



Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Gewässer der Schweiz mit MODIFFUS 3.1, Stand 2020

Autorin und Autoren

Catherine Hutchings, Ernst Spiess, Volker Prasuhn



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Agroscope

Impressum

Herausgeber	Agroscope Reckenholzstrasse 191 8047 Zürich www.agroscope.ch
Auftraggeber	Dieser Bericht wurde im Auftrag, bzw. mit der Unterstützung des Bundesamts für Umwelt BAFU, Bern, verfasst
Auskünfte	volker.prasuhn@agroscope.admin.ch
Redaktion	Volker Prasuhn
Gestaltung	Volker Prasuhn
Titelbild	Catherine Hutchings
Download	agroscope.ch/science Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.
Copyright	© Agroscope 2023
ISSN	2296-729X
DOI	https://doi.org/10.34776/as155g

Haftungsausschluss :

Die in dieser Publikation enthaltenen Angaben dienen allein zur Information der Leser/innen. Agroscope ist bemüht, korrekte, aktuelle und vollständige Informationen zur Verfügung zu stellen – übernimmt dafür jedoch keine Gewähr. Wir schliessen jede Haftung für eventuelle Schäden im Zusammenhang mit der Umsetzung der darin enthaltenen Informationen aus. Für die Leser/innen gelten die in der Schweiz gültigen Gesetze und Vorschriften, die aktuelle Rechtsprechung ist anwendbar.

Inhalt

Zusammenfassung	5
Résumé	7
Summary	10
1 Einleitung	12
1.1 Ausgangslage	12
1.2 Generelle Aussagekraft und Genauigkeit der Erhebungen	13
1.3 Definitionen	14
2 Methodik	17
2.1 Grundlagendaten	17
2.1.1 Bodennutzung	18
2.1.2 Klima	23
2.1.3 Drainage	23
2.1.4 Gewässeranschlusskarte	28
2.1.5 Stickstoffdeposition	28
2.1.6 Bodeneigenschaften	32
2.1.7 Stickstoff- und Phosphorzufuhr durch Ausbringung von Hof- und Recyclingdüngern sowie durch Beweidung	39
2.1.8 Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphor im Oberboden	54
2.1.9 Einzugsgebiete	54
2.1.10 Gemessene Nährstoffkonzentration und Frachten in Oberflächengewässern und im Grundwasser	54
2.1.11 Daten zu Nährstofffrachten aus Abwasserreinigungsanlagen (ARA) und Mischwasserentlastungen	54
2.2 Berechnung mit MODIFFUS 3.1	55
2.2.1 Modellkonzept	55
2.2.2 Berechnung der Wasserflüsse	56
2.2.3 Berechnung der Stoffflüsse	60
3 Resultate und Diskussion	79
3.1 Wasserbilanz	79
3.1.1 Vergleich der Wasserbilanzen und mögliche Einflüsse klimatischer Änderungen	87
3.2 Wasserflüsse	90
3.3.1 Übersicht über die Nährstoffeinträge 2020 und den Veränderungen zu 2010	95
3.3.2 Gesamt-Stickstoff	100
3.3.3 Gesamt-Phosphor	109
3.3.4 Gelöster Phosphor	116
3.3.5 Natürliche Hintergrundlast und diffus anthropogene Belastung	122
3.3.6 Landwirtschaftsbedingte diffuse Stoffeinträge in die Gewässer	122
3.4 Ergebnisse für alle Kantone	123
3.5 Ergebnisse für das Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der grossen Seen (REZGUS) sowie das gesamte Rheineinzugsgebiet	125
3.6 Ergebnisse für die Europäische Umweltagentur (River Basin Districts)	131
3.7 Ergebnisse für die OECD	133

4	Plausibilisierung der Resultate	134
4.1	Vergleich mit gemessenen Nitrat-Konzentrationen im Grundwasser (NAQUA)	134
4.2	Vergleich mit gemessenen N- und P-Frachten in Oberflächengewässern (NADUF)	136
4.3	Vergleich mit anderen Untersuchungen	141
5	Ausblick	142
6	Literatur	144
7	Anhang	151
	Anhang A: Berechnung der Abschwemmungs- und Auswaschungs-gefährdung der Böden	151
	Anhang B: Nährstoffausscheidung pro Tierkategorie, Anzahl Tiere und Hofdüngeranfall	153
	Anhang C: Ausgangswerte für Berechnung der N-Auswaschung unter Ackerland	156
	Anhang D: Auswertungen MODIFFUS für die EEA.....	158
	Anhang E: Auswertungen MODIFFUS für die OECD und Eurostat	160

Zusammenfassung

Verschiedene nationale und internationale Ziele hinsichtlich der Reduzierung der Stickstoff(N)- und Phosphor(P)-Einträge in die Gewässer der Schweiz konnten bisher nicht erreicht werden. Diese Stoffeinträge resultieren einerseits aus punktuellen Quellen (Kläranlagen, Mischwasserentlastungen), andererseits aus diffusen Quellen (überwiegend landwirtschaftsbedingt sowie natürliche Hintergrundlast). Mit dem **Modell** zur Abschätzung **diffuser** Stoffeinträge (MODIFFUS) wurden die diffusen N- und P-Einträge in die Gewässer der gesamten Schweiz für das Jahr 2020 berechnet. Die Ergebnisse dienen dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) zur Berichterstattung an internationale Kommissionen und sind auch im aktuellen agrarpolitischen Kontext relevant. Es handelt sich bei den vorliegenden Berechnungen um eine Emissionsbetrachtung, das heisst, es werden die Einträge aus Landwirtschaft, Wald etc. in die Gewässer erfasst. Im Gegensatz zu Immissionsmessungen wie z. B. Pegelmessdaten werden weder Sedimentation oder Umwandlungsprozesse im Gewässer noch Verdünnungs- oder Anreicherungseffekte berücksichtigt.

MODIFFUS ist ein empirisch-statistisches, GIS-basiertes Stoffflussmodell. Nach Aufbereitung aller Grundlagendaten im Hektarraster wurden die verschiedenen Wasserflüsse (Oberflächenabfluss, Drainage- und Sickerwasserabfluss) für die einzelnen Landnutzungskategorien der Arealstatistik berechnet. Anschliessend wurde die rasterbezogene Berechnung der Stoffflüsse über die verschiedenen Eintragspfade (Erosion, Abschwemmung, Auswaschung, Drainage, Deposition, diffuse Direkteinträge) vorgenommen. Mit Hilfe von GIS-Toolboxen und ArcGIS-Geodatenbanken wurden alle Eingangsdaten, Teilergebnisse und Endergebnisse bereitgestellt. Die klimatischen Daten beziehen sich auf langjährige Mittelwerte, alle anderen Eingangsdaten – soweit möglich – auf das Jahr 2020. Mit MODIFFUS 3.1 liegt eine aktualisierte Version des Modells 3.0 vor. Diverse verfeinerte und/oder zusätzliche Eingangsdaten sowie Erkenntnisgewinn haben zu methodischen Anpassungen geführt. So wurde zum Beispiel die Nährstoffzufuhr mit den Hof- und Recyclingdüngern wesentlich detaillierter erfasst. Entsprechend sind die Ergebnisse nicht direkt mit den früheren Berechnungen mit MODIFFUS 3.0 für die Jahre 2000 und 2010 vergleichbar. Es wurde deshalb versucht, für alle Eintragspfade abzuschätzen, wie hoch der methodisch bedingte und der reale Anteil bei den Veränderungen der Stoffeinträge zwischen 2010 und 2020 ist.

Resultate für Gesamt-Stickstoff

Im Jahr 2020 gelangten nach den Modellrechnungen sowie den Angaben zu den punktuellen Quellen insgesamt rund 70'000 t Gesamt-N in die Gewässer der Schweiz. Mit gut 47'500 t stammen 68 % davon aus diffusen Quellen. Rund 32'500 t bzw. 46 % der Einträge sind durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung bedingt. Aus der landwirtschaftlich genutzten Fläche (inklusive natürlicher Hintergrundlast) stammen mit knapp 28'000 t 40 % aller N-Einträge. Mit 70 % der diffusen Einträge ist die Auswaschung der dominante Eintragspfad. Die wichtigste diffuse Eintragsquelle ist das Ackerland (33 %), gefolgt von Grasland (24 %) und Wald (19 %).

Gegenüber den Berechnungen für 2010 mit MODIFFUS 3.0 liegen die diffusen Gesamt-N-Einträge für 2020 rund 4000 t bzw. 8 % niedriger. Schätzungsweise ein Viertel der Differenz ist methodisch bedingt; drei Viertel sind als real zu betrachten und resultieren insbesondere aus der Abnahme der landwirtschaftlich genutzten Flächen (vor allem beim Ackerland), der Sickerwassermenge (klimatisch bedingt) und der N-Deposition (Erfolge der Luftreinhaltung). Das Umweltziel Landwirtschaft, welches eine Reduktion der landwirtschaftsbedingten N-Einträge in die Gewässer um 50 % gegenüber 1985 vorsieht, konnte 2020 nicht erreicht werden. Es bleibt eine Ziellücke von knapp 8'000 t.

Resultate für Gesamt-Phosphor und gelösten Phosphor

Die Gesamt-P-Einträge betragen rund 4'000 t. Davon stammen rund 3'400 t bzw. 84 % aus diffusen Quellen. Nur rund 530 t bzw. 13 % sind landwirtschaftsbedingt. Aus der landwirtschaftlich genutzten Fläche stammen 26 % der Gesamt-P-Einträge. Der grösste Teil (73 %) der diffusen Einträge wird durch die sonstige, natürliche Erosion verursacht. Entsprechend sind die wichtigsten Eintragsquellen Fels, Geröll und Gletscher mit insgesamt 42 % der diffusen Einträge. Bei den gelösten P-Einträgen beträgt das Total rund 1'400 t. Es überwiegen mit rund 740 t bzw. 53 % die Einträge aus diffusen Quellen. Die landwirtschaftsbedingten Einträge machen 27 % bzw. rund 380 t aus. Aus der landwirtschaftlich genutzten Fläche stammen 36 % aller Einträge. Die Abschwemmung ist mit über 50 % der wichtigste diffuse Eintragspfad. 45 % der diffusen Einträge stammen aus dem Grasland, 20 % aus dem Ackerland.

	N (t)	%
Total N-Eintrag in Gewässer	70'334	100
• Anteil diffuse Quellen	47'515	68
• Anteil punktuelle Quellen	22'819	32
• Anteil diffus anthropogen	38'684	55
• Anteil natürliche Hintergrundlast	8'831	13
• Anteil landwirtschaftsbedingte Einträge (inklusive Einträge durch Ammoniakemissionen auf andere Flächen)	32'433	46
• Anteil andere diffuse Einträge	15'082	22
• Anteil aus landwirtschaftlich genutzten Flächen	27'945	40
• Anteil aus anderen Landnutzungen	19'570	28
Einträge aus diffusen Quellen	47'515	100
• Anteil Auswaschung	33'281	70
• Anteil Drainage	5'313	11
• Anteil Ackerland	15'647	33
• Anteil Dauerwiesen, Heimweiden, alpwirtschaftliche Nutzfläche	11'281	24
• Anteil Wald	8'865	19

	Gesamt-P (t)	%	gelöster P (t)	%
Total P Eintrag in Gewässer	4'042	100	1'406	100
• Anteil diffuse Quellen	3'380	84	744	53
• Anteil punktuelle Quellen	662	16	662	47
• Anteil diffus anthropogen	914	23	443	32
• Anteil natürliche Hintergrundlast	2'466	61	301	21
• Anteil landwirtschaftsbedingte Einträge	531	13	382	27
• Anteil andere diffuse Einträge	2'850	71	363	26
• Anteil aus landwirtschaftlich genutzten Flächen	1'050	26	500	36
• Anteil aus anderen Landnutzungen	2'330	58	244	17
Einträge aus diffusen Quellen	3'380	100	744	100
• Anteil sonstige, natürliche Erosion	2'475	73	0	0
• Anteil Abschwemmung	405	12	405	54
• Anteil Bodenerosion Ackerland	121	4	0	0
• Anteil Fels, Geröll und Gletscher	1'405	42	33	4
• Anteil Ackerland	278	8	149	20
• Anteil Dauerwiesen, Heimweiden, alpwirt. Nutzfläche	735	22	335	45

Die diffusen Gesamt-P-Einträge haben sich gegenüber 2010 um rund 100 t bzw. 3 % reduziert, wobei der partikuläre Eintrag um 2 % zugenommen und der gelöste Eintrag um 18 % abgenommen haben. Die grösste absolute Veränderung ergibt sich beim Ackerland mit einer Abnahme von 86 t. Hauptursache dafür sind methodische Anpassungen bei der Berechnung der Bodenerosion sowie die Abnahme der Ackerfläche. Beim gelösten P ergibt sich eine Abnahme von 165 t bzw. 18 %. Die grössten absoluten Veränderungen ergeben sich beim Ackerland und beim Wald mit minus 49 t bzw. minus 41 t. Beim Phosphor (gesamt und gelöst) ist der grösste Teil der Abnahmen allerdings methodisch bedingt.

