	1.6	0.40
Rebbau	40	1.1	2.52
fliessende Gewässer	22	0.6	0.69
Siedlungsgrün	14	0.4	0.09
Strassen ausserorts	13	0.4	0.43
Obstbau	13	0.4	0.43
Gartenbau	2	0.1	0.43
Strassen innerorts	0	0.0	0
Siedlung überbaut	0	0.0	0
Gesamt Schweiz	3490		0.85

Da davon ausgegangen werden kann, dass der partikulär gebundene P zu einem Grossteil nicht bioverfügbar ist oder in den Seen und Stauseen sedimentiert, ist die Betrachtung des gelösten P von grösserer Bedeutung.

3.3.2 Gelöster Phosphor

Um ausschliesslich den gelösten Bestandteil der diffusen P-Einträge zu betrachten, wurden die Einträge aus den Eintragspfaden Bodenerosion und natürliche Erosion ausgeschlossen. Das Ergebnis in kartographischer Darstellung (Abb. 25) zeichnet ein völlig anderes Bild. Die Hotspotregionen in den alpinen Bereichen aus Abbildung 23 erscheinen in einem grünen Farbton, also Einträge unter 0.4 kg P/ha. Auffälliger sind nun die voralpinen Bereiche und Regionen mit intensiver Graslandbewirtschaftung.

Generell ist der voralpine Bereich durch erhöhte Niederschläge (Staulagen) gekennzeichnet, mit einer Zunahme in Richtung Osten. Dies führt zu erhöhten Abschwemmungseffekten. In Kombination mit einer erhöhten Graslandbewirtschaftung/Weidebewirtschaftung kommt es zu erhöhten Einträgen von gelöstem P. Beispielhaft können die Regionen Luzern und Thurgau genannt werden. Hier führen hohe Tierzahlen zu einem starken Anfall von Hofdünger. In Kombination mit einem grossen Anteil von intensiver Graslandbewirtschaftung und hohen Niederschlägen führt es zu einer verstärkten Abschwemmung von gelöstem P. Abb. 26 verdeutlicht dies, da hier nur der Pfad Abschwemmung und die Landnutzung Grasland dargestellt sind.

Nach Abzug der partikulär gebundenen P-Einträge werden mit MODIFFUS **909 t diffus eingetragener gelöster Phosphor** berechnet. Das entspricht einem **flächenspezifischen Wert von 0.22 kg P/ha/Jahr** über die gesamte Schweiz verteilt (Tab. 23). Der Schwerpunkt der absoluten gelösten P-Einträge verschiebt sich auf die Eintragsquellen Ackerland, Grasland, Heimweiden und alpwirtschaftliche Nutzfläche.

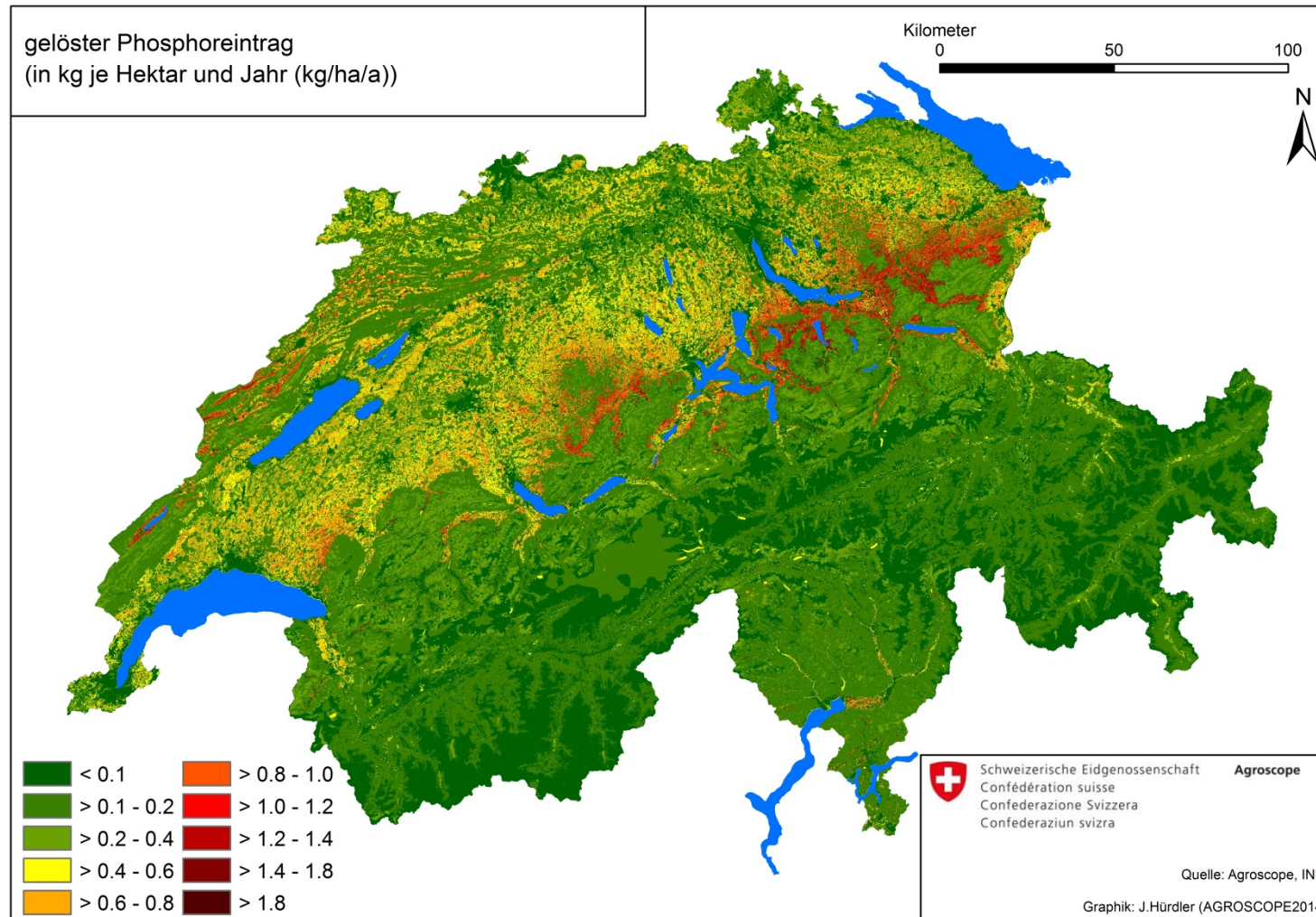


Abbildung 25: Diffuser Phosphoreintrag (gelöster Phosphor)

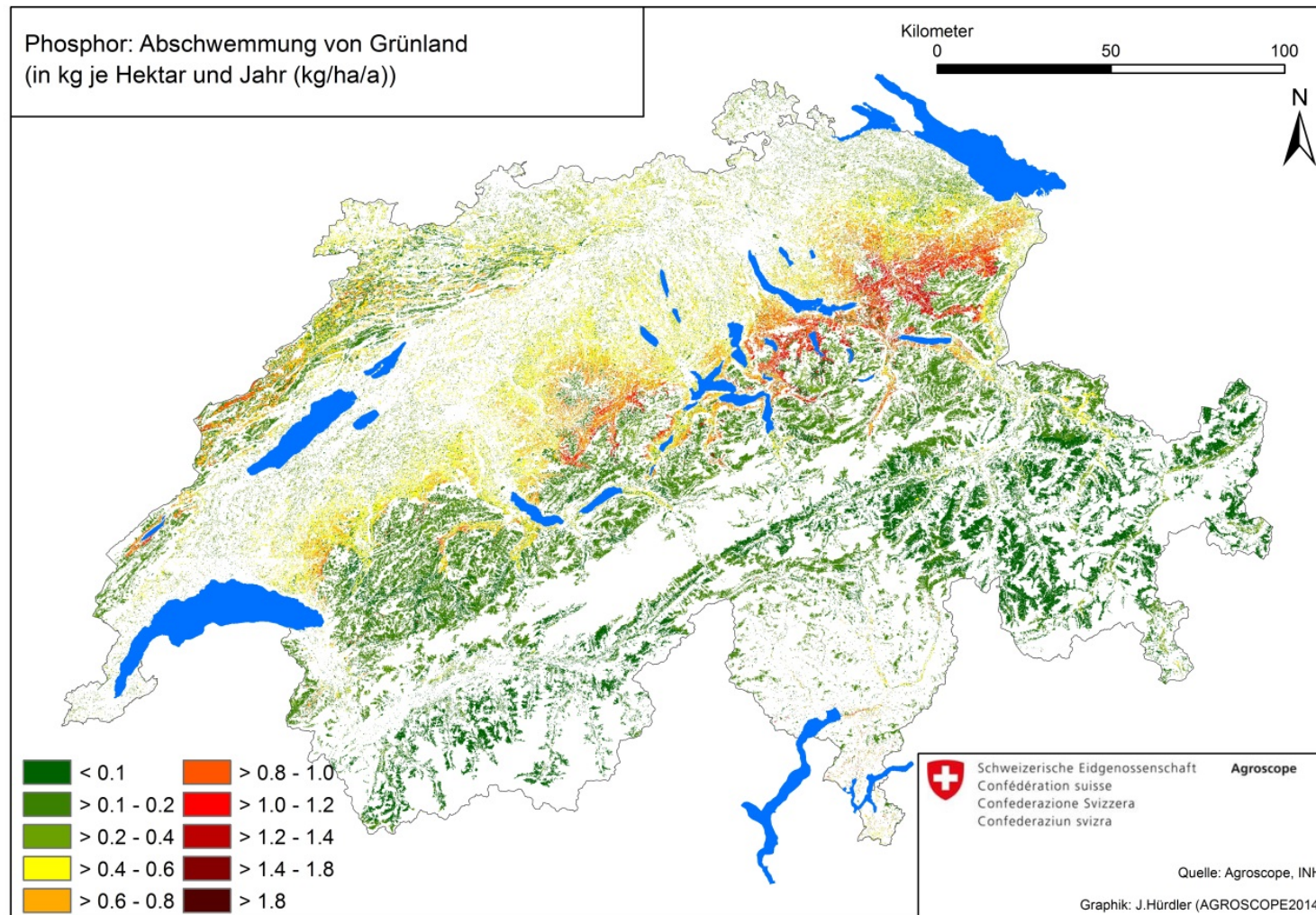


Abbildung 26: Diffuser Phosphoreintrag über Abschwemmung von Grasland

Tabelle 23: Einträge gelöster Phosphor aus diffusen Quellen in die Gewässer der Schweiz – nach absoluter Höhe der Einträge sortiert.

Landnutzung	gelöster Phosphor		
	(t P/ Jahr)	(% Verteilung)	(kg P/ha/Jahr)
Ackerland	197.9	21.8	0.49
Grasland	176.4	19.4	0.52
Heimweiden	112.2	12.3	0.67
Alpwirtschaftliche Nutzfläche	102.1	11.2	0.20
Wald unter 1200m	84.9	9.3	0.11
Wald über 1200m	63.0	6.9	0.12
stehende Gewässer	56.4	6.2	0.40
Geröll, Sand, Fels	30.5	3.4	0.07
unproduktive Vegetation	25.7	2.8	0.09
Siedlungsgrün	14.1	1.6	0.09
fliessende Gewässer	12.5	1.4	0.39
Obstbau	11.2	1.2	0.36
Gletscher	9.3	1.0	0.08
Strassen ausserorts	7.5	0.8	0.24
Rebbau	3.9	0.4	0.25
Gartenbau	1.1	0.1	0.24
Strassen innerorts	0.0	0.0	0.00
Siedlung überbaut	0.0	0.0	0.00
Gesamt Schweiz	909		0.22

3.4 REZGUS (Rheineinzugsgebiet unterhalb der grossen Seen)

Grundlage für die aktuelle Untersuchung und Überarbeitung des Nährstoffeintragsmodells MODIFFUS ist die Meldung der Nährstoffeintragssituation im Rheineinzugsgebiet der Schweiz an die Internationale Kommission zum Schutze des Rheins (IKSR). Daher erfolgt hier eine explizite Ergebnisdarstellung für das REZGUS. Dadurch besteht die Möglichkeit eines Abgleichs vorheriger Berechnungen mit MODIFFUS und der aktuellen Berechnung.

Das Einzugsgebiet repräsentiert zum Grossteil das Mittelland, welches durch landwirtschaftliche Nutzung geprägt ist. Nur geringe Einzugsgebietsteile liegen im Alpenvorland bzw. direkt in den Alpen. Betrachtet wird der Teil des Rheineinzugsgebiets flussabwärts der grossen Seen. Eine exakte Aussage bzw. Abschätzung zum Verhalten der Nährstoffe, welche oberhalb der grossen Seen eingetragen werden, ist nicht möglich, da die Seen als grosse Sedimentfallen fungieren.

Um die Nährstoffeinträge aus dem flussaufwärts gelegenen Teil des Einzugsgebiets zu berücksichtigen, wurden die geschätzten Nährstofffrachten aus PRASUHN & HURNI (1999) für die Seenausslässe verwendet. Diese wurden aber in Anlehnung an die Reduktion der Messwerte der NADUF-Messstelle in Weil am Rhein in den vergangenen Jahren pauschal reduziert (P = -13 %; N = -19 %). Gleiches Vorgehen erfolgte bei der Berücksichtigung der Nährstoffeinträge aus dem deutschen Einzugsgebietsteil zwischen Bodensee und Basel. Die abgeschätzten Frachten aus dem Einzugsgebiet oberhalb der grossen Seen und des deutschen Einzugsgebietsteils zwischen Bodensee und Basel haben einen prozentualen Anteil von 45 % für N und 32 % für P.

Tabelle 24: Zusammenstellung sämtlicher berechneter und abgeschätzter P- und N-Einträge aus punktuellen und diffusen Quellen für das REZGUS und Vergleich mit den gemessenen Stofffrachten in Weil am Rhein (Mittelwert 2008-2010)

REZGUS 2010	P in Tonnen	%-Anteil P	N in Tonnen	%-Anteil N
Abwasserreinigungsanlagen	329	34	9'358	19
Regenentlastung	87	9	1'265	3
Abschwemmung	176	18	435	1
Auswaschung	88	9	15'809	32
Auswaschung & Abschwemmung von vegetationslosen Flächen	0.3	0	44.0	0
Direkteinträge	22	2	193	0
Erosion von landwirtschaftlicher Nutzfläche	82	9	79	0
Sonstige Erosion	171	18	427	1
Deposition auf Gewässer	4	0	207	0
REZGUS CH	959	68	27'816	56
Nährstoffauftrag aus grossen Seen	346	24	19'424	39
Einzugsgebiet Deutschland (Basel - Bodensee)	108	8	2'833	6
Gesamt Weil am Rhein MODIFFUS				
	1'413		50'073	
<i>Gesamt Weil am Rhein NADUF</i>				
	<i>1'357</i>		<i>49'994</i>	
<i>Abweichung</i>				
	<i>4%</i>		<i>0%</i>	

In Tabelle 24 ist eine Gesamtschau der Nährstoffeinträge für das betrachtete REZGUS dargestellt, inklusive der Einträge aus punktuellen Quellen (ARA; Regenwasserentlastungsanlagen). Bei den Gesamt-P-Einträgen machen die punktuellen Quellen (inklusive Regenwasserentlastungen) insgesamt 43 % der Einträge aus, bei den Gesamt-N-Einträgen betragen sie 22 %. Die grob abgeschätzten Nährstoffeinträge aus den grossen Seen (P 24 %; N 39 %) und dem Einzugsgebiet Deutschland (Bodensee - Basel) (P 8 %; N 6 %) sind anteilig relativ gross.

Auf die Problematik des Vergleichs von gemessenen Frachten an Pegelmessstellen und berechneten Frachten mit MODIFFUS und die Diskrepanz beider Frachten beim Phosphor wird in Kapitel 4 (S. 112) eingegangen.

Auf Grund des fehlenden alpinen Einzugsgebietes sind die Nährstoffeinträge über den Pfad Auswaschung und Abschwemmung von vegetationslosen Flächen sehr gering. Ebenfalls sehr gering sind die Einträge über die direkte Deposition auf Gewässerflächen, da im REZGUS keine grossen zusammenhängenden Wasserflächen vorkommen.

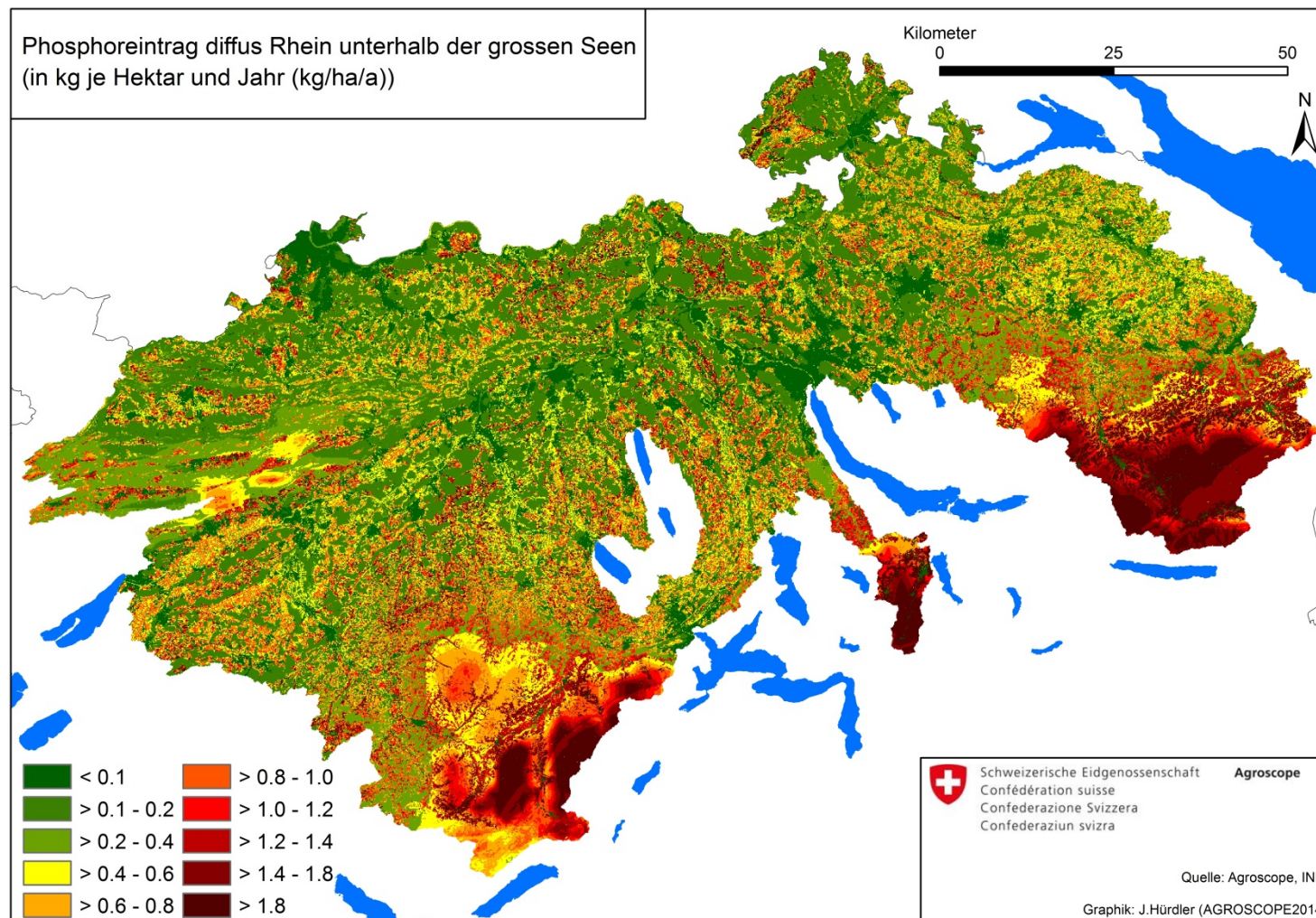


Abbildung 27: Diffuser Gesamt-Phosphoreintrag REZGUS

Die grössten prozentualen Anteile der diffusen P-Einträge an den gesamten P-Einträgen haben die Eintragspfade Abschwemmung (9 %) und Sonstige Erosion (9 %). Über den Pfad Abschwemmung wird eher gelöster P von Graslandbewirtschaftung eingetragen, über Sonstige Erosion hauptsächlich partikulär gebundener P von Ackerlandstandorten und anderen Landnutzungen. Zusätzlich gelangen P-Einträge über die Erosion von landwirtschaftlichen Nutzflächen (4 %) in die Gewässer. Der hohe Anteil von P-Einträgen über sonstige Erosion lässt sich in Abbildung 27 deutlich an den dunkelroten Bereichen im Süden des REZGUS erkennen. Hier lassen sich diffuse Einträge von mehr als 1 kg P/ha ablesen. Allerdings sind das partikulär gebunden P-Einträge, die nicht als bioverfügbar angesehen werden.

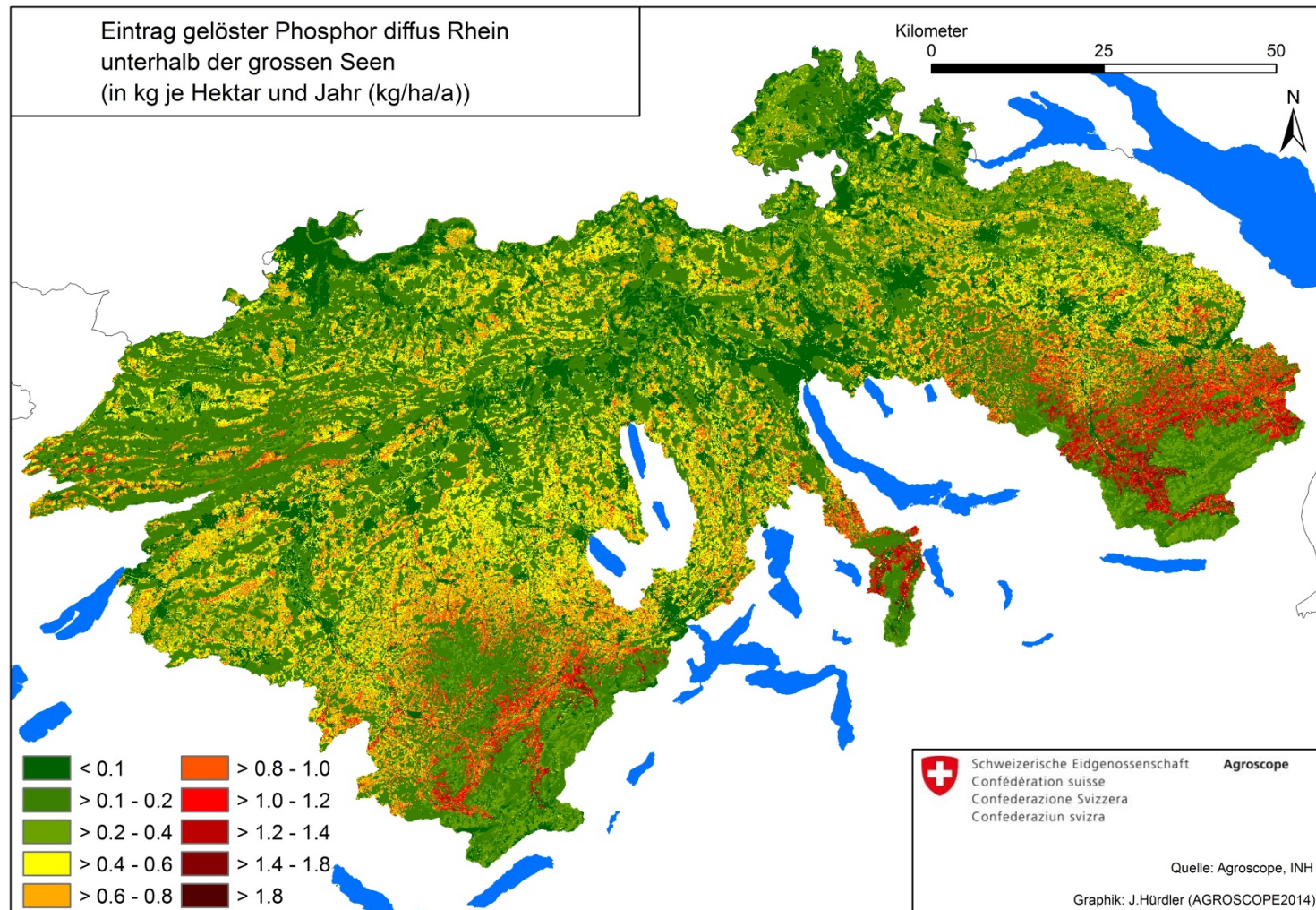


Abbildung 28: Eintrag diffuser gelöster Phosphor REZGUS

Bei der Betrachtung der Abbildung 28 (gelöster P) stechen die voralpinen Gebiete hervor. Diese sind hauptsächlich durch Graslandbewirtschaftung charakterisiert. Somit verlieren sie einen grossen Anteil ihrer Nährstofffracht durch Abschwemmung. In Kombination mit erhöhten Niederschlagsmengen in dieser Region kommt es zu erhöhten Einträgen von gelöstem und damit bioverfügbarem P.