Die diffusen Stoffeinträge werden nicht nur für die gesamte Schweiz als Karten, welche auf dem Geo-Server des Bundes zugänglich sind, sondern auch für alle Kantone, für das Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der grossen Seen (REZGUS) und für die hydrologischen Einheiten auf europäischer Ebene (River Basin Districts) dargestellt.

Résumé

Estimation des flux d'azote et de phosphore d'origine diffuse dans les eaux en Suisse avec MODIFFUS 3.1, état 2020

Différents objectifs nationaux et internationaux concernant la réduction des apports d'azote (N) et de phosphore (P) dans les eaux en Suisse n'ont pas encore été atteints jusqu'à aujourd'hui. Ces apports de substances proviennent d'une part de sources ponctuelles (stations d'épuration, déversoirs d'orage) et, d'autre part, de sources diffuses (principalement liées à l'agriculture et au bruit de fond naturel). Le modèle d'estimation des flux de substances d'origine diffuse (MODIFFUS) a permis de calculer les apports diffus en N et en P dans les eaux de l'ensemble de la Suisse pour l'année 2020. Sur la base de ces résultats, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) établit des rapports pour les commissions internationales. Ces résultats sont également pertinents dans le contexte actuel de la politique agricole. Les calculs présentés prennent en compte les émissions, c'est-à-dire que les flux entrants de l'agriculture, de la forêt, etc., dans les eaux font l'objet d'un inventaire. Contrairement à une approche fondée sur les immissions, par exemple les données de mesure de niveaux d'eau, il n'est tenu compte ni de la sédimentation ni des processus de transformation dans les eaux ni des effets de dilution ou d'accumulation.

MODIFFUS est un modèle statistique empirique de flux de matières, basé sur un SIG. Après le traitement de toutes les données de base à l'échelle hectométrique, les différents flux d'eau (ruissellement de surface, écoulement par drainage et par infiltration) ont d'abord été calculés pour les différentes catégories d'utilisation du sol de la statistique de la superficie. Ensuite, les flux d'azote et de phosphore ont été calculés pour les différents vecteurs d'apport (érosion, entraînement par ruissellement, lessivage, drainage, dépôts atmosphériques à la surface des eaux, apports directs diffus) à l'échelle hectométrique. Toutes les données entrées dans le modèle, les résultats partiels et les résultats finaux ont été traités à l'aide de boîtes à outils SIG et de bases de données géoréférencées ArcGIS. Les données climatiques se réfèrent à des moyennes sur plusieurs années, toutes les autres données à l'année 2020, dans la mesure du possible. MODIFFUS 3.1 est une version actualisée de MODIFFUS 3.0. Diverses données affînées et/ou supplémentaires ainsi que l'acquisition de nouvelles connaissances ont conduit à des adaptations méthodologiques du modèle. Par exemple, l'apport d'éléments nutritifs à partir d'engrais de ferme a été saisi de manière beaucoup plus détaillée. Par conséquent, les résultats ne sont pas directement comparables avec les calculs antérieurs effectués avec MODIFFUS 3.0 pour les années 2000 et 2010. On a donc essayé d'estimer, pour tous les vecteurs d'apport, quelle était la part de l'évolution des flux de substances entre 2010 et 2020 qui était due à la méthode et quelle était la part réelle.

Résultats pour l'azote total

En 2020, selon les modélisations et en considérant les données relatives aux sources ponctuelles, environ 70 000 t d'azote total sont parvenues dans les eaux suisses. Un peu plus de 47 500 t, soit 68 % de ces apports proviennent de sources diffuses et environ 32 500 t, soit 46 %, de l'agriculture. Près de 28 000 t, soit 40 % de tous les apports d'azote proviennent des surfaces agricoles (y compris le bruit de fond naturel). Avec 70 % des apports diffus, le lessivage est le principal vecteur d'apport. La source d'apports diffus la plus importante sont les terres assolées (33 %), suivies des surfaces herbagères (24 %) et de la forêt (19 %).

Par rapport aux calculs effectués pour 2010 avec MODIFFUS 3.0, les apports diffus d'azote total sont inférieurs en 2020 d'environ 4000 t, soit 8 %. On estime qu'un quart de la différence est dû à la méthode; les trois autres quarts doivent être considérés comme réels et résultent notamment de la diminution des surfaces agricoles (surtout des terres assolées), de la diminution de la quantité d'eau d'infiltration (due au climat) et de celle des dépôts de composés azotés atmosphériques (succès de la lutte contre la pollution de l'air). L'objectif environnemental de l'agriculture, qui prévoit une réduction de 50 % des apports d'azote dus à l'agriculture dans les eaux par rapport à 1985, n'a pas pu être atteint en 2020. Il reste un écart par rapport à l'objectif de près de 8000 t.

Résultats pour le phosphore total et le phosphore dissous

Les flux de P total s'élèvent à environ 4000 t, dont environ 3400 t, soit 84 %, proviennent de sources diffuses. Seules 530 t environ, soit 13 %, sont d'origine agricole. 26 % des apports de P total proviennent des surfaces agricoles. La majeure partie (73 %) des apports diffus est due aux diverses formes d'érosion naturelle. En conséquence, les principales sources d'apports sont les roches, les éboulis et les glaciers, qui représentent au total 42 % des apports diffus. Le flux de P dissous est d'environ 1400 t. Les apports provenant de sources diffuses sont majoritaires avec environ 740 t, soit 53 %. Les apports d'origine agricole représentent 27 %, soit environ 380 t. La surface agricole est à l'origine de 36 % de tous les apports. Le ruissellement est le principal vecteur d'apport diffus avec plus de 50 %. 45 % des apports diffus proviennent des surfaces herbagères et 20 % des terres assolées.

	N (t)	%
Flux d'azote total dans les eaux	70 334	100
• Part des sources diffuses	47 515	68
• Part des sources ponctuelles	22 819	32
• Part diffuse anthropique	36 684	55
• Part du bruit de fond naturel	8 831	13
• Part des flux dus à l'agriculture (y compris les flux dus aux émissions d'ammoniac sur d'autres surfaces)	32 433	46
• Part des autres apports diffus	15 082	22
• Part provenant des surfaces agricoles	27 945	40
• Part provenant d'autres utilisations du sol	19 570	28
Flux provenant de sources diffuses	47 515	100
• Part du lessivage	33 281	70
• Part du drainage	5313	11
• Part des terres assolées	15 647	33
• Part des prairies permanentes, pâturages attenants à la ferme, et surface alpestre utile	11 281	24
• Part des forêts	8865	19

	P total (t)	%	P dissous (t)	%
Flux de P total dans les eaux	4042	100	1406	100
• Part des sources diffuses	3380	84	744	53
• Part des sources ponctuelles	662	16	662	47
• Part diffuse anthropique	914	23	443	32
• Part du bruit de fond naturel	2466	61	301	21
• Part des apports dus à l'agriculture	531	13	382	27
• Part des autres apports diffus	2850	71	363	26
• Part provenant des surfaces agricoles	1050	26	500	36
• Part provenant d'autres utilisations du sol	2330	58	244	17
Flux provenant de sources diffuses	3380	100	744	100
• Part des diverses formes d'érosion naturelle	2475	73	0	0
• Part du ruissellement	405	12	405	54
• Part de l'érosion des terres assolées	121	4	0	0
• Part des roches, éboulis et glaciers	1405	42	33	4
• Part des terres assolées	278	8	149	20
• Part des prairies permanentes, pâturages attenants à la ferme, surface alpestre utile	735	22	335	45

Les flux de P total d'origine diffuse ont diminué d'environ 100 t ou 3 % par rapport à 2010, les apports sous forme particulaire ayant augmenté de 2 % et les apports sous forme dissoute ayant diminué de 18 %. Le changement absolu le plus important concerne les terres assolées, avec une diminution de 86 t. La cause principale en est l'adaptation de la méthode de calcul de l'érosion des sols et la diminution des surfaces assolées. Pour le P dissous, la diminution est de 165 t, soit 18 %. Les changements absolus les plus importants concernent les terres assolées et la forêt, avec respectivement moins 49 t et moins 41 t. Pour le phosphore (total et dissous), la plus grande partie des diminutions est toutefois due à la méthode.

Les apports diffus de substances sont représentés non seulement pour l'ensemble de la Suisse sous forme de cartes accessibles sur le géoportail de la Confédération, mais par canton, pour le bassin versant du Rhin en Suisse en aval des grands lacs (REZGUS) et par unité hydrologique au niveau européen (River Basin Districts).

Summary

Estimating diffuse nitrogen and phosphorus inputs into Swiss water bodies with MODIFFUS 3.1 for the year 2020

To date, various national and international targets in terms of reducing nitrogen (N) and phosphorus (P) inputs into Swiss water bodies have not yet been achieved. These substance inputs stem on the one hand from point sources (sewage treatment plants, combined sewer overflows), and on the other hand from diffuse sources (predominantly agriculture-related as well as natural background load). The MODIFFUS model for estimating diffuse substance inputs was used to calculate the diffuse N and P inputs into water bodies throughout Switzerland for the year 2020. The results are used by the Federal Office for the Environment (FOEN) for reporting to international commissions and are also relevant in the current agricultural policy context. The calculations are based on emission assessments, i.e. the inputs from agriculture, forestry, etc. into water bodies are calculated. In contrast to immission measurements, e.g. water-quality measurements, neither sedimentation or transformation processes in the water body nor dilution or enrichment effects are taken into account.

MODIFFUS is an empirical-statistical GIS-based substance flow model. After processing all basic data in the hectare grid, the various water flows (surface runoff, tile drainage and seepage) were calculated for the individual land-use categories. Next, the grid-based calculation of the substance flows via the various input pathways (erosion, run-off, leaching, tile drainage, atmospheric deposition, diffuse direct inputs) was performed. All input data, intermediate results and final results were prepared and processed using GIS toolboxes and ArcGIS geodatabases. The climate data refer to long-term mean values, whilst all other input data refer to 2020, insofar as this is possible. MODIFFUS 3.1 is an updated version of the model 3.0. Various refined and/or additional input data as well as new findings have led to methodological adaptations. For example, the quantities of nutrients from manure were recorded more precisely; hence, the results are not directly comparable with those for 2000 and 2010, where MODIFFUS 3.0 was used. To enable a comparison between 2010 and 2020, an attempt was made to estimate the share of methodologically related or real changes in nutrient inputs for all pathways.

Results for total nitrogen

According to the model calculations and the data on point sources, around 70,000 t of total N entered Swiss water bodies in 2020. Diffuse sources account for more than 47,500 t or 68%. Around 32,500 t or 46% of inputs are associated with agricultural cultivation. Almost 28,000 t or 40% of all N-inputs stem from agricultural land (including the natural background load). Leaching is the dominant input pathway, accounting for 70% of diffuse inputs. The main diffuse input source is arable land (33%), followed by grassland (24%) and forest (19%).

The diffuse inputs of total N for 2020 are around 4000 t or 8% lower than those calculated with MODIFFUS 3.0 for 2010. An estimated one-quarter of the difference is due to methodological reasons; three-quarters are to be considered real in particular as a result of a decrease in the area under cultivation (particularly arable land), the amount of seepage water (climate-related) and N-deposition (due to air-pollution-control measures). The 'agriculture' environmental target, which envisages a 50% reduction in agriculture-related N inputs into water bodies compared to 1985, was not achieved in 2020. A target gap of just under 8,000 t remains.

Results for total phosphorus and dissolved phosphorus

Total P inputs come to around 4000 t, of which around 3400 t or 84% stem from diffuse sources. Only around 530 t or 13% are of agricultural origin. Twenty-six per cent of total P inputs are from agricultural land. The majority of diffuse inputs (73%) are caused by natural erosion. Accordingly, the most important input sources are rock, debris and glaciers, with 42% of diffuse inputs in total. Total dissolved P-inputs come to around 1400 t. Inputs from diffuse sources of around 740 t or 53% predominate. Agriculture-related inputs account for 27% or around 380 t. Thirty-six per cent of all inputs stem from agricultural land. Run-off is the main diffuse input pathway, accounting for over 50% of inputs. Forty-five per cent of diffuse inputs stem from grassland, 20% from arable land.

	N (t)	%
Total N input into water bodies	70,334	100
• Share from diffuse sources	47,515	68
• Share from point sources	22,819	32
• Share from diffuse anthropogenic sources	36,684	55
• Share from natural background load	8,831	13
• Share from agriculture-related inputs (including inputs from ammonia emissions on other land)	32,433	46
• Share from other diffuse inputs	15,082	22
• Share from agricultural land	27,945	40
• Share from land used for other purposes	19,570	28
Inputs from diffuse sources	47,515	100
• Share from leaching	33,281	70
• Share from tile drainage	5,313	11
• Share from arable land	15,647	33
• Share from permanent grassland, farm pastures, summering pastures	11,281	24
• Share from forest	8,865	19

	Total P (t)	%	Dissolved P (t)	%
Total P input into water bodies	4,042	100	1,406	100
• Share from diffuse sources	3,380	84	744	53
• Share from point sources	662	16	662	47
• Share from diffuse anthropogenic sources	914	23	443	32
• Share from natural background load	2,466	61	301	21
• Share from agriculture-related inputs	531	13	382	27
• Share from other diffuse inputs	2,850	71	363	26
• Share from agricultural land	1,050	26	500	36
• Share from land used for other purposes	2,330	58	244	17
Inputs from diffuse sources	3,380	100	744	100
• Share from other natural erosion	2,475	73	0	0
• Share from run-off	405	12	405	54
• Share from soil erosion on arable land	121	4	0	0
• Share from rock, debris and glaciers	1,405	42	33	4
• Share from arable land	278	8	149	20
• Share from permanent grassland, farm pastures, summering pastures	735	22	335	45

Diffuse total P inputs decreased by around 100 t or 3% compared to 2010, with particulate input increasing by 2% and dissolved input decreasing by 18%. The greatest absolute change is for arable land, with a decrease of 86 t. The main reasons for this are methodological adaptations in the calculation of soil erosion as well as the decrease in arable acreage. There is a decrease of 165 t or 18% for dissolved P. The greatest absolute changes are in arable land with minus 49 t and in forest with minus 41 t. For phosphorus (total and dissolved), however, the majority of decreases are methodology-related.

The diffuse substance inputs mapped for Switzerland are available on the Swiss Confederation's geo-server, as are the results for all the Cantons, the Rhine watershed in Switzerland below the great lakes ('REZGUS') and the hydrological units at European level ('river basin districts').

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Hinsichtlich der Reduzierung der gesamten Stickstoff(N)- und Phosphor(P)-Einträge konnten in der Schweiz verschiedene nationale und internationale Ziele bisher nicht realisiert werden (siehe Umweltziele Landwirtschaft N und P; BAFU & BLW, 2016). Diese Stoffeinträge resultieren einerseits aus punktuellen Quellen (Kläranlagen, Mischwasserentlastungen), andererseits aus diffusen Quellen (überwiegend Landwirtschaft sowie natürliche Hintergrundlast). Die Schweizer Gewässer werden nach wie vor mit N- und P-Einträgen aus der Landwirtschaft belastet (BAFU, 2022a). Nährstoffeinträge in die Gewässer aus der Landwirtschaft sind auch im benachbarten Deutschland weiterhin ein aktuelles Thema (DVGW, 2016; BMEL & BMU 2020; Sundermann et al., 2022). Auch die Ergebnisse der Modellierung der diffusen Stoffeinträge in die Gewässer für das Jahr 2010 mit MODIFFUS (Modell zur Abschätzung diffuser Stoffeinträge) zeigen, dass eine Ziellücke zu den Umweltzielen Landwirtschaft oder anderen internationalen Zielen (Oslo-Paris-Kommission zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks, OSPAR; Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, IKSR) besteht (Hürdler et al., 2015). Daher bietet es sich an, MODIFFUS für eine erneute Betrachtung der Nährstoffeinträge unter Berücksichtigung aktueller Daten und neuer Rahmenbedingungen zu nutzen.

Um eine Reduzierung der diffusen Stoffeinträge in die Gewässer planen und umsetzen zu können, sind detaillierte Kenntnisse über die Eintragsquellen und die Art der Eintragspfade sowie über die räumliche Verbreitung von Belastungsschwerpunkten (Hotspots) notwendig. Die GIS-basierte, auf Hektarrasterebene durchgeführte Modellierung der diffusen Stoffeinträge mit MODIFFUS erlaubt die Identifizierung der besonders stark zur Gewässerbelastung beitragenden Flächen sowie die Identifizierung der wichtigsten Eintragspfade (Erosion, Abschwemmung, Auswaschung etc.). Die Ergebnisse lassen sich für beliebige Flächeneinheiten aggregieren (z. B. hydrologische Einzugsgebiete oder politische Einheiten) und können somit vielfach genutzt werden (Berichterstattung für internationale Organisationen wie IKSR, OSPAR, EUA (Europäische Umweltagentur), IGKB (Internationale Gewässerschutzkommission Bodensee), CIPEL (Internationale Kommission zum Schutz des Genfersees), OECD (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung), Stickstoff- und Phosphorflüsse in der Schweiz, Nationales Treibhausgasinventar Schweiz, Agrarumweltindikatoren, Überprüfung der Umweltziele Landwirtschaft Schweiz, Absenkepfad N und P, standortangepasste Landwirtschaft) und können für Szenario-Rechnungen (z. B. für Klimawandel, Wirkung von Massnahmen in Projekten nach Art.62a GSchG, Massnahmenpläne zur Verringerung von Stoffverlusten aus der Landwirtschaft 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. In diesem Zusammenhang ist die zusätzlich vorgenommene Aufteilung der diffusen Quellen in natürliche Hintergrundlast und diffus anthropogenen Quellen sowie landwirtschaftsbedingte diffuse Einträge und andere diffuse Einträge hilfreich.

Auch im aktuellen agrarpolitischen Kontext kann der vorliegende Bericht bzw. das Stoffflussmodell MODIFFUS für verschiedene Anliegen hilfreich sein:

- Postulat 18.3610 «Wasserversorgungssicherheit und Wassermanagement. Grundlagenbericht» (Der Bundesrat, 2021). ([18.3610 | Wasserversorgungssicherheit und Wassermanagement. Grundlagenbericht | Geschäft | Das Schweizer Parlament](#))
- Verordnungspaket Parlamentarische Initiative 19.475 «Massnahmen für sauberes Wasser und eine nachhaltigere Landwirtschaft» in Verbindung mit N und P. Der Bundesrat hat das erste Verordnungspaket im April 2022 verabschiedet (Agridea, 2022). ([19.475 | Das Risiko beim Einsatz von Pestiziden reduzieren | Geschäft | Das Schweizer Parlament](#)).
- Motion 20.3625 «Wirksamer Trinkwasserschutz durch Bestimmung der Zuströmbereiche» ([20.3625 | Wirksamer Trinkwasserschutz durch Bestimmung der Zuströmbereiche | Geschäft | Das Schweizer Parlament](#)).
- Motion 22.3873 «Fristen für die Umsetzung der Massnahmen des planerischen Grundwasserschutzes» ([22.3873 | Fristen für die Umsetzung der Massnahmen des planerischen Grundwasserschutzes | Geschäft | Das Schweizer Parlament](#)).

Grundlage für die Modellierung diffuser Stoffeinträge mit MODIFFUS ist die Landnutzung. Mit der Arealstatistik 2013/18, die Ende 2020 abgeschlossen wurde, liegen aktuelle Datensätze vor, welche eine Neuberechnung diffuser Stoffeinträge ermöglichen. Weiterhin liegen seit den letzten Modellierungen zahlreiche andere digitale Grundlagen neu und/oder zusätzlich vor, die eine erhebliche Verbesserung und eine Aktualisierung erwarten lassen. Die letzte flächendeckende Berechnung mit MODIFFUS erfolgte für das Jahr 2010 (Hürdler et al., 2015). Szenario-Berechnungen wurden für das Jahr 2020 und 2025 durchgeführt (Prasuhn et al., 2016). In Prasuhn et al. (2016) wurden auch rückwirkend mit der Modellversion MODIFFUS 3.0 die Stoffeinträge für das Jahr 2000 gerechnet. In Prasuhn (2016) wurden die landwirtschaftsbedingten N-Einträge für 1985 und 2010 neu berechnet, um das Umweltziel Landwirtschaft (Reduktion der landwirtschaftsbedingten N-Einträge um 50 %) zu beurteilen.

Die zahlreichen Anpassungen des Modells MODIFFUS – bedingt durch die immer besseren digitalen Grundlagendaten und Erkenntnisgewinn – erschweren einen Vergleich der Resultate mit früheren Arbeiten mit MODIFFUS, da nicht klar ist, ob resultierende Unterschiede in den Stoffverlusten methodisch bedingt sind oder aufgrund von realen Änderungen der landwirtschaftlichen Nutzung und Praxis erfolgt sind. Im vorliegenden Bericht wurde versucht, bei methodischen Anpassungen sowohl mit der alten Methode nach Hürdler et al. (2015) als auch mit der neuen Methode zu rechnen, um abschätzen zu können, wie gross der methodisch bedingte Anteil an der veränderten Stofffracht 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 2020**.

Zur Kennzeichnung der zahlreichen Anpassungen im Modell MODIFFUS 3.0 wurde die neue Modellversion **MODIFFUS 3.1** benannt. Die Berechnungen von Hürdler et al. (2015) werden im vorliegenden Bericht mit 2010 bezeichnet, die jetzigen Berechnungen mit 2020.

1.2 Generelle Aussagekraft und Genauigkeit der Erhebungen

Für die Abschätzung der N- und P-Einträge in die Gewässer der Schweiz wurden Flächen- und Mengendaten aus amtlichen Statistiken mit durchschnittlichen Nährstoffgehalten in den entsprechenden Transportmedien (z. B. Oberflächenabfluss oder Erosionsmaterial) verknüpft. Räumlich bildet die Schweizer Landesgrenze die Systemgrenze. Die Daten der amtlichen Statistiken lagen mit unterschiedlichem räumlichen Bezug vor (Landwirtschaftsbetrieb, Gemeinde, Hektarraster, 2-km-Raster, 2-m-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 wurden auf dieses Hektarraster aggregiert oder disaggregiert. Bei der Übertragung und Verwendung von Literaturdaten zu Stoffverlusten 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 und diesen Zeitpunkt Gültigkeit haben. Entsprechend mussten relativ viele Annahmen getroffen werden, und es wurden viele Werte auf Grund von Analogieschlüssen festgelegt, so dass eine exakte Quantifizierung der Stoffverluste und eine statistische Fehlerrechnung unmöglich sind (vgl. Hürdler et al., 2015). Somit handelt es sich in der vorliegenden Studie um eine **Abschätzung der Stoffeinträge** in die Gewässer der Schweiz, die Grössenordnungen von verschiedenen Eintragspfaden in unterschiedlichen Gebieten zeigen soll. Es muss mit einem Fehler von schätzungsweise $\pm 20\%$ für langjährige Durchschnittswerte bei den Endergebnissen gerechnet werden. Für die Berechnung der Wasserflüsse und die resultierenden Prozesse (Erosion, Abschwemmung, Auswaschung etc.) wurden **langjährige Durchschnittswerte** verwendet. Somit bleiben bestimmte Einzelergebnisse wie z. B. extreme Starkniederschläge mit hoher Bodenerosion, Murgängen oder Überschwemmungen oder Unfälle mit Güllebehältern, die für ein Gewässer katastrophale Folgen haben können, unberücksichtigt. Für die Landnutzung, Kulturartenzusammensetzung, Tierzahlen, Hofdüngeranfall etc. wurden dagegen möglichst aktuelle Jahreswerte – wenn möglich von 2020 – verwendet. 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.