Die gelösten P-Einträge aus diffusen Quellen im REZGUS (ohne Einträge aus Seen und Deutschland) betragen insgesamt 290 t P. Das sind 30 % der Gesamt-P-Einträge. Wenn man davon ausgeht, dass die Einträge aus punktuellen Quellen ebenso wie die gelösten diffusen Einträge weitgehend bioverfügbar sind, ergibt sich eine Gesamtfracht von 706 t P an bioverfügbaren P. Davon sind 59 % aus punktuellen Quellen (inklusive Regenwasserentlastungen), 41 % aus diffusen Quellen. Die Einträge aus punktuellen Quellen dominieren nach wie vor deutlich die bioverfügbaren P-Einträge.

Ein deutliches Eintragsbild lassen die diffusen Eintragspfade für N erkennen. Auf Grund der Dominanz von Mittellandstandorten im REZGUS wird die Landnutzung zu einem Grossteil durch intensive Landwirtschaft geprägt. Daher überwiegt der Eintragspfad Auswaschung mit 31 % der Einträge im REZGUS. In Abbildung 29 lassen sich vereinzelte Hotspots ausmachen (orange bis rote Färbung). An diesen Standorten kommt es zur Kombination von intensiver landwirtschaftlicher Nutzung (z.B. Ackerland) und einer möglichen Drainage, welche zu erhöhten N-Austrägen über Auswaschung führt.

Die überwiegend geringe Hangneigung im REZGUS erklärt auch die anteilig geringen Einträge über die restlichen N-Eintragspfade.

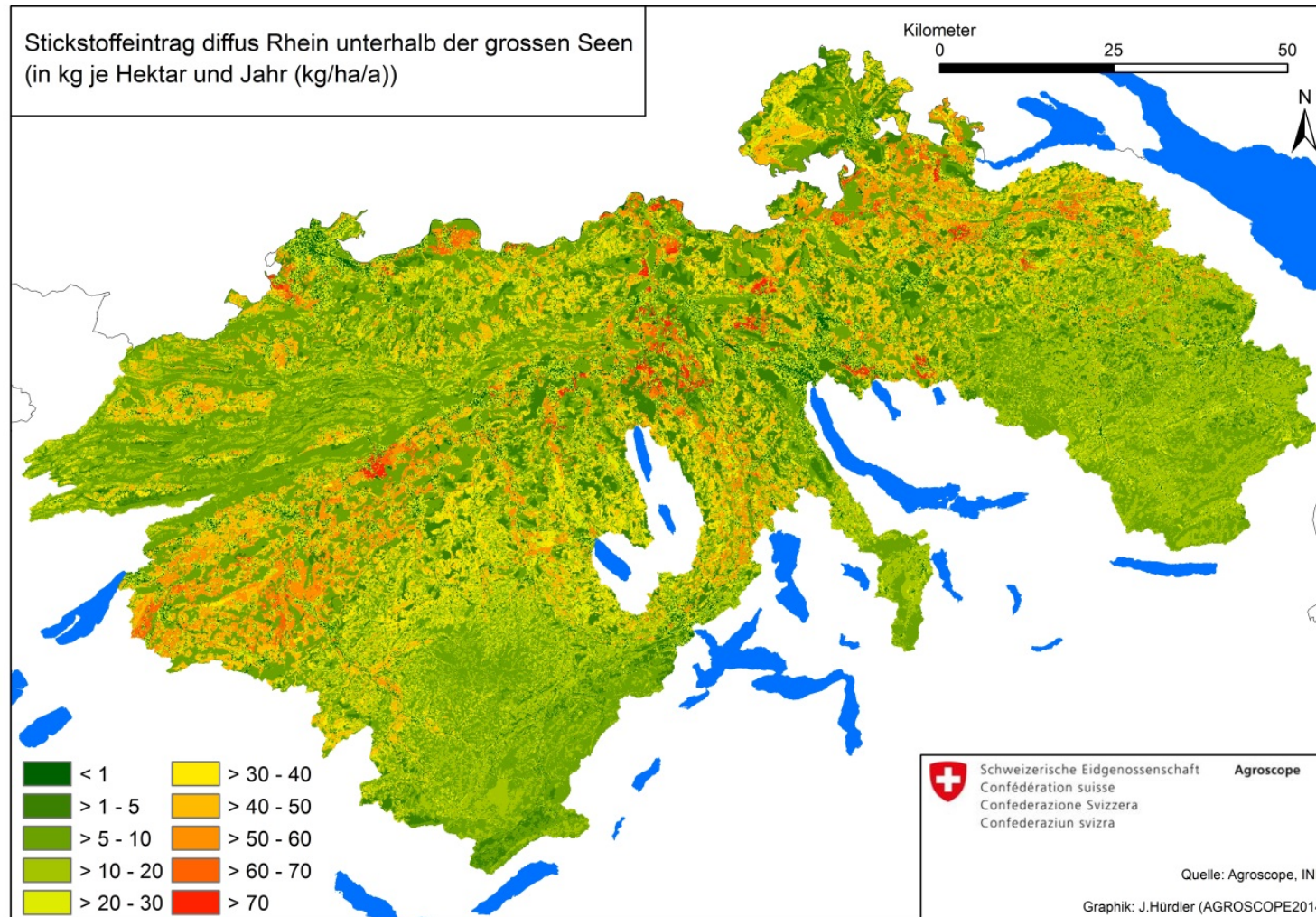


Abbildung 29: Diffuser Stickstoffeintrag REZGUS

Das REZGUS kann in diesem Bericht auch für eine erste Standortbestimmung der aktualisierten Modellversion von MODIFFUS genutzt werden. Da das REZGUS bereits in vergangenen Modellversionen berechnet wurde (PRASUHN & HURNI 1999), kann durch einen Vergleich mit den früheren Ergebnissen eine Betrachtung der Entwicklung von Nährstoffeinträgen erfolgen. Allerdings sollte dieser Vergleich immer in Relation zu der Weiterentwicklung von MODIFFUS betrachtet werden. Aus diesem Grund kann die Eintragsentwicklung nur als Anhaltspunkt genommen werden und lässt keine definitiven Schlüsse zu.

Ein wichtiges Ergebnis, unter Berücksichtigung der Weiterentwicklung von MODIFFUS, ist die Konsistenz im Entwicklungstrend für Gesamt-P. Die rückläufige Entwicklung der Gesamt-P-Einträge in Abbildung 30 ist in den letzten Berechnungsphasen nicht so stark wie im Vergleich von der ersten Berechnung (1985) zur zweiten Berechnung (1996), aber von 2001 auf 2010 nochmals deutlich sichtbar. Darüber hinaus ist die Relation zu den gemessenen Pegelmesswerten der Messstation Weil am Rhein erhalten geblieben: es gibt eine generelle Überschätzung der P-Messwerte.

Beim Gesamt-P zeigt sich eine Dominanz der punktuellen Einträge bis 2001, auch wenn diese in der ersten Periode drastisch reduziert wurden. Das ist mit der hohen Bevölkerungsdichte in diesem Einzugsgebiet zu erklären. Bis 2010 konnte der Anteil aus punktuellen Quellen gegenüber 2001 aber nochmals mehr als halbiert werden. Dadurch ist der Anteil aus punktuellen Quellen inzwischen auf 29 % gesunken. Die Einträge aus den Seen und dem deutschen Einzugsgebietsteil machen 32 % der Gesamtfracht aus, die Einträge aus diffusen Quellen im REZGUS 38 %.

Bei einer genauen Betrachtung der diffusen P-Einträge wird durch die aktuelle Berechnung der rückläufige Entwicklungstrend unterbrochen. Es ist ein Anstieg der diffusen P-Einträge zu verzeichnen. Begründet liegt das vermutlich in der Anpassung verschiedener Berechnungsansätze und in der Verwendung neuer höher aufgelöster Grundlagendaten, wie der Erosionsrisikokarte oder darauf aufbauenden Gewässeranschlusskarte. Eine Neuberechnung der diffusen Einträge mit Modellversion MODIFFUS 3.0 für die Periode um das Jahr 2000 soll dies klären. Ein entsprechendes Projekt dazu läuft derzeit (HÜRDLER et al. 2015).

Zu beachten ist weiterhin die unterschiedliche Zeitdauer zwischen den Berechnungsperioden. Die erste, starke Reduktion bei P erfolgte über eine Berechnungspause von 11 Jahren, der Zwischenschritt beschreibt eine Berechnungspause von lediglich 5 Jahren und die jüngste Berechnung erfolgte nach weiteren 9 Jahren. Daher ist es möglich, dass es nicht immer einen gleichbleibenden Abwärts Trend gibt.

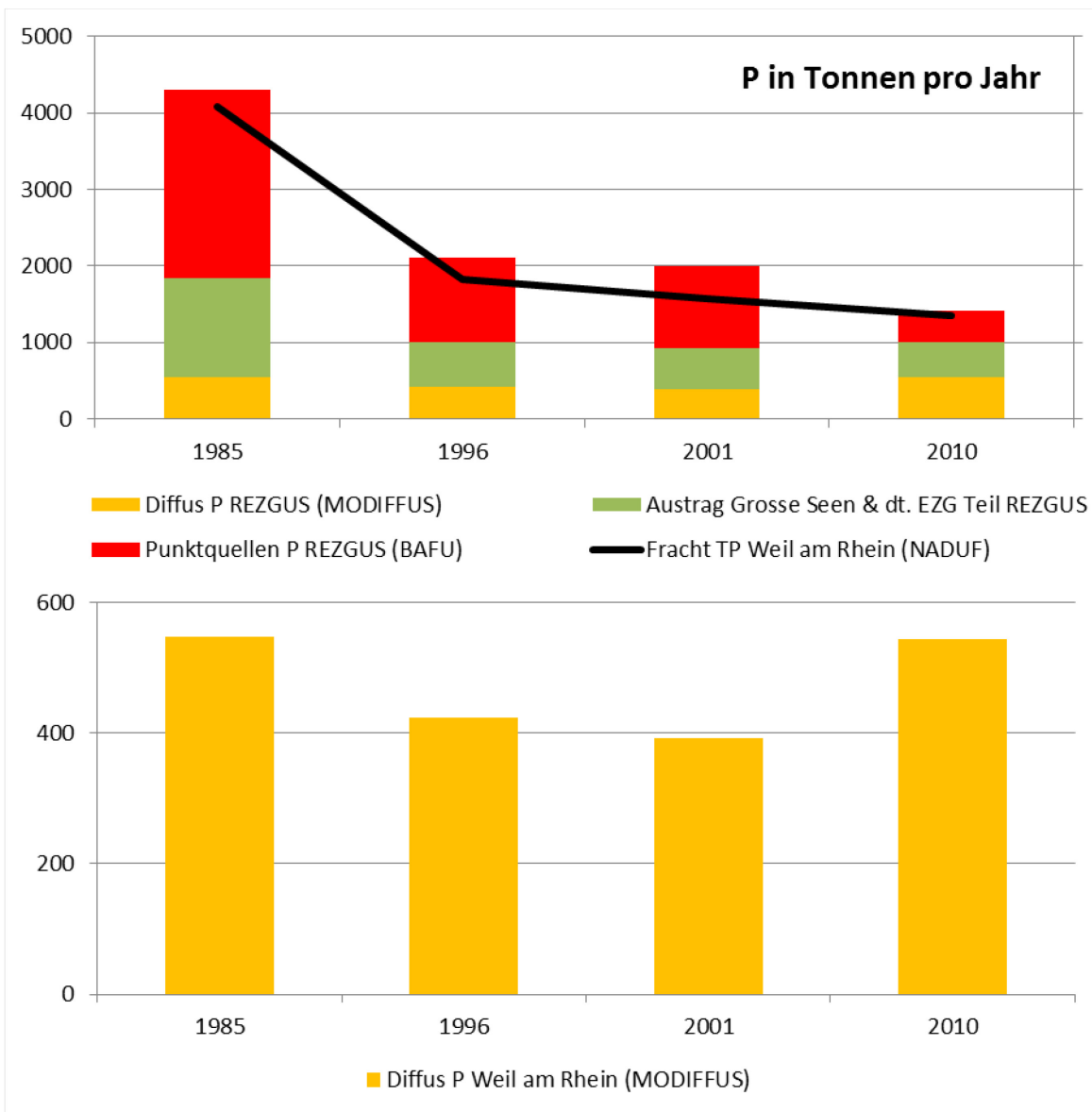


Abbildung 30: Entwicklung der Gesamt-Phosphoreinträge im REZGUS

Die Entwicklung der Gesamt-N-Einträge (N) ist ebenfalls konsistent rückläufig (Abb. 31). Allerdings verändert sich die Relation zu den gemessenen Pegelmesswerten der Messstation Weil am Rhein im Verlauf der Beobachtung. Die berechneten Werte schwanken um den Messwert.