Es handelt sich im vorliegenden Bericht um eine **Emissionsbetrachtung**, das heisst, es werden nur die Einträge aus der Landschaft in die Gewässer erfasst. Es werden – im Gegensatz zu Immissionsbetrachtungen – weder Umwandlungsprozesse im Gewässer (Adsorption, Desorption, Deposition, mikrobielle Einlagerung etc.) noch Verdünnungs- oder Anreicherungseffekte z. B. durch In- und Exfiltrationen von Grundwasser, Wasserentnahmen und anthropogene Zu- und Ableitungen berücksichtigt. Insbesondere die Nährstoffspeicherung und -umwandlung in Seen bleibt unberücksichtigt. Immissionsbetrachtungen bzw. Messungen im Gewässer erfassen immer summarisch alle Eintragsquellen, d. h. auch nicht-landwirtschaftliche Einträge, z. B. aus dem Siedlungsgebiet, und können auch Belastungen aus dem benachbarten Ausland beinhalten. Messungen in Gewässern erlauben auch keine direkte Zuordnung der Herkunft von Stoffen zu den verschiedenen Verursachern.

Von den punktuellen Quellen werden die überwiegend gemessenen Stofffrachten aus den Abwasserreinigungsanlagen als relativ zuverlässig eingeschätzt. Die Abschätzung der Frachten aus Regenwasserentlastungen ist dagegen sehr unsicher.

1.3 Definitionen

Im Folgenden werden die wichtigsten Begriffe kurz erklärt (vgl. Hürdler et al., 2015):

- **Diffuse Quellen:** Einträge durch Oberflächenabfluss (Abschwemmung und Erosion) und Sickerwasser von drainierten Flächen (Drainageverluste) in die Oberflächengewässer sowie Einträge durch Sickerwasser ins Grundwasser (Auswaschung) von unversiegelten (landwirtschaftlichen Nutzflächen, Wald, Siedlungsgrünflächen etc.) und versiegelten Flächen, die nicht an eine Kläranlage angeschlossen sind. Weiterhin direkte atmosphärische Deposition auf Gewässeroberflächen und 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:** Einträge in ein Gewässer, die an einem Punkt, z. B. dem Einleitungsrohr, erfasst werden können: Kommunale oder industrielle Abwässer, die über Kläranlagen als gereinigtes Abwasser in die Gewässer gelangen. Mischwasserentlastungen werden in der vorliegenden Studie ebenfalls zu den punktuellen Quellen gezählt. Somit werden siedlungswasserwirtschaftliche Aspekte sauber getrennt von den restlichen, landwirtschaftlichen und natürlichen Aspekten. Dies ist auch bezüglich Massnahmenplanung relevant. In internationalen Studien (IKSR, OSPAR) zählen die Einträge aus Mischwasserentlastungen zu den diffusen Quellen; dies ist bei Vergleichen zu berücksichtigen.
- **Natürliche Hintergrundlast:** Einträge in die Gewässer, die ausschliesslich natürlich und nicht anthropogen bedingt sind, d.h. die auftreten würden, wenn die Schweiz unbesiedelt und die heutigen Siedlungs- und landwirtschaftlich genutzten Flächen mit natürlicher Vegetation (meist Wald oder unproduktive Vegetation) bedeckt wäre und es keine anthropogene Luftverschmutzung gäbe.
- **Diffus anthropogene Quellen:** Diffuse Quellen abzüglich natürlicher Hintergrundlast. Belastung, die überwiegend durch landwirtschaftliche Aktivitäten verursacht wird, aber auch durch Luftverschmutzung und Besiedlung.
- **Landwirtschaftsbedingte Einträge:** Diffuse Einträge aus allen landwirtschaftlich genutzten Flächen (inklusive alpwirtschaftlich genutzten Flächen), abzüglich der natürlichen Hintergrundlast dieser Flächen. Beim Stickstoff kommen noch die Auswaschungs- und Abschwemmungsverluste von anderen Flächen hinzu, die auf die landwirtschaftsbedingte Luftverschmutzung (Ammoniakemissionen) zurückzuführen sind.
- **Gesamt-Phosphor:** Summe von gelöstem und partikulärem organischem und anorganischem Phosphor (ungefilterte 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 Filtrerrückstand 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.
- **Bioverfügbare Phosphor:** Im Folgenden wird vereinfacht der gesamte gelöste diffuse Phosphoreintrag sowie der gesamte Eintrag aus punktuellen Quellen als bioverfügbar angenommen.

Entwicklung von MODIFFUS

Das Stoffflussmodell MODIFFUS bzw. dessen Vorgängerversion (bis zum Jahr 2000 hatte das Modell noch keinen Namen) wurde Anfang 1990 von Braun et al. (1991) für das Rheinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der Seen (REZGUS) im Auftrag des BAFU (damals BUWAL) für die internationale Berichterstattung an die IKS und an OSPAR entwickelt. Die erste Version wurde basierend auf Daten der Arealstatistik und der Betriebsstrukturerhebung auf Gemeindeebene im Tabellenkalkulationsprogramm Excel gerechnet (Braun et al., 1991). Prasuhn & Braun (1994) haben diesen Ansatz dann basierend auf umfangreichen Literaturrecherchen für den Kanton Bern weiterentwickelt. Für den Kanton Zürich wurden dann von Schmid & Prasuhn (2000) erstmals alle Berechnungen GIS-basiert durchgeführt. Im Bericht von Prasuhn & Mohni (2003) für den Kanton Bern wurde das methodische Vorgehen für alle Berechnungsschritte in MODIFFUS detailliert beschrieben. Mit dem Bericht von Hürdler et al. (2015) wurde dann erstmals eine Berechnung flächendeckend für die ganze Schweiz durchgeführt. Insgesamt wurden bisher 20 fremdfinanzierte Projekte (BAFU, Kantone, internationale Organisationen) mit MODIFFUS durchgeführt (siehe Zusammenstellung unten, chronologisch nach Publikationsdatum sortiert). Dabei wurde das Modell fortlaufend angepasst und verbessert. Die wesentlichen Grundstrukturen sind aber bis heute erhalten geblieben.

- 1991: Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der Seen REZGUS (Braun et al., 1991)
- 1992: Sempachersee (Hurni et al., 1992)
- 1994: Kanton Bern (Prasuhn & Braun, 1994)
- 1996: Bodensee inkl. Deutschland und Österreich (Prasuhn et al., 1996)
- 1997: REZGUS Massnahmen (Braun et al., 1997)
- 1997: Kanton Bern Massnahmen (Prasuhn et al., 1997)
- 1998: Klettgau (Prasuhn & Hurni, 1998)
- 1999: Bodensee inkl. Deutschland und Österreich (Prasuhn, 1999)
- 2000: Kanton Zürich (Schmid & Prasuhn, 2000)
- 2003: Birs (Prasuhn et al., 2003)
- 2003: Zugersee (Prasuhn & Müller, 2003)
- 2003: REZGUS 1985, 1996, 2001 (Prasuhn, 2003)
- 2003: Kanton Bern (Prasuhn & Mohni, 2003)
- 2004: Greifensee (Prasuhn et al., 2004)
- 2005: Kanton Bern Nitrat (Spiess, 2005)
- 2005: Brienzensee (Prasuhn, 2005)
- 2015: Schweiz Stand 2010 (Hürdler et al., 2015)
- 2016: Schweiz Schwermetalle (Hürdler et al., 2015)
- 2016: Schweiz Stand 2000 und Szenarien 2025 (Prasuhn et al., 2016)
- 2023: Schweiz Stand 2020 (Hutchings et al., 2023)

Etwa zeitgleich mit der Entwicklung von MODIFFUS durch Braun et al. (1991) wurde in Deutschland das Stoffflussmodell MONERIS (Modelling Nutrient Emissions to River Systems) von Behrendt et al. (1999) entwickelt (MONERIS Deutschland: <http://www.moneris.igb-berlin.de/index.php/moneris.html>). Zwischen den beiden Modellentwicklergruppen gab es einen intensiven Austausch, sodass sich beide Modelle in der Berechnungsweise der Eintragspfade und -quellen ähneln. Auch MONERIS wurde mehrfach überarbeitet und verbessert (Venohr et al., 2011). MONERIS bildet auch die Grundlage für das in Österreich verwendete Stoffbilanzmodell StoBiMo (BMLFUW, 2011; [Stobimo - Nährstoffe | TU Wien](#)). Basierend auf MONERIS wird in Deutschland inzwischen das Modell MoRE (Modeling of Regionalized Emissions), (Fuchs et al., 2017) verwendet. MoRE wurde in Kooperation mit dem Umweltbundesamt Deutschland entwickelt und ist ein in einer Open Source Umgebung weiterentwickeltes Werkzeug zur Modellierung von Stoffeinträgen in Oberflächengewässer für eine breite Palette an Stoffen mit Relevanz zur Gewässergüte (<https://isww.iwg.kit.edu/MoRE.php>).

2 Methodik

Im folgenden Unterkapitel wird detailliert beschrieben, welche Grundlagendaten für die Berechnung der N- und P-Einträge in die Gewässer der Schweiz verwendet wurden und wie diese Daten jeweils aufbereitet wurden. Anschließend wird das Modellkonzept beschrieben und es werden die Berechnungsweisen der verschiedenen Wasser- und Stoffflüsse erläutert.

2.1 Grundlagendaten

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten verwendeten Grundlagendaten für die Berechnung der N- und P-Einträge in die Gewässer mit MODIFFUS. Diese werden in den folgenden Unterkapiteln jeweils detaillierter erläutert.

Tabelle 1: Wesentliche Grundlagendaten für MODIFFUS 2020.

Datenquelle	Datenbeschreibung	Herausgeber	Zeitraum	Parameter
Arealstatistik	Landnutzungsverteilung	BFS	2013 bis 2018	
AGIS	statistische Daten	BLW	2019 und 2020	Anzahl Tiere, Verteilung Kulturarten, schonende Bodenbearbeitung
Klima	Niederschlagsdaten	Meteoschweiz	1991 bis 2020	Normwert Niederschlag
Klima	Evapotranspirationsdaten	WSL	1991 bis 2020	jährliche aktuelle Evapotranspiration
GAK2	Gewässeranschlusskarte	BLW	2013	potentieller Grad des Gewässeranschlusses
Deposition	Stickstoffdeposition	BAFU	2015	jährliche mittlere Deposition
Drainage	Drainage	BLW/Agroscope	2019	drainierte Fläche
HODUFLU	Hof- und Recyclingdüngerverschiebungen	BLW	2020	
ERK2	Erosionsrisikokarte	BLW/Agroscope/Uni Bern	2019	potentielles Erosionsrisiko
ÖLN	Daten der Bodenproben	BLW	2010 bis 2019	P verfügbar Boden
swissBOUNDARIES ^{3D}	Administrative Grenzen	Swisstopo	2020	Kantons- und Gemeindegrenzen
EZGG-CH	Einzugsgebietsgliederung Schweiz	BAFU	12.2019	Hydrologische Einzugsgebietsgrenzen
Einzugsgebietsgrenze Europäische Umweltagentur (EUA)	River Basin Districts	EUA	03.2020	
NADUF	Gemessene Nährstoffkonzentration und Frachten	BAFU	2010 - 2021	N- und P-Konzentration und -Frachten der Fliessgewässer, Einzugsgebiete NADUF
NAQUA	Gemessene Nährstoffkonzentration	BAFU	2010 bis 2021	N- und P-Konzentration Grundwasser

2.1.1 Bodennutzung

2.1.1.1 Arealstatistik

Die Bodennutzung basiert auf der Arealstatistik 2013/18 (BFS, 2020a). Wie bei Hürdler et al. (2015) wurde auf Grund ihrer Auflösung von einer Hektare die Arealstatistik als Berechnungsgrundlage verwendet; alle anderen Daten wurden dieser Auflösung angepasst, sei es durch Aggregations- oder Disaggregationsschritte. Die 72 Landnutzungskategorien der Arealstatistik wurden in 18 Klassen zusammengefasst (Tab. 2). Vereinfacht wird im gesamten Bericht bei der Arealstatistik 2004/09 von der Landnutzung im Jahr 2010 und bei der Arealstatistik 2013/18 von der Landnutzung im Jahr 2020 gesprochen.

2.1.1.2 Verteilung der Strassen

Mittels der Daten der Bauzonen (ARE, 2017) wurde eine Differenzierung der Landnutzungskategorie Strassen zu «Strassen ausserorts» und «Strassen innerorts» über eine Verschneidung im GIS vorgenommen. Grundsätzlich gilt, dass Strassen (gemäss Arealstatistik) innerhalb der bebauten Zone als Strassen innerorts angenommen werden. Hier wird davon ausgegangen, dass abfliessendes Wasser von diesen Flächen der Kanalisation und damit einer Abwasserreinigungsanlage (ARA) zugeführt werden. Somit zählen der Abfluss und der Abtrag von Nährstoffen zu den punktuellen Einträgen. Hingegen finden Strassen ausserorts Berücksichtigung in der Berechnung diffuser Nährstoffeinträge.

Aufgrund geringer methodischer Anpassungen der Abgrenzung von innerorts zu ausserorts (insbesondere der berücksichtigte Umkreis um die Bauzonen wurde für MODIFFUS 2020 von 100 m auf 30 m reduziert) hat die Fläche der Strassen 2020 im Vergleich zu 2010 bei Strassen ausserorts um 30 % zugenommen und bei Strassen innerorts um 20 % abgenommen. Während die Verteilung ausserorts zu innerorts im 2010 bei 46 % zu 54 % lag, beträgt diese für 2020 57 % zu 43 %. Im Vergleich dazu liegen beim TLM3D (Strassen ohne Wege sowie Siedlungsflächen) 43 % der Strassen innerorts und 57 % ausserorts (swisstopo, 2020b). Hier handelt es sich aber um die Länge der Strasse und nicht um die Fläche der Strassen. Die Aufteilung innerorts zu ausserorts sollte trotzdem in einer ähnlichen Gröszenordnung liegen und stimmt mit der Aufteilung von MODIFFUS 2020 gut überein.

2.1.1.3 Verteilung der Wälder

Mit Hilfe von swissALTI3D (Swisstopo, 2020c) wurde bei Flächen mit der Landnutzung Wald eine höhenabhängige Unterteilung durchgeführt. Dabei wurde die Unterteilung an der Höhengrenze von 1200 m ü. M. vorgenommen, um der steigenden Abflussbildung unter Wald mit zunehmender Höhe Rechnung zu tragen.

2.1.1.4 Veränderung der Landnutzung von 2010 zu 2020

Abbildung 1 zeigt die räumliche Unterteilung der Landnutzung in landwirtschaftlich intensiv genutzte Gebiete im Mittelland und in den grossen Tälern (z. B. Rhone, Ticino, Alpenrhein), landwirtschaftlich extensive genutzte und waldreiche Gebiete (Jura und Voralpen) und die alpinen Gebiete. 35 % der Fläche der Schweiz sind landwirtschaftlich genutzte Flächen. Dies ist eine Abnahme um 2 % im Vergleich zur Arealstatistik 2004/09 (s. Tab. 2). Die flächenmässig grösste Abnahme gab es bei Ackerland (-18'686 ha), gefolgt von der alpwirtschaftlichen Nutzfläche (-10'548 ha), während die Fläche der Heimweiden zugenommen hat (9'876 ha).

Die Ackerfläche hat somit im Vergleich zu 2010 schweizweit um 4.6 % abgenommen. 370'666 ha waren gemäss Arealstatistik sowohl 2010 als auch 2020 Ackerland. 32'070 ha Ackerland wurden 2020 in eine andere Nutzung überführt (überwiegend Heimweiden und Dauerwiesen). Es wurden aber auch 17'717 ha mit anderer Nutzung 2010 im Jahr 2020 in Ackerland überführt (Tab. 3 & 4). Die Abnahme von Ackerland in 2020 ist aber auch auf eine Zunahme der Siedlungsflächen um 11 % zurückzuführen. Interessanterweise sind auch 2 % der Siedlungsflächen von 2010 (darunter auch «überbaute») nun als Ackerland klassifiziert. Hierbei handelt es sich jedoch grösstenteils um ehemalige Abbaustandorte oder Deponien, welche in den MODIFFUS- Landnutzungskategorien zu den überbauten Siedlungsflächen zählen.

Die Siedlungsflächen haben zwischen 2010 und 2020 um 6.4 % zugenommen. Die grösste Zunahme ist flächenmässig und prozentual dem Siedlungsgrün zuzuschreiben. Die Strassen haben insgesamt um 3.6 % zugenommen. Zwischen der Verteilung der Strassen ausserorts/innerorts gibt es grosse Unterschiede zwischen 2010 und 2020. Diese Differenzen sind jedoch grösstenteils methodisch bedingt, was bereits im Kapitel 2.1.1.2 erläutert wurde.

Tabelle 2: Bodennutzung gemäss Arealstatistik nach MODIFFUS-Kategorien für die Jahre 2010 und 2020.

Landnutzung	Fläche in ha		Prozent der Schweiz		Differenz (ha)	Veränderung (%)
	2010	2020	2010	2020		
Landwirtschaftlich genutzte Flächen:	1'481'669	1'452'451	35.9	35.2	-29'218	-2.0
Ackerland (inkl. Kunstwiese)	407'069	388'383	9.9	9.4	-18'686	-4.6
Alpwirtschaftliche Nutzfläche	513'860	503'312	12.4	12.2	-10'548	-2.1
Gartenbau	4'525	4'629	0.1	0.1	104	2.3
Heimweiden	168'106	177'982	4.1	4.3	9'876	5.9
Obstbau	30'740	27'782	0.7	0.7	-2'958	-9.6
Rebbau	15'708	15'557	0.4	0.4	-151	-1.0
Dauerwiesen	341'661	334'806	8.3	8.1	-6'855	-2.0
Siedlungsflächen:	300'979	320'116	7.3	7.8	19'137	6.4
Siedlungsgrün	159'972	173'107	3.9	4.2	13'135	8.2
Siedlung überbaut	73'643	77'209	1.8	1.9	3'566	4.8
Strassen ausserorts	30'891	40'053	0.7	1.0	9'162	29.7
Strassen innerorts	36'473	29'747	0.9	0.7	-6'726	-18.4
Unproduktive Flächen:	1'052'788	1'043'116	25.5	25.3	-9'672	-0.9
Unproduktive Vegetation	297'883	301'146	7.2	7.3	3'263	1.1
Stehende Gewässer	142'681	143'420	3.5	3.5	739	0.5
Fliessende Gewässer	32'378	32'801	0.8	0.8	423	1.3
Fels, Geröll, Sand	465'584	462'757	11.3	11.2	-2'827	-0.6
Gletscher	114'262	102'992	2.8	2.5	-11'270	-9.9
Wald:	1'293'017	1'313'387	31.3	31.8	20'370	1.6
Wald =< 1200 m	784'572	787'089	19.0	19.1	2'517	0.3
Wald > 1200 m	508'445	526'298	12.3	12.7	17'853	3.5
Schweiz gesamt	4'128'453*	4'129'070*	100.0	100.0	617*	0.0

*Abweichungen auf Grund des neu verwendeten Datensatzes der Hoheitsgrenze (Swisstopo, 2021), mit Abweichungen beim Bodensee

Tabelle 3: Landnutzung in 2020 von Flächen, welche in 2010 als Ackerland klassifiziert waren.

Landnutzung	ha	%
Heimweiden	13'308	41.5
Dauerwiesen	10'335	32.2
Siedlungsgrün	2'689	8.4
Siedlung überbaut	1'743	5.4
unproduktive Vegetation	1'448	4.5
Obstbau	1'295	4.0
Gartenbau	797	2.5
Wald	211	0.7
Rebbau	127	0.4
Sonstiges	120	0.4
Total	32'073	100

Tabelle 4: Landnutzung 2010 von Flächen, welche in 2020 als Ackerland klassifiziert sind.

Landnutzung	ha	%
Dauerwiesen	8'551	48.3
Heimweiden	6'895	38.9
Obstbau	1'046	5.9
Siedlung überbaut	366	2.1
unproduktive Vegetation	324	1.8
Gartenbau	294	1.7
Siedlungsgrün	75	0.4
Wald	72	0.4
Strassen	47	0.3
Sonstiges	47	0.3
Total	17'717	100

2.1.1.5 Kulturartenverteilung

Während die aktuelle Arealstatistik die Bodennutzung der Jahre 2013 – 2018 (Zeitraum der Befliegung) abbildet (BFS, 2020a), geben die AGIS-Daten zur Kulturlandverteilung (BLW, 2020) präzisere Angaben zu den landwirtschaftlichen Kulturarten für das Jahr 2020 an. Im Vergleich zur MODIFFUS-Modellierung 2010 wurden die Daten für die Modellierung 2020 nicht vom BFS bezogen, sondern direkt vom BLW. Der Datensatz des BLW umfasst allerdings etwas weniger Betriebe (vor allem Kleinstbetriebe), da das BFS (2020b) alle Betriebe ab einer gewissen Grösse (z. B. 1 ha LN oder 30 Aren Spezialkulturen) erfasst. Insgesamt sind für 2020 seitens BFS (2020b) 560 ha landwirtschaftliche Nutzfläche mehr als beim BLW (2020) erfasst worden. Insbesondere Reben (+238 ha), Weiden (+155 ha) und Ziersträucher, Ziergehölze (+145 ha) wurden im BFS-Datensatz mehr erfasst, während die Ackerfläche im BLW-Datensatz mit +220 ha leicht höher war. Da die Kulturdaten des BLW aber als direkte Flächenangaben pro Gemeinde bezogen werden konnten, während die Daten des BFS sich nur auf sämtliche Flächen eines Betriebes innerhalb einer Gemeinde beziehen, wurden die Daten des BLW bevorzugt. Weiterhin werden auch Flächen im Ausland (9'500 ha in 2020) nicht berücksichtigt. Wie bereits bei der Arealstatistik zu sehen war, hat die landwirtschaftlich genutzte Fläche im Vergleich zu 2010 abgenommen (Tabelle 5).

Im Vergleich zur Arealstatistik geben die Daten des BLW auch Auskunft über die Intensität der Nutzung der Weiden und Wiesen (extensiv/wenig intensiv/intensiv). Weiterhin sind unter Ackerland in der Arealstatistik offenes Ackerland sowie Kunstwiesen zusammen erfasst. Bei den Daten des BLW lassen sich diese unterscheiden. Da Kunstwiesen prinzipiell ein höheres P-Abschwemmungsrisiko haben, sind diese als intensiver als offenes Ackerland einzustufen. Im Vergleich zu 2010 haben die intensiv bewirtschafteten Flächen bei Wiesen, Kunstwiesen und Weiden abgenommen (Tab. 6.).

Tabelle 5: Vergleich der betrachteten Landnutzungsflächen (ha) gemäss BFS (2013) für 2010 und BLW (2020) für 2020.

Landnutzung	2010	2020	Differenz	%
offene Ackerfläche	271'968	269'032	-2'936	-1.1
Kunstwiesen	131'401	123'731	-7'670	-5.8
Ackerland (offene Ackerflächen & Kunstwiesen)	403'368	392'763	-10'605	-2.6
Dauergrünflächen	612'265	602'208	-10'057	-1.6
Dauerkulturen	23'444	23'293	-152	-0.6
Übrige	12'660	15'247	2'587	20.4
Gesamtergebnis	1'051'747	1'033'511	-18'237	-1.7

Tabelle 6: Vergleich des Flächenanteils verschiedener Nutzungsintensitäten von Wiesen, Weiden und Ackerland im Jahr 2010 sowie 2020.

	Flächenanteil (%)		Differenz des Anteils	Prozentuale Veränderung
	2010	2020		
Wiese				
extensiv	13.2	19.0	5.8	44.2
wenig intensiv	5.1	3.5	-1.6	-31.9
intensiv	81.7	77.5	-4.2	-5.1
Weide				
extensiv	20.2	36.6	16.4	81.1
intensiv	79.8	63.4	-16.4	-20.5
Ackerland				
offene Ackerfläche	67.4	68.4	1.0	1.5
Kunstwiese	32.6	31.6	-1.0	-3.1

2.1.1.6 Vergleich der Daten von Arealstatistik und Betriebsstrukturerhebung (AGIS)

Bei Betrachtung der Ackerfläche fällt auf, dass sich die Daten der Arealstatistik und der Betriebsstrukturerhebung (AGIS) unterscheiden. Die Arealstatistik 2013/18 gemäss BFS weist 403'368 ha Ackerland auf, die Betriebsstrukturerhebungsdaten des BLW für das Jahr 2020 umfassen 392'763 ha Ackerland. Es ergibt sich also eine Differenz von 10'605 ha. Diese Differenz beruht einerseits auf dem unterschiedlichen Erhebungszeitraum, andererseits auf der völlig unterschiedlichen Erhebungsmethode. Während die Daten der Arealstatistik auf Rasterdaten basierend auf Luftbildinterpretationen von Punktdaten beruhen, stammen die Daten der Betriebsstrukturerhebungen auf parzellenscharfen Flächenangaben zu allen Betrieben.