Beim Gesamt-N zeigt sich ebenfalls eine stetige Abnahme der Einträge über punktuelle Quellen. Gleichzeitig nimmt der Anteil der Einträge aus den grossen Seen sowie dem deutschen Einzugsgebietsteil zwischen Bodensee und Basel ab. Allerdings stellt dieser Teil weiterhin den grössten Anteil der berechneten Gesamt-N-Frachten in Weil am Rhein.

Die diffusen N-Einträge beschreiben von 1985 bis 2001 einen gleichbleibenden Abwärtstrend. In der aktuellen Berechnungsperiode kommt es zu einer Verlangsamung der rückschreitenden Entwicklung. Die diffusen N-Einträge bleiben auf annähernd gleichem Niveau wie in der Berechnungsperiode 2001. Es wird aber vermutet, dass der gestoppte Abwärtstrend durch die modellbedingten Änderungen hervorgerufen wird.

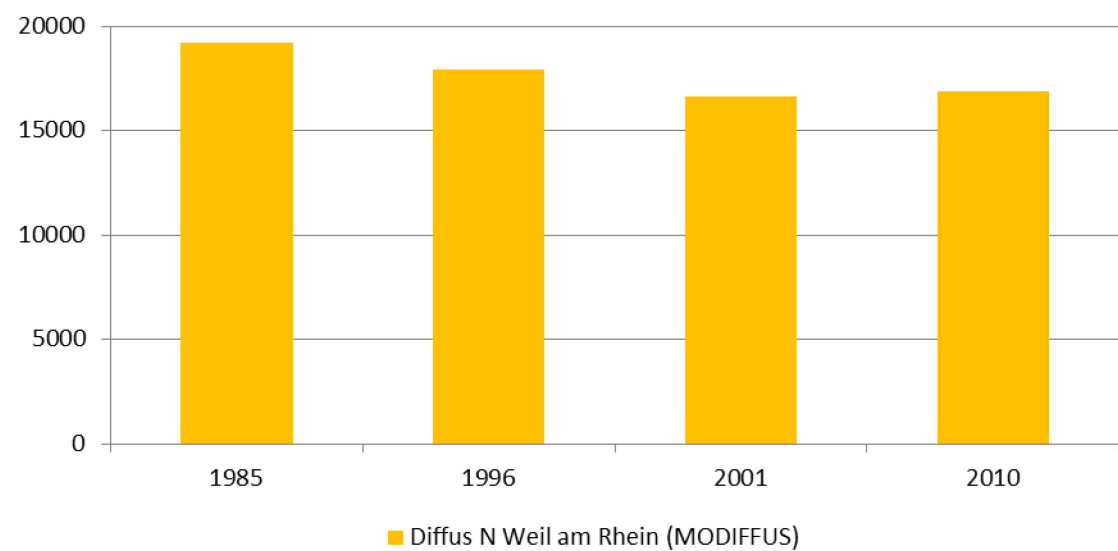
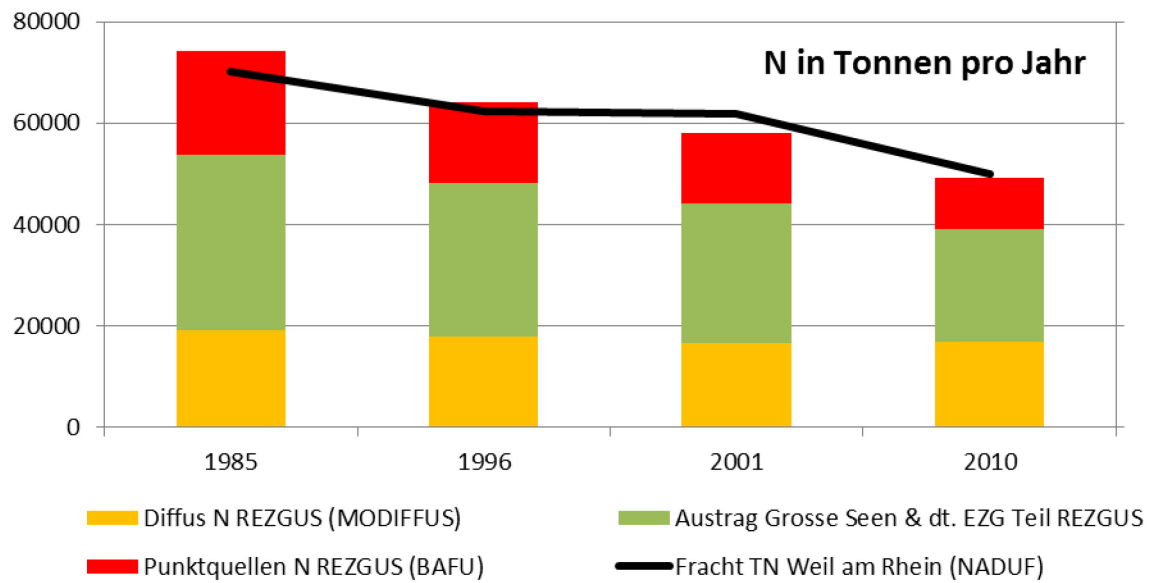


Abbildung 31: Entwicklung der Stickstoffeinträge im REZGUS

3.5 Ergebnisse für hydrologische Einheiten

Durch die hektarbasierte Berechnung mit MODIFFUS 3.0 ist eine Betrachtung der Ergebnisse auf jeder Ebene, hydrologisch oder administrativ, möglich. Für die Betrachtung auf hydrologischer Ebene wurde die Einzugsgebietseinteilung auf Grundlage der notwendigen Berichterstattung des BAFU an die European Environmental Agency (EEA) bzw. Europäische Umweltagentur (EUA) durchgeführt. Hierbei dienen die „Spatial Units“ (SU) und die übergeordneten „River Basin Districts“ (RBD) als Grundlage der Ergebnisdarstellung, welche in Abbildung 32 dargestellt ist. Zu beachten beim Vergleich mit internationalen Daten ist, dass die Einträge aus Regenwasserentlastungen im vorliegenden Bericht zu den punktuellen Quellen gezählt wurden.

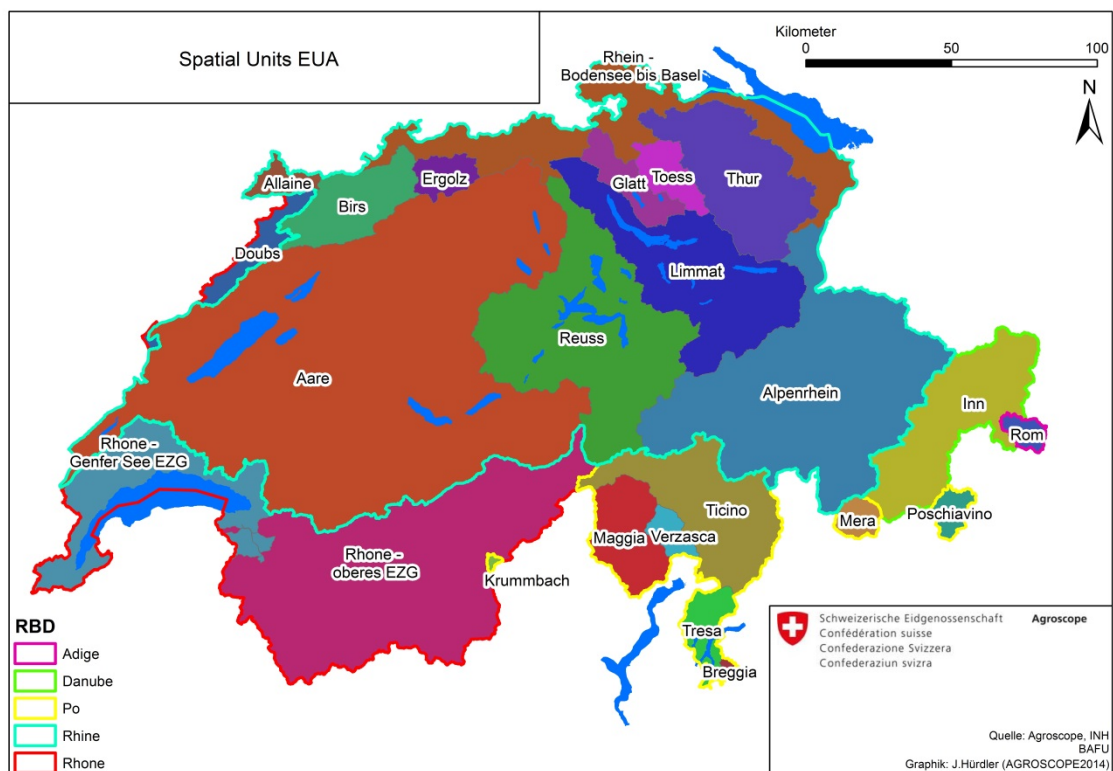


Abbildung 32: Einzugsgebietseinteilung nach European Environmental Agency

Eine Aufspaltung der berechneten Nährstoffeinträge in unterschiedliche Einzugsgebiete ermöglicht einen regionalen Blick auf die Nährstoffeintragssituation. Die gewählte Einzugsgebietsgliederung erlaubt nur einen sehr groben Überblick, da die Einzugsgebiete sehr gross und in sich heterogen sind. Ein wichtiger Anhaltspunkt sind auf Grund der Heterogenität der Einzugsgebiete die flächenspezifischen Nährstoffeinträge.

Stickstoffeintrag

Beim Eintrag von N weisen die Flusseinzugsgebiete Glatt, Rhein (Bodensee–Basel), Allaine und Rhone (Genfer See Gebiet) die höchsten flächenspezifischen diffusen Einträge mit Werten von rund 20 kg N/ha auf (Tab. 25). Das Einzugsgebiet mit den höchsten absoluten N-Einträgen ist die Aare. Dieses Einzugsgebiet ist eines der grössten in diesem Vergleich, was

grundsätzlich hohe absolute Einträge zur Folge hat. Auf Grund eines hohen Anteils landwirtschaftlicher Nutzfläche hat dieses Einzugsgebiet auch einen hohen flächenspezifischen diffusen N-Eintrag mit 17 kg N/ha.

Tabelle 25: Stickstoffeintrag Spatial Units (EUA)

Spatial Unit	kg N/ha (diffus)	diffus N in t	N in t punktuell*	Gesamt N in t	Fläche in ha
1 - Glatt	21	876	809	1686	41'735
2 - Töss	15	528	474	1002	34'348
3 - Limmat	12	2971	2262	5233	239'338
4 - Reuss	12	3953	1888	5841	338'603
5 - Thur	16	2766	1126	3893	170'159
6 - Ergolz	15	398	159	557	26'110
7 - Birs	14	1247	314	1561	86'835
8 - Aare	17	19748	6297	26045	1'161'364
9 - Alpenrhein	6	2898	687	3585	468'837
10 - Doubs	11	433	181	614	38'921
11 - Rhone - oberes EZG	6	3330	1715	5045	519'419
12 - Tresa	13	472	391	863	36'604
13 - Ticino	7	1199	188	1387	161'100
14 - Maggia	8	623	1	624	75'285
15 - Poschiavino	5	82	0	82	16'704
16 - Mera	6	98	2	100	17'732
17 - Inn	4	640	89	729	168'702
18 - Rhone Genfer See	20	3464	3711	7174	176'398
19 - Krummbach	4	8	0	8	1'948
20 - Verzasca	9	167	0	167	18'504
21 - Breggia	9	30	0	30	3'200
22 - Rom	4	46	0	46	12'844
23 - Allaine	19	393	61	454	20'327
24 - Rhein - Bodensee-Basel	19	4275	3339	7614	222'717

*inklusive Regenwasserentlastungen

Bei der Betrachtung der River Basin Districts (RBD) gibt es zwei Gruppen (Tab. 26). Die RBD Adige, Donau und Po haben einen geringen flächenspezifischen diffusen N-Eintrag zwischen 4 und 8 kg N/ha. Auf Grund des geringen Anteils an landwirtschaftlicher Nutzfläche gegenüber hochalpinen Bereichen und Wäldern tendiert der flächenspezifische N-Eintrag zu natürlichen Hintergrundbedingungen. Hingegen verzeichnen die RBD Rhone und Rhein mit einem flächenspezifischen diffusen Eintrag zwischen 10 und 14 kg N/ha höhere Einträge, begründet in der Dominanz von landwirtschaftlicher Nutzfläche in den grossen Flusstälern bzw. dem Mittelland.