Für die MODIFFUS-Berechnungen wurden die Daten der Arealstatistik als Grundlage für alle Landnutzungen und alle Berechnungsschritte verwendet, da nur sie flächendeckend georeferenziert vorlagen. Die Daten der Betriebsstrukturerhebung, die nur auf Betriebs- bzw. Gemeindeebene (aber nicht georeferenziert) vorlagen, wurden zusätzlich genutzt, da sie detaillierter sind (Kulturartenverteilung, Intensität der Graslandnutzung etc.). Sie fliessen als Korrekturfaktoren gemeindeweise in die Berechnungen verschiedener Eintragspfade ein.

2.1.1.7 Schonende Bodenbearbeitung

Die schonende Bodenbearbeitung (Direktsaat, Streifensaat und Mulchsaat) wird seit 2014 mittels Ressourceneffizienzbeiträge gefördert. Die Fläche hat zwischen 2015 und 2019 insgesamt um etwa 75 % zugenommen (BLW, 2020a). Die Daten zu den Flächen der unterschiedlichen bodenschonenden Bearbeitung pro Kultur und Gemeinde wurden seitens BLW (2020b) für das Jahr 2020 zu Verfügung gestellt. Diese werden in MODIFFUS 2020 bei der Berechnung der N-Auswaschung sowie der Bodenerosion auf Ackerland (C-Faktoren) verwendet. Schweizweit werden 20 % der gesamten Ackerfläche (offenes Ackerland sowie Kunstwiese) bodenschonend bearbeitet; der grösste Anteil hat Mulchsaat (s. Tab. 7). Für 2010 lagen keine Angaben zu schonender Bodenbearbeitung vor, entsprechend konnte sie nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 7: Schweizweite Fläche mit bodenschonender Bearbeitung im Jahr 2020.

Bodenschonende Bearbeitung	Fläche (ha)	%	Anteil in % an Ackerfläche
Direktsaat	10'128	12.5	2.6
Streifensaat	10'733	13.3	2.7
Mulchsaat	60'087	74.2	15.3
Insgesamt	80'948	100.0	20.6

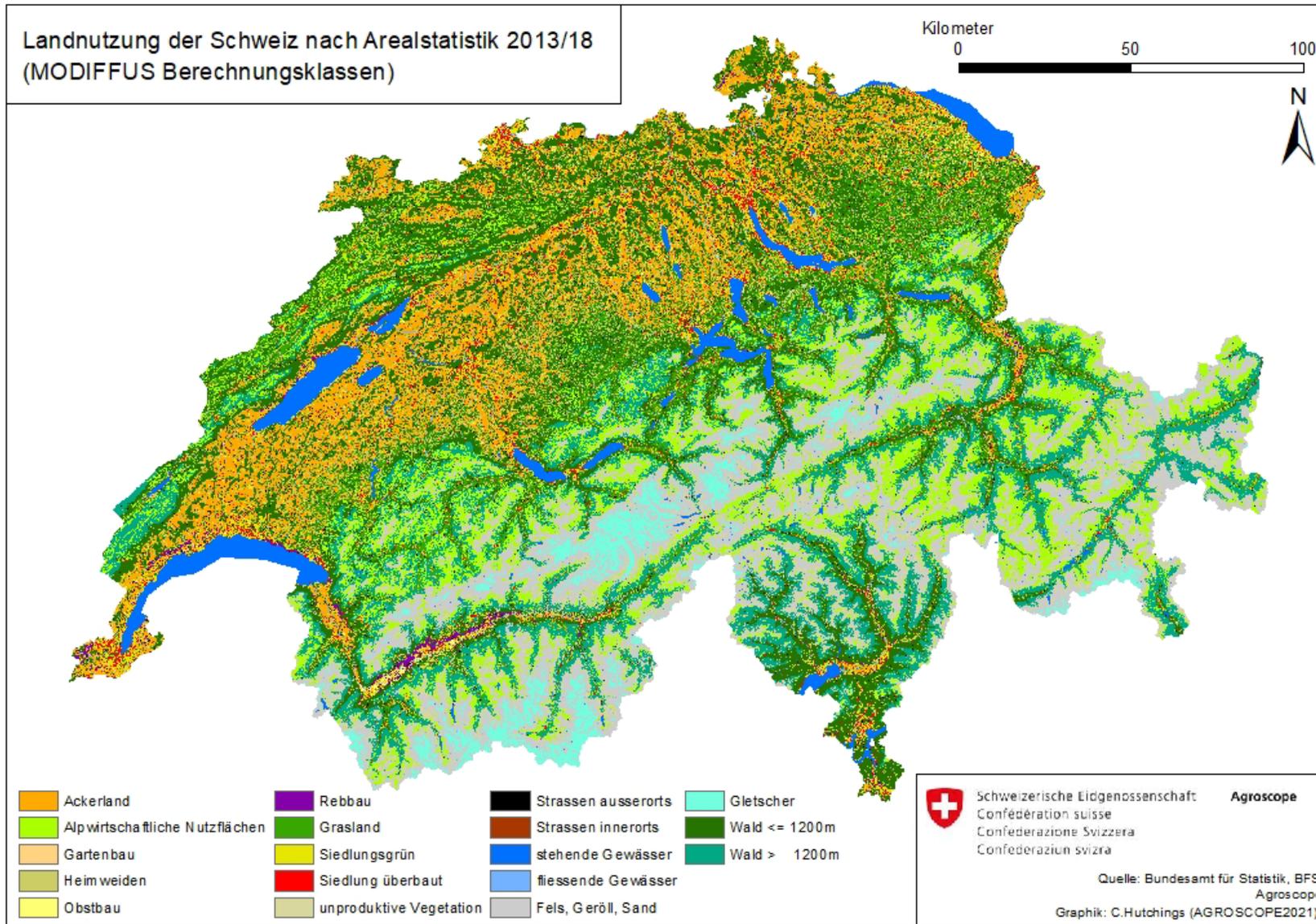


Abbildung 1: MODIFFUS-Landnutzungsklassen basierend auf Arealstatistik 2013/18.

2.1.2 Klima

Niederschlags- und Verdunstungsdaten wurden verwendet, um den potentiellen Abfluss zu berechnen. Da MODIFFUS jeweils die Nährstoffeinträge für ein durchschnittliches Jahr betrachtet, wurden die Klimadaten ebenfalls auf ein langjähriges mittleres Jahr gemittelt, um «*die Beeinflussung von Extremereignissen so gering wie möglich zu halten, aber im Gegenzug auch die Effekte eines Klimatrends einzuschliessen*» (Hürdler et al., 2015). Für MODIFFUS 2010 wurde der Zeitraum 1999 bis 2009 verwendet. Analog dazu wurden in der vorliegenden Studie zunächst die 11-Jahres-Mittelwerte für Verdunstung und Niederschlag für den Zeitraum 2010 bis 2020 gerechnet. Die berechneten Veränderungen der Mittelwerte beider Perioden (-6 % Niederschlag, +10 % Verdunstung) entsprechen jedoch nicht in diesem Masse den beobachteten oder für die Zukunft zu erwartenden klimatischen Veränderungen (keine beobachtete und zu erwartende Veränderung beim Niederschlag, keine Zunahmen bei der Verdunstung, erwartete Zunahme je nach Klimaszenario um 5-10 % bis Ende des Jahrhunderts (BAFU, 2021b), da die 11-jährigen Mittelwerte nach wie vor von der interannuellen Variabilität zu stark beeinflusst sind, als dass man den Unterschied zwischen zwei Zeitfenstern als Trend deuten könnte (s. Kap. 3.1.1). **Daher wurde für MODIFFUS 2020 der Mittelwert über 30 Jahre für den Zeitraum 1991–2020 verwendet.** Diese Zeitspanne entspricht derjenigen für den neuen Normwert für die Niederschlagssumme von Meteoschweiz (2022). Um zwischen klimatischen Veränderungen und diesen methodischen Veränderungen unterscheiden zu können, wurden neben dem Vergleich der beiden 11-Jahres-Mittelwerte auch die zwei Normzeiträume von Meteoschweiz (1981–2010 sowie 1991–2020) verglichen.

2.1.2.1 Niederschlag

Für die Berechnung des 11-Jahre-Mittelwertes wurden die mittleren jährlichen Niederschläge von 2010 bis 2020 aus den MeteoSwiss Grid-Data Product RhiresY (MeteoSwiss, 2020) verwendet. Der Mittelwert dieser 11-jährigen Raster wurde gebildet, anschliessend der Raster von CH1903 LV03 nach CH1903+ LV95 transformiert und von der gegebenen Auflösung (1 km x 1 km) auf das Hektarraster resampled. Für den 30-jährigen Mittelwert (1981–2010 sowie 1991–2020) wurden die Normdatensätze von Meteoschweiz (2022a & 2022b) verwendet.

2.1.2.2 Verdunstung

Die jährlichen Daten der aktuellen Evapotranspiration wurden von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL, 2020a) zur Verfügung gestellt. Die aktuelle Verdunstung wurde mit der Penman-Monteith-Formel berechnet (Gurtz et al., 1999) und basiert, wie auch für die Jahre 1999-2009, für die Jahre 2010-2020 auf der Arealstatistik 1992/97. Diese Arealstatistik repräsentiert die Landnutzung für den Zeitraum 1990 bis 1998. Bei veränderter Landnutzung bis zum Jahr 2020, insbesondere bei Versiegelung, kommt es daher zu Abweichungen der aktuellen Verdunstung. Die Daten liegen in einer 2 km x 2 km Auflösung vor. Es wurde der Mittelwert für die Zeitperiode 2010-2020 sowie die beiden Normperioden 1981-2010 sowie 1991-2020 berechnet und dann auf ein Hektarraster disaggregiert. Im Datensatz der WSL fehlen Daten für kleinere Flächen im Kanton Graubünden, Genf und Tessin. Hier wurden die Daten der mittleren jährlichen aktuellen Verdunstungshöhen von HADES (Schädler & Hubacher, 2002) der Zeitperiode 1973–1992 verwendet. Bei der circa 40 km² grossen Fläche im Kanton Graubünden und einzelnen weiteren Pixeln, für welche weder WSL-Daten noch HADES-Daten vorlagen, wurden mit dem Schweizer Mittelwert der WSL-Daten des jeweiligen Zeitraums (11 bzw. 30 Jahre) ergänzt.

2.1.2.3 Potentieller Abfluss

Aus den jeweiligen mittleren Niederschlags- und Verdunstungsdaten wurde der mittlere potentielle Abfluss hergeleitet. Diverse andere Einflüsse auf den Abfluss wie Schnee- und Gletscherschmelze, Bodenspeichervermögen oder Wasserentnahmen und -rückgaben blieben unberücksichtigt. Da der Fokus auf den Nährstoffemissionen liegt, bildet diese vereinfachte Wasserbilanz die Wasserflüsse gut ab (s. Kap. 3.1.1). Der potentielle Abfluss wird anschliessend aufgeteilt in Oberflächenabfluss, Drainageabfluss und Sickerwasser (s. Kap. 2.2.2).

2.1.3 Drainage

Die drainierten Flächen wurden aus der Drainagekarte von Koch & Prasuhn (2020) zusammengestellt. Für die Erstellung dieser Karte wurden Geodaten der drainierten Flächen, welche in zehn Kantonen vorlagen, verwendet. Basierend auf diesen kantonalen Drainagedaten, nationalen Geodaten zu Geologie, Hangneigung, den historischen

Feuchtgebieten (Siegfriedkarte) sowie diversen Attributen von kantonalen Bodenkarten und der Bodeneignungskarte wurde mittels „Machine Learning“ die Karte der Potentialflächen für die Entwässerung durch Drainagen für die ganze Schweiz erstellt. Bei allen Flächen mit mittlerem und hohem Potential wurde angenommen, dass diese drainiert sind.

Für MODIFFUS wurde eine «kombinierte Drainagekarte» verwendet: für die zehn Kantone, welche digitalisierte Daten haben, wurden die Geodaten der Kantone verwendet, für die restlichen 16 Kantone wurden die modellierten Flächen mit mittleren oder hohem Drainagepotential verwendet. Da die Geodaten der Kantone auf archivierten Unterlagen bestehen und daher ausgewiesene drainierte Flächen teilweise mittlerweile im Siedlungsgebiet liegen, wurde für MODIFFUS nur jene drainierten Flächen verwendet, welche gemäss Arealstatistik 2013/18 innerhalb der landwirtschaftlich genutzten Flächen liegen (Abb. 2).

Für MODIFFUS 2010 wurde ein ähnlicher, aber vereinfachter Modellierungsansatz gewählt. Zu diesem Zeitpunkt standen nur Geodaten von 4 Kantonen zur Verfügung. Mit Hilfe dieser wurden Parameter aus der Bodeneignungskarte sowie die Höhe der Hangneigung abgeleitet. Anhand dieser Parameter und den historischen Feuchtgebieten (Siegfriedkarte) wurden für Grasland und Ackerland die drainierten Flächen ausgewiesen, sodass diese mit den Angaben der BLW-Umfrage zu den total drainierten Flächen pro Kanton (Béguin & Smola, 2008) übereinstimmten.

Da auch Koch & Prasuhn (2020) sich an den 192'231 ha total drainierte Fläche der Schweiz aus der BLW-Umfrage orientierten, ist die Differenz der total ausgewiesenen drainierten Fläche der Schweiz zwischen den beiden Ansätzen minimal. Kantonal sind jedoch grössere Abweichungen festzustellen (Tab. 8). Die grössten prozentualen Abweichungen sind mehrheitlich Zunahmen der drainierten Flächen im Vergleich zu 2010 in Kantonen mit wenig drainierten Flächen: Kantone GR (7661 %), (OW 211 %), NW (197 %), LU (186 %), JU (155 %). Es gibt aber auch Kantone mit Abnahmen: AI (-73 %), VS (-55 %), BL (-55 %). Flächenmässig sind die Unterschiede im Kanton BE am grössten (-14'272 ha), gefolgt von LU (+11'291 ha), SG (+8193 ha) und FR (-7182 ha). Neben den Abweichungen der total drainierten Fläche pro Kanton gibt es auch innerhalb der Kantone räumliche Differenzen bei den drainierten Flächen (Abb. 3).

Diese Abweichungen in den Ausweisungen der potentiell drainierten Flächen sind jedoch grösstenteils methodisch bedingt. Denn es ist nicht zu erwarten, dass seit 2010 viele neue Flächen drainiert worden sind. Weiterhin ist auch nur ein relativ geringer Anteil der drainierten landwirtschaftlichen Fläche seit 2010 überbaut worden. Vergleichbares zeigt beispielsweise auch die Veränderung des Ackerlandes in Tabelle 3.

Über den Funktionszustand der ausgewiesenen drainierten Flächen ist nichts bekannt. In den MODIFFUS-Berechnungen wurde davon ausgegangen, dass alle ausgewiesenen drainierten Flächen funktionstüchtig waren.

Tabelle 8: Total drainierte Flächen gemäss Datengrundlage von MODIFFUS 2010 und 2020, sowie gemäss BLW-Umfrage 2008. Fett markiert: vorhandene kantonale Geodaten verwendet in der Drainagekarte (Koch & Prasuhn, 2020).

Kanton	Modiffus 2010 (ha)	Modiffus 2020 (ha)	BLW Umfrage 2008 (ha)	Vergleich Modiffus 2010 zu 2020		Vergleich Modiffus 2020 zu BLW Umfrage	
				Differenz (ha)	Veränderung (%)	Differenz (ha)	Veränderung (%)
Aargau	12'210	10'749	12'000	-1'461	-12	-1'251	-10
Appenzell Ausserrhoden	1'483	1'105	3'000	-378	-25	-1'895	-63
Appenzell Innerrhoden	515	139	0	-376	-73	139	0
Basel-Landschaft	4'914	2'233	4'700	-2'681	-55	-2'467	-52
Basel-Stadt	34	41	0	7	21	41	0
Bern	33'896	19'624	30'000	-14'272	-42	-10'376	-35
Freiburg	19'926	12'744	16'000	-7'182	-36	-3'256	-20
Genf	4'928	4'412	4'800	-516	-10	-388	-8
Glarus	747	1'535	740	788	105	795	107
Graubünden	44	3'415	1'715	3'371	7661	1'700	99
Jura	2'665	6'787	2'738	4'122	155	4'049	148
Luzern	6'053	17'344	4'800	11'291	186	12'544	261
Neuenburg	5'714	5'140	5'600	-574	-10	-460	-8
Nidwalden	504	1'496	462	992	197	1'034	224
Obwalden	545	1'697	466	1'152	211	1'231	264
Schaffhausen	1'422	996	1'170	-426	-30	-174	-15
Schwyz	4'300	5'225	3'900	925	21	1'325	34
Solothurn	6'609	4'578	7'000	-2'031	-31	-2'422	-35
St. Gallen	14'796	22'989	14'000	8'193	55	8'989	64
Thurgau	10'925	16'630	12'000	5'705	52	4'630	39
Ticino	721	1'521	500	800	111	1'021	204
Uri	247	426	270	179	72	156	58
Wallis	3'061	1'377	4'000	-1'684	-55	-2'623	-66
Waadt	42'680	45'298	43'649	2'618	6	1'649	4
Zug	1'958	3'319	1'495	1'361	69	1'824	122
Zürich	19'673	14'448	17'226	-5'225	-27	-2'778	-16
Schweiz total	200'570	205'268	192'231	4'698	2.3	13'037	6.8

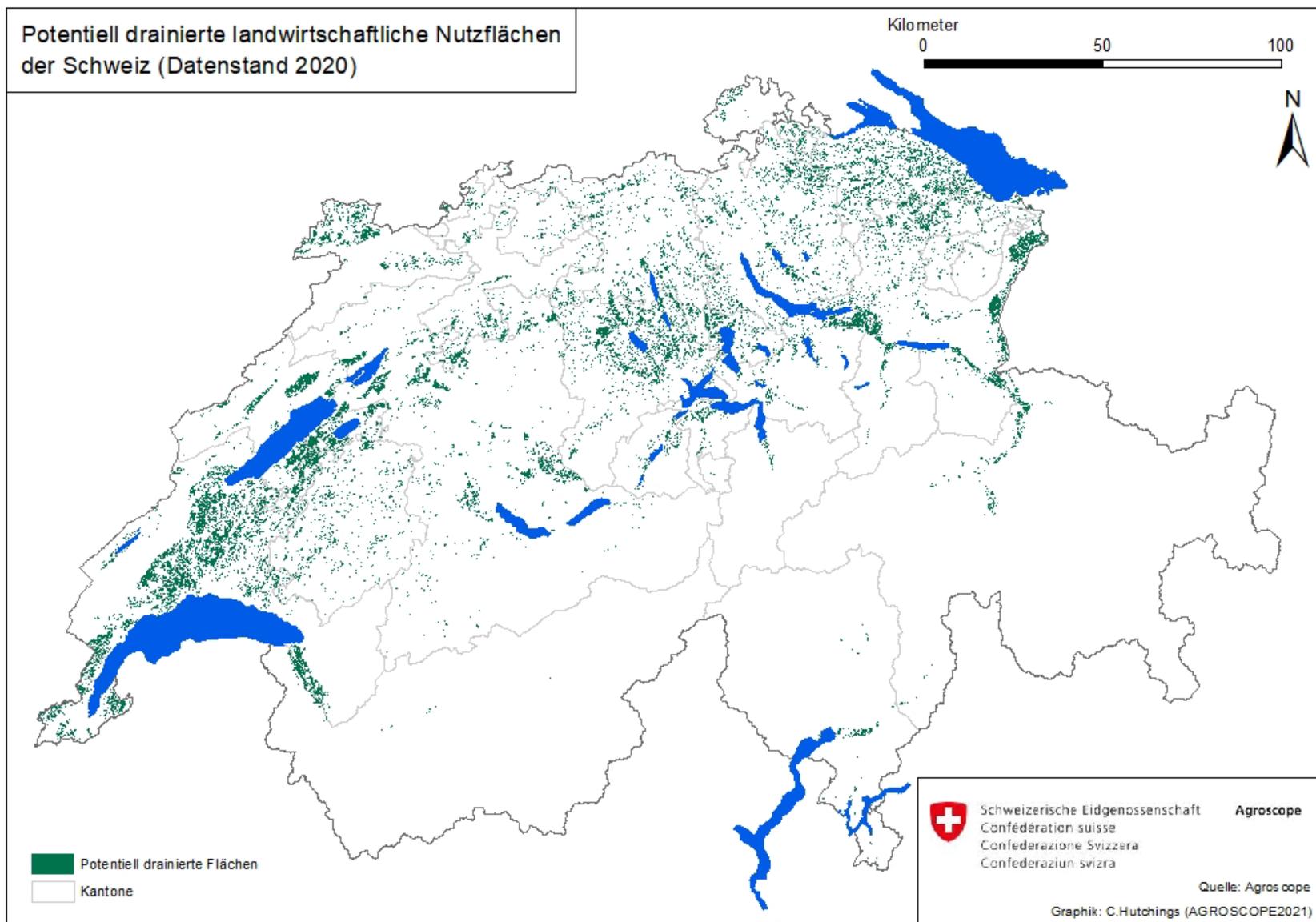


Abbildung 2: Potentiell drainierte landwirtschaftlich genutzte Flächen der Schweiz.

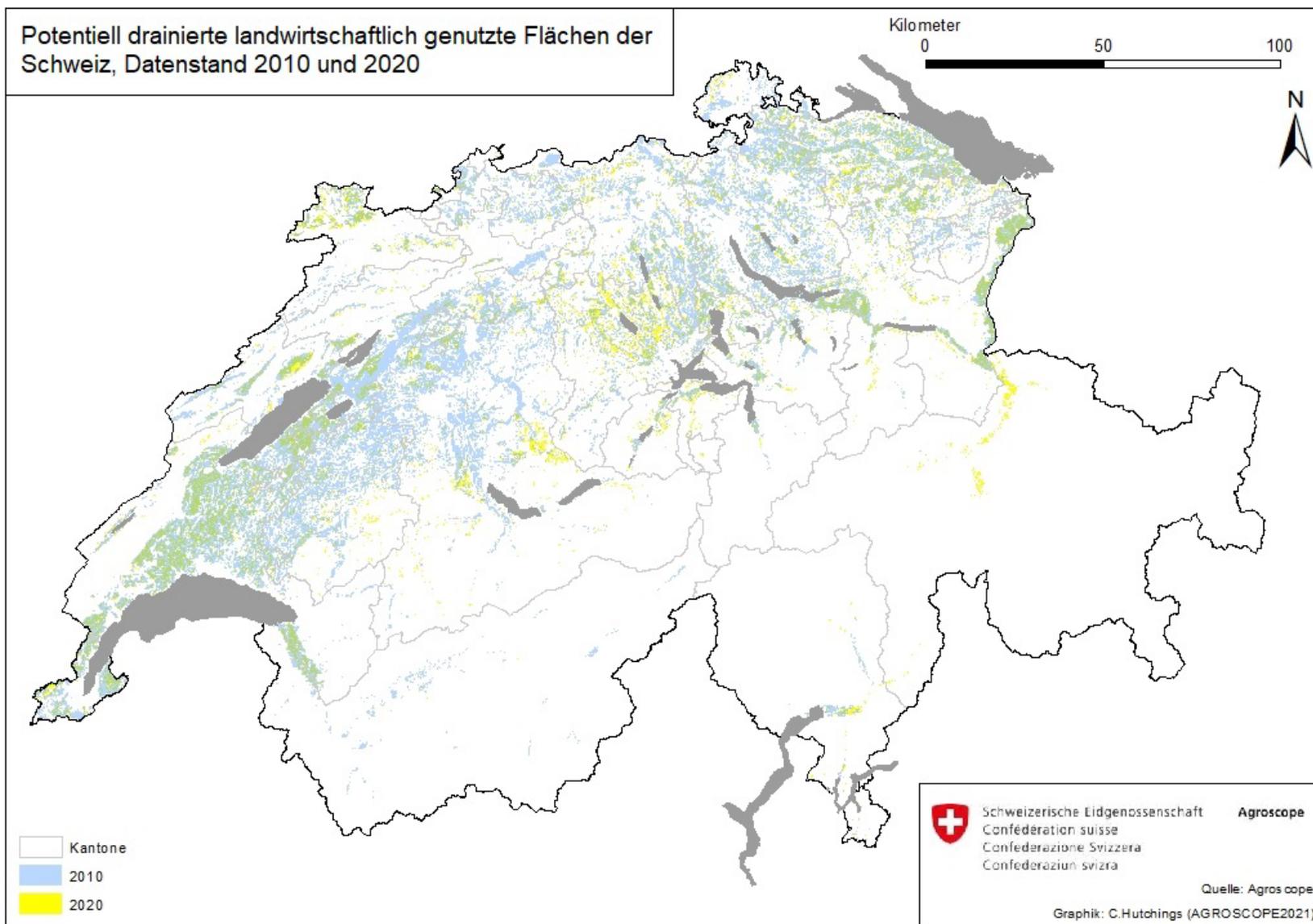


Abbildung 3: Potentiell drainierte landwirtschaftlich genutzte Flächen der Schweiz, Datenstand 2010 und 2020.