Tabelle 26: Diffuse Stickstoffeinträge auf Ebene River Basin District (EUA)

RBD	Fläche in ha	N in t*	kg N/ha
Rhone	734'591	7'232	9.8
Danube	168'685	641	3.8
Adige	12'830	47	3.6
Po	331'099	2'680	8.1
Rhein	2'810'369	40'054	14.3

*ohne Regenwasserentlastungen

Gesamt-Phosphor

Die Betrachtung der Gesamt-P-Einträge wird dominiert durch die hohen flächenspezifischen diffusen Einträge der Spatial Units Rhone (oberes EZG), Verzasca und Maggia (Tab. 27). Flächenspezifische diffuse Einträge von 1.5 bis 1.9 kg P/ha zeugen von einem grossen Gebietsanteil unproduktiver Flächen und starker Neigungen, bzw. Höhenunterschiede in den Einzugsgebieten. Daher kommt es zu verstärkten Einträgen über Erosion. Einzugsgebiete im Mittelland und mit einer geringeren mittleren Neigung tendieren zu niedrigen flächenspezifischen Gesamt-P-Einträgen (z.B. Glatt, Allaine, Ergolz, Birs und Rhein (Bodensee – Basel)).

Tabelle 27: Gesamt-Phosphoreintrag Spatial Units (EUA)

Spatial Unit	kg P/ha diffus	diffus P in t	P punktuell in t*	gesamt P in t	Fläche in ha
1 - Glatt	0.38	16	23	39	41'735
2 - Töss	0.51	17	13	30	34'348
3 - Limmat	1.13	270	110	380	239'338
4 - Reuss	1.09	368	63	431	338'603
5 - Thur	0.85	144	46	190	170'159
6 - Ergolz	0.32	8	7	16	26'110
7 - Birs	0.37	32	14	46	86'835
8 - Aare	0.75	870	225	1095	1'161'364
9 - Alpenrhein	0.42	199	30	229	468'837
10 - Doubs	0.45	18	8	25	38'921
11 - Rhone – oberes EZG	1.67	868	49	918	519'419
12 - Tresa	1.02	37	14	52	36'604
13 - Ticino	0.81	130	9	139	161'100
14 - Maggia	1.47	111	0	111	75'285
15 - Poschiavino	0.71	12	0	12	16'704
16 - Mera	1.05	19	0	19	17'732
17 - Inn	0.46	77	11	88	168'702
18 - Rhone Genfer See	0.51	90	152	241	176'398
19 - Krummbach	0.40	1	0	1	1'948
20 - Verzasca	1.90	35	0	35	18'504
21 - Breggia	0.52	2	0	2	3'200
22 - Rom	0.12	2	0	2	12'844
23 - Allaine	0.39	8	2	10	20'327
24 - Rhein Bodensee-Basel	0.41	92	108	200	222'717

*inklusive Regenwasserentlastungen

Gelöster Phosphor

Da die Betrachtung der Gesamt-P-Einträge im Zusammenhang mit Gewässereutrophierung von geringer Bedeutung ist, soll der Eintrag von gelöstem P zusätzlich betrachtet werden. Dabei verändert sich das Bild gegenüber den Gesamt-P-Einträgen. Während die erosionsdominierten Spatial Units bei den Gesamt-P-Einträgen dominierten, verschiebt sich das Bild zu den Spatial Units, welche durch landwirtschaftliche Nutzflächen dominiert werden. Generell sinken die flächenspezifischen diffusen Einträge, begründet durch den Wegfall der erosionsgebundenen P-Einträge. Die höchsten flächenspezifischen diffusen Einträge weisen Mittellandeinzugsgebiete auf (Tab. 28). Mit einem flächenspezifischen diffusen Eintrag von 0.28 bis 0.40 kg P/ha sind Einzugsgebiete wie z.B. Glatt, Töss, Thur und Limmat stark belastet. Spatial Units mit einem hohen Anteil an unproduktiven Flächen weisen gelöste diffuse P-Einträge zwischen 0.10 und 0.15 kg P/ha auf.

Tabelle 28: Gelöster Phosphoreintrag Spatial Units (EUA)

Spatial Unit	kg P/ha gelöst dif- fus	gelöst diffus P in t	P punktuell in t*	gesamt P in t	Fläche in ha
1 - Glatt	0.28	12	23	35	41'735
2 - Toess	0.29	10	13	23	34'348
3 - Limmat	0.29	70	110	180	239'338
4 - Reuss	0.26	90	63	153	338'603
5 - Thur	0.40	68	46	114	170'159
6 - Ergolz	0.26	7	7	14	26'110
7 - Birs	0.24	21	14	35	86'835
8 - Aare	0.28	321	225	545	1'161'364
9 - Alpenrhein	0.13	61	30	91	468'837
10 - Doubs	0.30	12	8	20	38'921
11 - Rhone oberes EZG	0.10	53	49	103	519'419
12 - Tresa	0.17	6	14	21	36'604
13 - Ticino	0.14	22	9	31	161'100
14 - Maggia	0.13	10	0	10	75'285
15 - Poschiavino	0.12	2	0	2	16'704
16 - Mera	0.10	2	0	2	17'732
17 - Inn	0.09	15	11	26	168'702
18 - Rhone Genfer See	0.26	46	152	198	176'398
19 - Krummbach	0.11	0	0	0	1'948
20 - Verzasca	0.14	3	0	3	18'504
21 - Breggia	0.14	0	0	0	3'200
22 - Rom	0.10	1	0	1	12'844
23 - Allaine	0.27	6	2	8	20'327
24 - Rhein Bodensee-Basel	0.26	58	108	166	222'717

*inklusive Regenwasserentlastungen

Das gleiche Bild zeigt sich bei der Betrachtung der gelösten P-Einträge auf Ebene River Basin District (Tab. 29). RBD mit einer Dominanz an hochalpinen Regionen wie Rhone, Donau, Adige und Po haben einen mittleren flächenspezifischen diffusen Eintrag zwischen 0.09 und 0.14 kg P/ha. Hingegen weist der Rhein, welcher mit seinen Spatial Units Aare, Glatt und Töss einen Grossteil des Mittellands entwässert und durch grosse Bereiche landwirtschaftlicher Nutzflächen charakterisiert ist, einen flächenspezifischen diffusen Eintrag von gelöstem P von 0.26 kg P/ha auf.

Tabelle 29: Diffuse Einträge an gelöstem und Gesamt-Phosphor auf Ebene River Basin District (EUA)

RBD	Fläche in ha	gelöst P in t*	kg gelöst P/ha	gesamt P in t*	kg Gesamt-P/ha
Rhone	734'591	111	0.15	977	1.33
Donau	168'685	15	0.09	77	0.46
Adige	12'830	1	0.10	2	0.12
Po	331'099	45	0.14	347	1.05
Rhein	2'810'369	723	0.26	2'023	0.72

*ohne Regenwasserentlastungen

3.6 Ergebnisse administrative Einheiten (Kantone)

Für die Betrachtung auf administrativer Ebene wurden die Kantone der Schweiz gewählt (Abb. 33). Es wäre auch eine feiner aufgelöste Ergebnisanalyse möglich, z.B. auf Bezirks- oder Gemeindeebene.

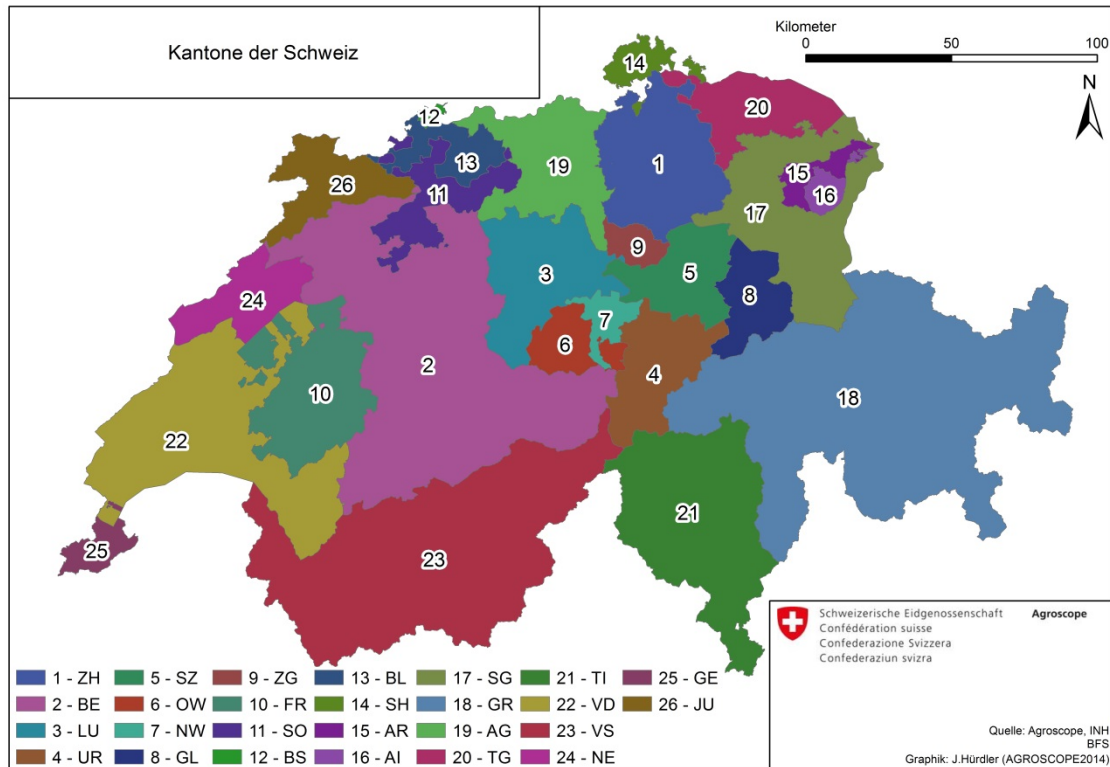


Abbildung 33: Ergebnis Analyseregionen (administrativ, kantonale Ebene)

Stickstoffeintrag pro Kanton

Die diffusen N-Einträge betragen schweizweit 51'493 t, knapp 30 % davon werden aus den Kantonen BE (17 %) und VD (12 %) beigesteuert (Tab. 30). Die Innerschweizer Kantone tragen dagegen jeweils nur mit ≤ 1 % zur diffusen N-Fracht bei. Die landwirtschaftlich stark genutzten Mittellandkantone ZH, LU, AG, FR und TG tragen jeweils mit 5 % - 7 % zu den diffusen N-Einträgen bei. Bei Betrachtung der flächenspezifischen diffusen Verluste zeigen die Kantone GE, AG, FR, TG mit Werten von über 20 kg N/ha die höchsten Verluste, die Kantone GR, VS, UR mit < 10 kg N/ha die niedrigsten Verluste. Unter Berücksichtigung der punktuellen Einträge gelangen schweizweit insgesamt 75'441 t N in die Gewässer (Tab. 30). Die grössten absoluten N-Einträge über punktuelle Quellen gelangen in Kantonen mit grossen Agglomerationen in die Gewässer, wie z.B. BE (11'358 t), VD (8'385 t), ZH (6'688 t) und AG (4'537 t).

Insgesamt gesehen zeigt sich aber, dass Kantone mit grossen diffusen N-Einträgen auch insgesamt die grössten Anteile (BE 15 %, VD 11 %, ZH 9 %) an den totalen N-Einträgen stellen.

Tabelle 30: Zusammenstellung der diffusen, punktuellen und totalen Stickstoffeinträge auf kantonaler Ebene

Kantone	kg N/ha (diffus)	diffus N in t	%-Anteil diffus	N punktuell in t*	Total N in t	%-Anteil total N	Fläche in ha
1 - ZH	20	3'381	7	3'342	6'724	9	172'884
2 - BE	15	8'709	17	2'763	11'472	15	595'940
3 - LU	16	2'402	5	1'008	3'410	5	149'328
4 - UR	8	828	2	100	929	1	107'630
5 - SZ	12	1'130	2	262	1'391	2	90'803
6 - OW	10	470	1	109	580	1	49'064
7 - NW	11	309	1	158	467	1	27'594
8 - GL	10	668	1	6	673	1	68'543
9 - ZG	17	398	1	404	802	1	23'871
10 - FR	20	3'349	7	697	4'046	5	167'077
11 - SO	19	1'477	3	936	2'413	3	79'039
12 - BS	15	55	0	1'019	1'074	1	3'698
13 - BL	17	859	2	723	1'582	2	51'772
14 - SH	19	570	1	432	1'002	1	29'831
15 - AR	11	268	1	124	392	1	24'292
16 - AI	11	188	0	53	240	0	17'239
17 - SG	13	2'654	5	1'246	3'899	5	202'563
18 - GR	5	3'665	7	692	4'357	6	710'492
19 - AG	21	2'907	6	1'656	4'563	6	140'395
20 - TG	20	2'029	4	640	2'668	4	99'084
21 - TI	10	2'688	5	826	3'515	5	281'219
22 - VD	19	6'057	12	2'406	8'463	11	321'199
23 - VS	6	3'393	7	1'677	5'070	7	522'445
24 - NE	13	1'039	2	591	1'630	2	80'304
25 - GE	23	641	1	1'886	2'527	3	28'126
26 - JU	16	1'360	3	191	1'551	2	83'867
CH		51'493		23'947	75'441		4'128'299

*inklusive Regenwasserentlastungen

Eintrag Gesamt-Phosphor pro Kanton

Die diffusen Gesamt-P-Einträge betragen schweizweit 3'490 t, der Kanton VS (25 %) ist der grösste Emittent diffusen Gesamt-P (Tab. 31). 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 P-Frachten, da sie auch über viele unproduktive Flächen mit hoher natürlicher Erosion verfügen.

Die flächenspezifischen Einträge diffusen Gesamt-P sind in VS (1.67 kg P/ha) und den Inner-schweizer Kantonen UR (1.45 kg P/ha), GL (1.45 kg P/ha) und SZ (1.41 kg P/ha) am höchsten, begründet in hohen Anteilen unproduktiver Flächen. Die städtisch geprägten Kantone BS (0.12 kg P/ha) und GE (0.32 kg P/ha) haben die geringsten flächenspezifischen diffusen Gesamt-P-Verluste. Die Berücksichtigung der punktuellen Einträge ergibt einen schweizweiten Eintrag von 4'385 t P in die Gewässer (Tab. 31). Die grössten absoluten Gesamt-P-Einträge gelangen auch bei Betrachtung der totalen Einträge in den Kantonen VS (21 %) und BE (15 %) in die Gewässer.

Tabelle 31: Zusammenstellung der diffusen, punktuellen und totalen Gesamt-Phosphoreinträge auf kantonal-er Ebene

Kantone	kg P/ha (diffus)	diffus P in t	%-Anteil diffus	P punktuell in t*	Total P in t	%-Anteil total P	Fläche in ha
1 - ZH	0.43	74	2	134	208	5	172'884
2 - BE	0.92	551	16	92	642	15	595'940
3 - LU	0.74	111	3	34	145	3	149'328
4 - UR	1.45	157	4	5	161	4	107'630
5 - SZ	1.41	128	4	12	140	3	90'803
6 - OW	1.14	56	2	5	61	1	49'064
7 - NW	0.85	24	1	4	28	1	27'594
8 - GL	1.45	99	3	1	100	2	68'543
9 - ZG	0.71	17	0	9	26	1	23'871
10 - FR	0.57	94	3	32	127	3	167'077
11 - SO	0.38	30	1	34	64	1	79'039
12 - BS	0.12	0	0	37	38	1	3'698
13 - BL	0.31	16	0	18	34	1	51'772
14 - SH	0.41	12	0	13	26	1	29'831
15 - AR	0.99	24	1	5	29	1	24'292
16 - AI	1.21	21	1	1	22	1	17'239
17 - SG	0.90	182	5	45	226	5	202'563
18 - GR	0.44	313	9	41	355	8	710'492
19 - AG	0.43	61	2	63	124	3	140'395
20 - TG	0.38	38	1	27	65	1	99'084
21 - TI	1.15	325	9	31	356	8	281'219
22 - VD	0.63	201	6	77	277	6	321'199
23 - VS	1.67	874	25	48	922	21	522'445
24 - NE	0.50	41	1	25	65	1	80'304
25 - GE	0.32	9	0	93	102	2	28'126
26 - JU	0.39	33	1	8	40	1	83'867
CH		3490		896	4385		4'128'299

*inklusive Regenwasserentlastungen

Eintrag gelöster Phosphor pro Kanton

Die diffus gelösten P-Einträge betragen schweizweit 909 t, der Kanton BE (17 %) ist hier auf Grund seiner Grösse und einer Vielzahl von Flächen unter Grünlandbewirtschaftung der grösste Emittent, gefolgt von weiteren flächenmässig grossen Kantonen wie VD (10 %), GR (9 %) und SG (8 %).

Bei den flächenspezifischen diffusen Einträgen an gelösten P zeigen die Kantone AR, AI, ZG, SZ, LU, SG und FR mit Werten über 0.3 kg P/ha die höchsten Verluste. In diesen flächenmässig kleinen Kantonen bestimmt eine intensive Graslandbewirtschaftung die Landnutzung und führt durch die Kombination mit grossen Niederschlagsmengen zu den hohen Verlusten. Die niedrigsten flächenspezifischen Verluste mit <0.2 kg P/ha findet man in den Kantonen BS, VS, GR, UR, TI und SH.

Unter Berücksichtigung der punktuellen Einträge gelangen schweizweit insgesamt 1'805 t bioverfügbarer P in die Gewässer der Schweiz (Tab. 32). Die grössten absoluten gelösten P-Einträge gelangen in den Kantonen, BE (13 %), ZH (10 %) und VD (9 %) in die Schweizer Gewässer. In diesen Kantonen fallen auch die grössten Mengen P über punktuelle Quellen an, da in diesen Kantonen die bevölkerungsstärksten Agglomerationen verortet sind.

Tabelle 32: Zusammenstellung der diffusen, punktuellen und totalen gelösten Phosphoreinträge auf kantonaler Ebene

Kantone	kg P/ha (diffus)	Diffus gelöst P in t	%-Anteil diffus	P punktuell in t*	Total P in t	%-Anteil total P	Fläche in ha
1 - ZH	0.29	50	6	134	185	10	172'884
2 - BE	0.25	150	17	92	242	13	595'940
3 - LU	0.37	55	6	34	89	5	149'328
4 - UR	0.14	15	2	5	20	1	107'630
5 - SZ	0.35	32	4	12	44	2	90'803
6 - OW	0.24	12	1	5	17	1	49'064
7 - NW	0.29	8	1	4	12	1	27'594
8 - GL	0.20	14	1	1	14	1	68'543
9 - ZG	0.42	10	1	9	19	1	23'871
10 - FR	0.31	53	6	32	85	5	167'077
11 - SO	0.25	20	2	34	54	3	79'039
12 - BS	0.09	0	0	37	38	2	3'698
13 - BL	0.23	12	1	18	30	2	51'772
14 - SH	0.19	6	1	13	19	1	29'831
15 - AR	0.49	12	1	5	16	1	24'292
16 - AI	0.48	8	1	1	10	1	17'239
17 - SG	0.35	72	8	45	116	6	202'563
18 - GR	0.11	80	9	41	121	7	710'492
19 - AG	0.26	36	4	63	99	6	140'395
20 - TG	0.29	29	3	27	56	3	99'084
21 - TI	0.15	43	5	31	73	4	281'219
22 - VD	0.27	87	10	77	164	9	321'199
23 - VS	0.10	53	6	48	101	6	522'445
24 - NE	0.31	25	3	25	49	3	80'304
25 - GE	0.22	6	1	93	100	6	28'126
26 - JU	0.26	22	2	8	30	2	83'867
CH		909		896	1805		4'128'299

*inklusive Regenwasserentlastungen

3.7 Natürliche Hintergrundlast

Die diffusen Nährstoffeinträge in die Gewässer können noch differenziert betrachtet werden. Man unterscheidet in diffuse Einträge, welche als natürliche Hintergrundlast in die Gewässer eingetragen werden und anthropogen beeinflusste Einträge. Dies kann Hinweise auf die Wirksamkeit möglicher geplanter Reduktionsmassnahmen geben, da eine Beeinflussung von Einträgen aus natürlichem Hintergrund (z.B. natürliche Erosion von hochalpinen Bereichen) kaum möglich ist.

Das Verhältnis natürlicher Hintergrundlast zu diffus anthropogener Belastung bei den Gesamt-P-Einträgen wird von der natürlichen Hintergrundlast dominiert (71 % / 29 %) (Tab. 33). Mit 1'024 t sind nur knapp 30 % der Gesamt-P-Einträge diffus anthropogenen Ursprungs. Bei Betrachtung des hauptsächlich eutrophierungswirksamen gelösten P verschiebt sich das Verhältnis zu den diffus anthropogen belasteten Einträgen (33 % / 67 %) (Tab. 33). Mit 608 t sind zwei Drittel des diffusen gelösten P anthropogenen Ursprungs.

Dieses Verhältnis entspricht ungefähr dem Verhältnis des Eintrags von Gesamt-N. Hier gelangen 35 % aus natürlichem Hintergrund in die Gewässer und 65 % aus diffus anthropogen belasteten Quellen. Die anthropogen verursachten N-Einträge betragen 33'324 t.

Tabelle 33: Natürliche Hintergrundlast und diffus anthropogene Belastung in der Schweiz

	Diffus total	natürliche Hintergrundbelastung	Diffus anthropogene Belastung
gesamt P in t	3'490	2'466	1'024
<i>%-Anteil gesamt P</i>		71	29
gelöst P in t	909	301	608
<i>%-Anteil gelöst P</i>		33	67
gesamt N in t	51'493	18'169	33'324
<i>%-Anteil gesamt N</i>		35	65

4 Diskussion

Vergleich mit früheren MODIFFUS-Berechnungen

Ein direkter Vergleich zwischen früheren Berechnungen mit MODIFFUS und den vorliegenden, neuen Berechnungen mit MODIFFUS 3.0 ist aufgrund der zahlreichen Modellanpassungen nur eingeschränkt möglich, soll jedoch helfen, gewisse Tendenzen aufzuzeigen. Abweichungen können allerdings sowohl modellbedingt als auch real (veränderte Nutzung und Bewirtschaftung) sein.

PRASUHN & MOHNI (2003) haben für den Kanton Bern Berechnungen für 1999 mit der letzten MODIFFUS-Version durchgeführt. Das Gebiet umfasste aber hydrologische Einzugsgebiete und nicht exakt die Kantonsgrenze und ist somit knapp 10 % grösser (vorwiegend Mittelland). Daher bietet es sich an, nur die flächenspezifischen Verluste zu vergleichen. Die gesamten diffusen N-Verluste betrugen bei PRASUHN & MOHNI (2003) 15.6 kg N/ha. Im vorliegenden Bericht sind sie mit 14.6 kg N/ha 6 % niedriger. Neben modellbedingten Unterschieden können der grössere Anteil intensiv genutzter Flächen im Mittelland bei PRASUHN & MOHNI (2003) für den höheren Wert dort, sowie die Wirkung von Massnahmen für den niedrigeren Wert in dieser Studie verantwortlich sein. Die flächenspezifischen Gesamt-P-Verluste waren bei PRASUHN & MOHNI (2003) mit 0.83 kg P/ha 10 % geringer als in dieser Studie (0.92 kg P/ha). Die flächenspezifischen gelösten P-Verluste waren bei PRASUHN & MOHNI (2003) mit 0.22 kg P/ha 12 % geringer als in der vorliegenden Studie.

SPIESS & PRASUHN (2006) haben die N-Auswaschung im Kt. Bern für das Jahr 1999 mit einer modifizierten Modellversion gegenüber PRASUHN & MOHNI (2003) erneut berechnet. Das Berechnungsgebiet war rund 4 % kleiner als in der vorliegenden Studie. Die flächenspezifischen diffusen Verluste waren mit 11.1 kg N/ha etwas niedriger als in der vorliegenden Studie (12.0 kg N/ha/Jahr).

Die Berechnungen von SCHMID & PRASUHN (2001) für den Kt. Zürich mit einer älteren, GIS-basierten MODIFFUS-Version ergaben mit 22.2 kg N/ha einen um 12 % höheren Wert gegenüber der vorliegenden Studie (19.6 kg N/ha). Die flächenspezifischen Gesamt-P-Verluste waren mit 0.41 kg P/ha um 5 % geringere, die gelösten P-Verluste mit 0.7 kg P/ha um 7 % geringer als die entsprechenden Werte der vorliegenden Studie (0.43 bzw. 0.29 kg P/ha). Auch hier dürften neben modellbedingten Unterschieden Massnahmen in der Landwirtschaft für die Unterschiede verantwortlich sein.

Für das REZGUS liegen nur Berechnungen mit der ausschliesslich auf Gemeindeebene gerechneten, nicht GIS-basierten MODIFFUS-Vorgängerversion für das Jahr 2001 vor (PRASUHN 2003). Die flächenspezifischen N-Verluste waren dort mit 17.6 kg N/ha 2 % geringer als in der vorliegenden Berechnung (18.2 kg N/ha). Bei den P-Verlusten gibt es grössere Unterschiede. Während die Gesamt-P-Verluste in der älteren Version mit 0.42 kg/ha um 27 % geringer ausfielen gegenüber der vorliegenden Berechnung (0.58 kg P/ha), waren die gelösten P-Verluste mit 0.30 kg P/ha um 2 % niedriger als in der vorliegenden Version (0.31 kg P/ha).

Vergleich mit anderen nationalen Abschätzungen

HELDSTAB et al. (2010) haben in einer Stoffflussanalyse mit dem Bezugsjahr 2005 die N-Flüsse in der Schweiz abgeschätzt. Für die diffusen Stoffverluste aus der Landwirtschaft haben sie sich dabei auf die MODIFFUS-Berechnungen für das REZGUS von PRASUHN (2003) abgestützt. Sie nennen für „Abschwemmung/Auswaschung“ aus Landwirtschaftsflächen

34'000 t N, für die Auswaschung unter Wald 9'000 t N, für die Auswaschung unter der restlichen Fläche 11'000 t N und für die Deposition auf Gewässer 3'000 t N. Mit insgesamt 57'000 t N aus diffusen Quellen sind ihre Werte um 11 % höher als die berechneten Werte in dieser Studie (51'493 t N). Für punktuelle Einträge aus gereinigtem und ungereinigtem Abwasser nennen HELDSTAB et al. (2010) mit 28'000 t N einen um 17 % höheren Wert als in der vorliegenden Studie (23'947 t N). Die gesamten N-Einträge in die Gewässer der Schweiz belaufen sich demnach bei HELDSTAB et al. (2010) auf 85'000 t N gegenüber 75'441 t N in der vorliegenden Studie und sind somit um 9'980 t N bzw. 13 % höher.

BINDER et al. (2009) haben die P-Flüsse der Schweiz für das Bezugsjahr 2006 berechnet. Für die Abschätzung der P-Verluste über Abfluss und Erosion haben sie sich auf die Ergebnisse von PRASUHN (2003) für das REZGUS gestützt. Sie nennen für den Pfad „Abfluss und Erosion“ 1'071 t P und für die „Auswaschung Exkremente“ 20 t P, also insgesamt 1'091 t P aus diffusen Quellen. Sie haben aber die Sedimentdeposition in Seen - und damit die Retention von partikulärem P - berücksichtigt. Entsprechend ist der Wert massiv niedriger als der in der vorliegenden Studie (3'490 t P). Für die punktuellen Einträge (Abfluss ARA) nennen BINDER et al. (2009) 1'069 t P. Dieser Wert ist leicht höher als die 896 t P in der vorliegenden Studie.

Vergleich mit internationalen Abschätzungen

Ähnliche Stoffflussmodellierungen wie mit MODIFFUS 3.0 wurden auch im benachbarten Ausland auf nationaler Ebene durchgeführt. Für Österreich liegen Resultate von ZESSNER et al. (2011) mit dem Modell STOBIMO vor, für Deutschland von FUCHS et al. (2010) mit dem Modell MONERIS. Betrachtet man zunächst das Verhältnis punktueller zu diffuser N-Einträge – gemäss Definitionen in diesem Bericht –, überwiegt in allen drei Ländern der diffuse N-Eintrag deutlich (Tab. 34). Er ist mit je 76 % in Deutschland und Österreich etwas höher als in der Schweiz mit 68 %. Beim P überwiegen in der Schweiz mit 80 % und in Österreich mit 61 % ebenfalls die diffusen P-Einträge, während sie in Deutschland mit 37 % deutlich geringer sind als die punktuellen Einträge. Der Flächenanteil an den Alpen mit hohen partikulären P-Einträgen ist in der Schweiz und in Österreich bedeutend höher als in Deutschland, daher die hohen diffusen P-Anteile in der Schweiz und in Österreich.

Bei Betrachtung der diffusen N-Einträge liegt die höchste flächenspezifische Belastung mit 12.5 kg N/ha in der Schweiz. In Deutschland ist sie mit 11.9 kg N/ha nur geringfügig niedriger, während sie in Österreich mit 7.3 kg N/ha deutlich geringer ist. Die hohen Sickerwassermengen - auch in den Ackerbauregionen - und die grosse natürliche Hintergrundlast führen zu den höchsten Werten in der Schweiz. Die flächenspezifischen diffusen Gesamt-P-Verluste sind mit 0.85 kg P/ha in der Schweiz mit Abstand am höchsten. In Österreich sind sie mit 0.31 kg P/ha und in Deutschland mit 0.23 kg P/ha deutlich niedriger. Die hohe natürliche Hintergrundlast aus dem hohen Anteil alpiner Flächen ist in der Schweiz für die hohen Gesamt-P-Verluste verantwortlich. So beträgt die natürliche Hintergrundlast beim Gesamt-P in der Schweiz 71 %. Österreich hat auch einen hohen alpinen Flächenanteil, entsprechend überwiegt auch hier die natürliche Hintergrundlast mit 52 %, während sie in Deutschland nur 22 % beträgt. Beim N ist der Anteil der natürlichen Hintergrundlast generell deutlich geringer, ist aber auch hier in der Schweiz mit 35 % fast doppelt so hoch wie in Österreich und sechsmal so hoch wie in Deutschland.

Betrachtet man abschliessend nur die für die Massnahmenplanung relevanten flächenspezifischen diffus anthropogen Stoffeinträge, sind diese beim Stickstoff mit 11.3 kg N/ha/Jahr in Deutschland am höchsten und in Österreich am geringsten (6.1 kg N/ha). In Deutschland ist

der Anteil an Ackerland - der Landnutzung mit dem höchsten Nitratauswaschungsrisiko - mit 71 % an der LN bzw. 33 % an der gesamten Fläche mit Abstand am höchsten. In Österreich beträgt der Ackerlandanteil rund 50 % an der LN und 16 % an der Gesamtfläche, in der Schweiz 38 % der LN bzw. 10 % der Gesamtfläche. In Österreich ist der mittlere Jahresniederschlag mit 1100 mm deutlich geringer als in der Schweiz (1400 mm) und vor allem in den grossen Ackerbaugebieten relativ gering.

Die flächenspezifischen diffus anthropogenen Phosphoreinträge sind in der Schweiz mit 0.23 kg P/ha am höchsten. Hohe Niederschlagsmengen, stark reliefiertes Gelände und schlecht durchlässige Böden fördern Oberflächenabfluss und damit verbundene P-Verluste durch Bodenerosion und Abschwemmung.

Tabelle 34: Vergleich mit internationalen Nährstoffeintragsabschätzungen

	Schweiz (MODIFFUS)				Österreich (STOBIMO)				Deutschland (MONERIS)			
	Fläche (ha)	4'128'453			Fläche (ha)	8'355'500			Fläche (ha)	35'734'000		
<i>Eintragsquelle</i>	N total	(%)	P total	(%)	N total	(%)	P total	(%)	N total	(%)	P total	(%)
total (t)	75'441	100	4'386	100	80'315	100	4'252	100	564'800	100	22'200	100
punktuell (t)	23'947*	32	896*	20	18'915*	24	1'647*	39	138'000*	24	14'000*	63
diffus (t)	51'493	68	3'490	80	61'399	76	2'606	61	426'800	76	8'200	37
diffus flächenspezifisch (kg/ha)	12.5		0.85		7.3		0.31		11.9		0.23	
natürl. Hintergrund (t)	18'169	35	2'466	71	10'762	18	1'352	52	23'000	5	1'800	22
diffus anthropogen (t)	33'272	65	1024	29	50'638	82	1'253	48	403'800	95	6'400	78
diffus anthropogen flächenspezifisch (kg/ha)	8.1		0.23		6.1		0.15		11.3		0.18	

*inklusive Einträge aus urbanen Flächen (Regenwasserentlastungen)

Vergleich mit Frachten von Pegelmessungen

Der Vergleich mit an Pegeln gemessenen P- und N-Frachten ist eine Möglichkeit, die berechneten Stofffrachten hinsichtlich Plausibilität zu prüfen. Dabei ist jedoch folgendes zu beachten:

- Die an einem Pegel gemessenen jährlichen Stofffrachten stellen eine Immissionsbetrachtung am Einzugsgebietsausgang dar, die mit MODIFFUS berechneten Stofffrachten sind dagegen eine Emissionsbetrachtung innerhalb des Einzugsgebietes. Nach dem Eintrag eines Stoffes in ein Gewässer können verschiedene Umwandlungs- und Retentionsprozesse auf der Transportstrecke bis zur Pegelmessstelle stattfinden (Sedimentation, Adsorption, Desorption, Denitrifikation etc.).
- Die Einzugsgebiete sollten möglichst keine Seen, Kraftwerke, grössere anthropogene Wasserentnahmen oder Umleitungen, unterirdische Zu- oder Ableitungen etc. enthalten, um die Unterschiede zwischen Immissions- und Emissionsbetrachtung möglichst klein zu halten.
- Die gemessenen Stofffrachten sollten Mittelwerte mehrjährige Messreihen sein, da die jährlichen Schwankungen - meist in Abhängigkeit der Abflussmengen - gross sein können.
- Die gemessenen Stofffrachten sollten von Messstellen mit abflussproportionaler Probenahme stammen. Nur dann sind hochwasserbedingte Stofffrachten adäquat berücksichtigt. Aus Stichproben von Stoffkonzentrationsmessungen berechnete Stofffrachten unterschätzen häufig die Stofffrachten, vor allem beim partikulären Phosphor.
- Auch die gemessenen jährlichen Stofffrachten sind mit Unsicherheiten behaftet (Probenahme, Messung, Analytik, Abfluss-Konzentrations-Beziehung etc.). Am Einzugsgebietsausgang wird die Summe der diffusen und punktuellen Austräge gemessen. Sowohl die Berechnung der diffusen Einträge mit MODIFFUS, als auch die der punktuellen Einträge ist mit Unsicherheiten behaftet.

Bedingt durch die oben aufgeführten Anforderungen an gemessene Stofffrachten konnten nur 10 Einzugsgebiete – meist NADUF-Stationen – für einen Vergleich herangezogen werden (Tab. 35). Beim Stickstoff konnte bei sieben Einzugsgebieten eine gute bis befriedigende Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten mittleren jährlichen Stofffrachten erzielt werden. In den Einzugsgebieten Glatt und Rhone liegen die berechneten Einträge der diffusen und punktuellen Quellen deutlich über den gemessenen Jahresfrachten am Pegel, im Einzugsgebiet Töss wurde dagegen eine deutlich höhere Fracht gemessen.

Beim Gesamt-Phosphor wurde in allen zehn Einzugsgebieten eine z.T. massiv höhere Fracht aus diffusen und punktuellen Quellen berechnet als an den Pegeln gemessen wurde. Eine Überschätzung der Emissionsbetrachtung gegenüber der Immissionsbetrachtung war zu erwarten gewesen. Vor allem partikulärer Phosphor kann im jeweiligen Einzugsgebiet an zahlreichen Stellen sedimentiert werden (Seen, Stauseen, Talauen etc.). So halten z.B. die Talsperren bzw. Stauseen oberhalb von Brienzwiler (Grimsel etc.) riesige Mengen an Sediment und partikulären Phosphor zurück.

Tabelle 35: Vergleich der an ausgewählten Pegelmessstellen gemessenen mittleren P- und N-Jahresfrachten (Immissionsbetrachtung) mit den für das entsprechende Einzugsgebiet berechneten Stofffrachten mit MODIFFUS – unter Einbezug der Frachten aus punktuellen Quellen (Emissionsbetrachtung).

	Pegel Gesamt- Stickstoff (t/a)	MODIFFUS N (t/a)	% Abwei- chung	Pegel Gesamt- Phosphor (t/a)	MODIFFUS P (t/a)	% Abwei- chung	Pegel Anzahl Messjahre	Pegel Jahre
Aare-Brienzwiler	430	470	9	44	158	262	2	2005;2011
Birs-Münchenstein	1253	1550	24	29	46	62	3	2008-2010
Glatt-Rheinmündung	1024	1547	51	24	39	63	7	2005-2011
Kleine Emme-Littau	662	643	-3	47	55	17	1	2005
Reuss-Gebenstorf	5472	5825	6	286	374	31	6	2005-2010
Rhône-Porte du Scex	3787	5321	41	595	930	56	6	2005-2010
Thur-Andelfingen	3754	3954	5	160	194	21	6	2005-2010
Ticino-Riazzino	1398	1381	-1	50	141	184	2	2005;2006
Töss-Freienstein	1326	922	-30	19	44	129	7	2005-2011
Rhein-Weil (REZGUS)	48762	50073	3	1323	1413	7	6	2005-2010
Mittel			11			85		

5 Ausblick

Die zahlreichen Anpassungen bei MODIFFUS 3.0 – bedingt durch die immer besseren digitalen Grundlagendaten und Erkenntnisgewinn – erschweren einen Vergleich der Resultate mit früheren Versionen von MODIFFUS (siehe Kap. 4), da nicht klar ist, ob resultierende Unterschiede in den Stoffverlusten methodisch bedingt sind oder aufgrund von Änderungen der landwirtschaftlichen Nutzung und Bewirtschaftung erfolgt sind. Daher ist eine rückwirkende Berechnung mit dem Modellansatz MODIFFUS 3.0 sinnvoll. Entsprechend sollen die Stoffverluste für das Jahr 2000 gerechnet werden. Einerseits liegen für 2000 alle benötigten Grundlagendaten vor bzw. lassen sich mit vertretbarem Aufwand anpassen, andererseits sind in 10 Jahren Unterschiede zu erwarten, die über den Modellunsicherheiten liegen und daher Hinweise auf die Wirksamkeit verschiedener Massnahmen in der Landwirtschaft, die in den letzten 10 Jahren eingeführt wurden, erlauben. Dies bildet eine wichtige Grundlage für Szenario-Berechnungen in die Zukunft.

MODIFFUS 3.0 bietet weiterhin eine gute Modellierungsplattform für die Berechnung diffuser Nährstoffeinträge unter Berücksichtigung verschiedener Umweltziele. Durch die gezielte und begründete Beeinflussung verschiedener Parameter im Modell soll die Wirkung landwirtschaftlicher Massnahmen simuliert werden und deren Effekt auf einer nationalen Betrachtungsebene abgeschätzt werden. Hierzu sollen verschiedene Berechnungsszenarien entwickelt und modelliert werden. Ein entsprechendes Projekt dazu läuft derzeit (HÜRDLER et al. 2015).

6 Literatur

- ALDER, S., HERWEG, K., LINIGER, H., PRASUHN, V. (2013): Gewässeranschlusskarte der Erosionsrisikokarte der Schweiz (ERK2) im 2*2-Meter-Raster, Universität Bern und Agroscope, 47 Seiten.
- ARE (2012): Bauzonenstatistik Schweiz 2012. Bundesamt für Raumentwicklung.
- BAFU (2012): Einzugsgebietsgliederung Schweiz EZGG-CH. Bundesamt für Umwelt.
- BAFU (2014): Karte Stickstoff-Deposition: Jahressummen 2007.
- BAFU & BLW (2008): Umweltziele Landwirtschaft. Hergeleitet aus bestehenden rechtlichen Grundlagen. Umwelt-Wissen Nr. 0820. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt BAFU und vom Bundesamt für Landwirtschaft BLW.
- BÉGUIN, J., SMOLA, S. (2010): Stand der Drainagen in der Schweiz, Bilanz der Umfrage 2008. Bundesamt für Landwirtschaft, Fachbereich Meliorationen.
- BEHRENDT, H., HUBER, P., KORNMILCH, M., OPITZ, D., SCHMOLL, O., SCHOLZ, G. & UEBE, R. (1999): Nährstoffbilanzierung der Flussgebiete Deutschlands. UBA-Texte 75/99, 288 S.
- BEHRENDT, H., BACH, M., KUNKEL, R., OPITZ, D., PAGENKOPF, W.-G., SCHOLZ, G. & WENDLAND, F. (2003): Quantifizierung der Nährstoffeinträge der Oberflächengewässer Deutschlands auf der Grundlage eines harmonisierten Vorgehens. UBA-Texte 82/03, 201 S.
- BFS (2004): Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz 1:200'000. Bundesamt für Statistik.
- BFS (2013a): Landwirtschaftliche Betriebszählungen 2005-2011. Bundesamt für Statistik.
- BFS (2013b): Landwirtschaftliche Betriebszählungen, Zusatzerhebung 2010. Bundesamt für Statistik.
- BFS (2014): Arealstatistik 2004 – 2009, Sektion Geoinformatik, Neuchâtel. Bundesamt für Statistik.
- BINDER, C. R., DE BAAN, L., WITTMER, D. (2009): Phosphorflüsse in der Schweiz. Stand, Risiken und Handlungsoptionen. Abschlussbericht. Umwelt-Wissen Nr. 0928. Bundesamt für Umwelt, Bern. 61.
- BRAUN, M. (1999): Method for the quantification of nutrient losses from diffuse sources into aquatic systems and the effect of measures to reduce water pollution by agriculture. Country paper of Switzerland. - In: van de Kraats J.A. (Ed.): Farming without harming: The impact of agricultural pollution on water systems. 5th Scientific and Technical Review - EurAqua, S. 185-197.
- BRAUN, M., FREY, M., HURNI, P. & U. SIEBER (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.
- BUWAL (1995): Vom Menschen verursachte Luftschadstoff-Emissionen in der Schweiz von 1900 bis 2010. – Schriftenreihe Umwelt Nr. 256, Luft, Bern, 121 S.
- FUCHS, S., SCHERER, U., WANDER, R., BEHRENDT, H., VENOHR, M., OPITZ, D., HILLENBRAND, T., MARSCHEIDER-WEIDEMANN, F. & GÖTZ, T. (2010): Berechnung von

- Stoffeinträgen in die Fliessgewässer Deutschlands mit dem Modell MONERIS. Nährstoffe, Schwermetalle und Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe. UBA-Texte 45/2010, 177 S.
- GISLER, S., LINIGER, H., PRASUHN, V. (2010): Erosionsrisikokarte der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz im 2*2-Meter-Raster (ERK2), Universität Bern und Agroscope, 113 Seiten.
- GRUDAF (2009): Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. Agrarforschung 16 (2).
- GUJER, W. (2007): Siedlungswasserwirtschaft, 3., bearb. Aufl., Springer Verlag, 231 S.
- HELDSTAB J., REUTIMANN J., BIEDERMANN R. & LEU D. (2010): Stickstoffflüsse in der Schweiz. Stoffflussanalyse für das Jahr 2005. Umwelt-Wissen Nr. 1018, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. 128 S.
- HUBACHER R., SCHÄDLER B. (2010): Wasserhaushalt grosser Einzugsgebiete im 20. Jahrhundert. Tafel 6.6. In: Weingartner R., Spreafico M. (Hrsg.): Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES). Bundesamt für Umwelt, Bern
- HÜRDLER, J., PRASUHN, V. SPIESS, E. (2015): Szenario-Berechnungen zur Verminderung diffuser Nährstoffeinträge in die Gewässer der Schweiz mit MODIFFUS. Bericht im Auftrag des BAFU, Agroscope, Zürich (in Vorbereitung).
- LINDENTHAL, T. (2000): Phosphorvorräte in Böden, betriebliche Phosphorbilanzen, und Phosphorversorgung im biologischen Landbau. – Diss. Institut für ökologischen Landbau, Universität für Bodenkultur, Wien, 272 S.
- METEOSWISS (2012): RhiresY, Jährlicher Niederschlag. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie.
- NIEVERGELT, J. (2002): Nitrat und Fruchtfolgen 20 Jahre lang beobachtet. Agrarforschung 9, S. 28-33.
- PRASUHN, V. (1999): Phosphor und Stickstoff aus diffusen Quellen im Einzugsgebiet des Bodensees 1996/97. Bericht Nr. 51 der Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB), 84 S. + Anhang (Sonderband).
- PRASUHN V. (2003): Entwicklung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer im Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der Seen 1985, 1986, 2001. Bericht z.H. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 21 S.
- PRASUHN, V. & M. BRAUN (1994): Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern. Schriftenreihe der Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (FAC) Liebefeld-Bern, Nr. 17, Liebefeld-Bern 1994, 113 S. + Anhang 101 S.
- PRASUHN, V. & P. HURNI (1998): Abschätzung der Stickstoff- und Phosphorverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer und Massnahmen zu deren Verminderung im Klettgau. Entwicklungskonzeption Klettgaurinne. Interreg II EG/EU. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft (IUL), Liebefeld, Bern. 84 S.
- PRASUHN, V. & P. HURNI (1999): Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer im Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der Seen (Stand 1996). Interner Bericht Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau,

- Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft (IUL-Liebefeld), zuhanden des BUWAL, Bern, 31 S.
- PRASUHN, V. & K. GRÜNIG (2001): Evaluation der Ökomassnahmen. Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Bodenerosion. FAL-Schriftenreihe 37, Zürich-Reckenholz, 152 S.
- 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.
- PRASUHN, V. & SPIESS, E. (2003): Regional differenzierte Abschätzung der Nitratauswaschung über Betriebszählungsdaten. In: Bericht über die 10. Lysimetertagung, Irdning, 29.-30.04.03. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning (A), 55-57.
- PRASUHN, V., SPIESS, E. & M. BRAUN (1996): Methoden zur Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in den Bodensee. Bericht Internationale Gewässerschutzkommission Bodensee (IGKB) Nr. 45, 113 S. + Anhang 83 S.
- SCHMID, C. & V. PRASUHN (2000): GIS-gestützte Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Zürich. - Schriftenreihe der FAL 35, Zürich, 114 S.
- SPIESS E. & PRASUHN V. (2006) Weniger Nitrat im Grundwasser dank Ökomassnahmen. Agrarforschung, 13 (1), 4-9.
- STAUFFER W. & SPIESS E. (2001): Einfluss unterschiedlicher Fruchtfolgen und nachwachsender Rohstoffe auf die Nitratauswaschung. In: Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung. Bericht über die 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, Irdning, 24.-25.4.01. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein (BAL), Irdning (A). 47-50.
- WILKE, B. & D. SCHAUB (1996): Phosphatanreicherung bei Bodenerosion. Mitt. Deutsche Bodenkundl. Gesellsch. 79, 435-438.
- STRÄHL, S., ORT, C., SIEGRIST, H., THOMANN, M., OBRECHT J., KURZ, E. (2013): Stickstoffelimination in Schweizer ARA. Aqua & Gas No5, S. 74 – 84.
- SWISSTOPO (2013): swissBOUNDARIES^{3D}. Bundesamt für Landestopographie.
- SWISSTOPO (2014a): swissALTI^{3D}. Bundesamt für Landestopographie.
- SWISSTOPO (2014b): swissTLM^{3D}. Bundesamt für Landestopographie.
- WSL (2012): Evapotranspiration (unveröffentlichter Datensatz). Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.
- WÜST-GALLEY, C., GRÜNIG, A., LEIFELD, J.(2014): Locating Organic Soils for the Greenhouse Gas Inventory, (unpublished)
- ZA-AUI (2014): Datensatz Agrarumweltindikator (AUI) „Erosionsrisiko“, Agroscope, Kompetenzzentrum AUI, Zürich, (unveröffentlicht).
- ZESSNER, M., GABRIEL, O., KOVACS, S., THALER, S., HOCHEDLINGER, G., SCHILLING, C., WINDHOFER, G. (2011): Stoffbilanzmodellierung für Nährstoffe auf Einzugsgebietsebene als Grundlage für Bewirtschaftungspläne und Massnahmenprogramme (STOBIMO-Nährstoffe), Endbericht, 190 S.