2.1.4 Gewässeranschlusskarte

Diffuse Stoffeinträge erfolgen entweder direkt von Flächen, die an ein Gewässer grenzen, oder indirekt von Flächen, die in gewisser Entfernung vom Gewässer gelegen sind, aber über Einlaufschächte und Meteorwasserableitungen an Gewässer angeschlossen sind. Die Gewässeranschlusskarte (GAK2) (Alder et al., 2013) zeigt die Wahrscheinlichkeit eines solchen Anschlusses für die landwirtschaftlich genutzten Flächen der Schweiz.

Da keine neuen Daten verfügbar waren, wurde die gleiche Gewässeranschlusskarte sowie Methodik zur Überführung der 2 x 2 km Raster in ein Hektar-Raster wie bei MODIFFUS 2010 verwendet (Abb. 4).

2.1.5 Stickstoffdeposition

Für MODIFFUS 2020 wurde die N-Depositionskarte im Hektarraster (Stand 2015) des BAFU zu Verfügung gestellt (Rihm & Künzle, 2019). Es handelt sich dabei um die modellierte Gesamtd deposition: die Summe der trockenen, gasförmigen und nassen Stickstoffdeposition. Diese Berechnungen wurden mit einem neuen Modell durchgeführt und sind somit nicht direkt mit den Ergebnissen von 2005 vergleichbar und nicht als Zeitreihe zu verstehen. Im Vergleich zu MODIFFUS 2010 (N-Deposition Stand 2005) hat die Deposition schweizweit um 15 % abgenommen (Tab. 9). Die aktuellsten Daten der Stickstoffdeposition für das Jahr 2020 erschienen nach Abschluss der MODIFFUS-Berechnungen (Rihm & Künzle, 2023) und konnten somit nicht mehr berücksichtigt werden. Die Veränderung der schweizweiten N-Deposition gemäss konsistenter Zeitreihen nach Rihm & Künzle (2023) zeigt eine Abnahme von 12 % zwischen 2005 und 2015 und eine Zunahme von 4 % zwischen 2015 und 2020.

Beim Vergleich MODIFFUS 2010 (Bezugsjahr 2005) zu MODIFFUS 2020 (Bezugsjahr 2015) sind regionale Zunahmen sowie Abnahmen der Stickstoffdeposition zu beobachten, wobei vor allem im Mittelland und den grossen Tälern (Rhone, Ticino, Alpenrhein) die Deposition zugenommen hat (Abb. 6). Diese Zunahme ist sehr wahrscheinlich methodisch bedingt: Einerseits wurden im Gegensatz zur Stickstoffdeposition 2005 die HODUFLU-Daten (verschobene Hof- und Recyclingdüngern zwischen Abgeber und Abnehmer) berücksichtigt (insbesondere die Kantone AG und ZH haben hohe Annahmen, siehe Kap. 2.1.7) andererseits wurde eine Korrektur eingeführt, um die topographischen Verhältnisse besser zu berücksichtigen. Die Modellierung für 2005 unterschätzte die Deposition im Talgebiet und überschätzte sie in höheren Lagen. Die modellierten Werte der Deposition für 2015 stimmen besser mit den gemessenen Werten überein (Rihm & Künzle, 2019).

Tabelle 9: Schweizweite Stickstoffdeposition für die Bezugsjahre 2005 und 2015. Die Zahlen stammen aus einer nicht konsistenten Zeitreihe und sind daher nur bedingt vergleichbar.

MODIFFUS	Bezugs-jahr	Raster	Deposition total (t)	Ø kg N/ha/Jahr
2010	2005	1 * 1 km ²	71'600	17.5
2020	2015	0.01 * 0.01 km ²	61'600	14.8

Für die weitere Berechnung für MODIFFUS wurde die N-Depositionskarte von 2015 mit der Niederschlagskarte verrechnet, um die mittlere N-Konzentration im Niederschlag zu erhalten (Abb. 5). Da uns keine Karte der nassen Deposition zur Verfügung stand, wurde die Gesamt-Deposition als eine grobe Annäherung verwendet.

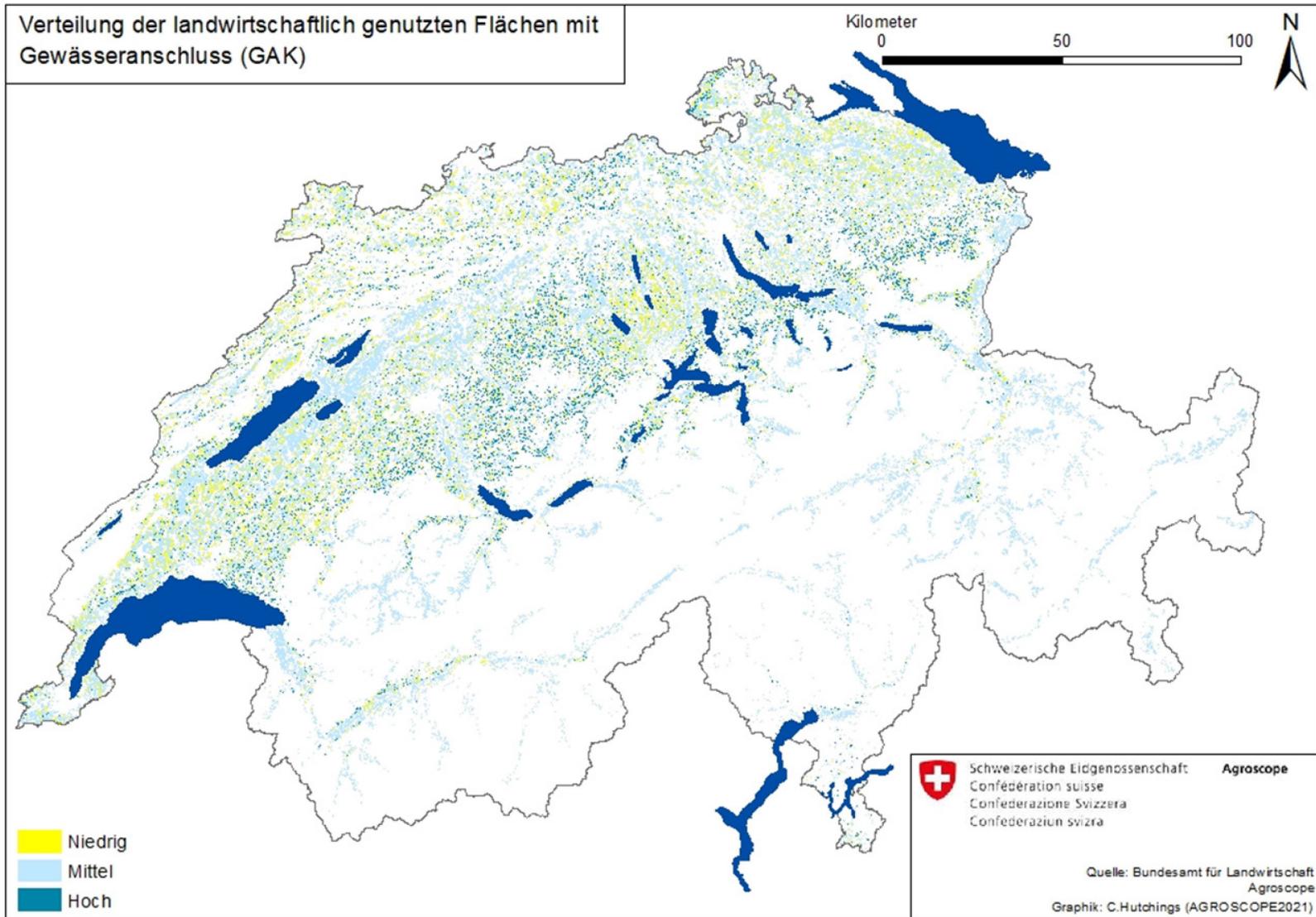


Abbildung 4: Wahrscheinlichkeit des Gewässeranschlusses landwirtschaftlich genutzter Flächen.

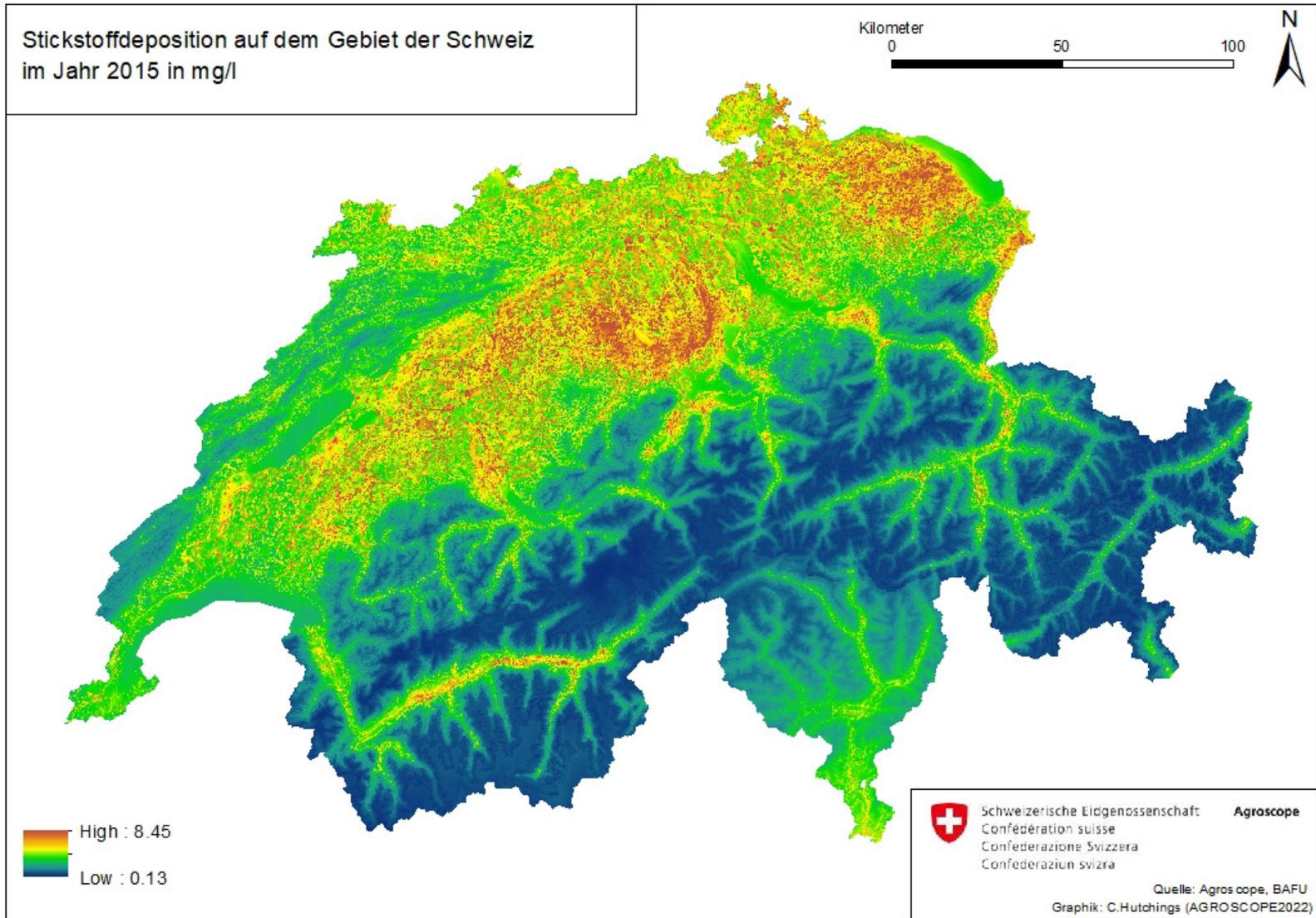


Abbildung 5: Gesamte N-Deposition in Relation zur Niederschlagsmenge der Schweiz im Jahr 2015 (in mg/l Niederschlag).

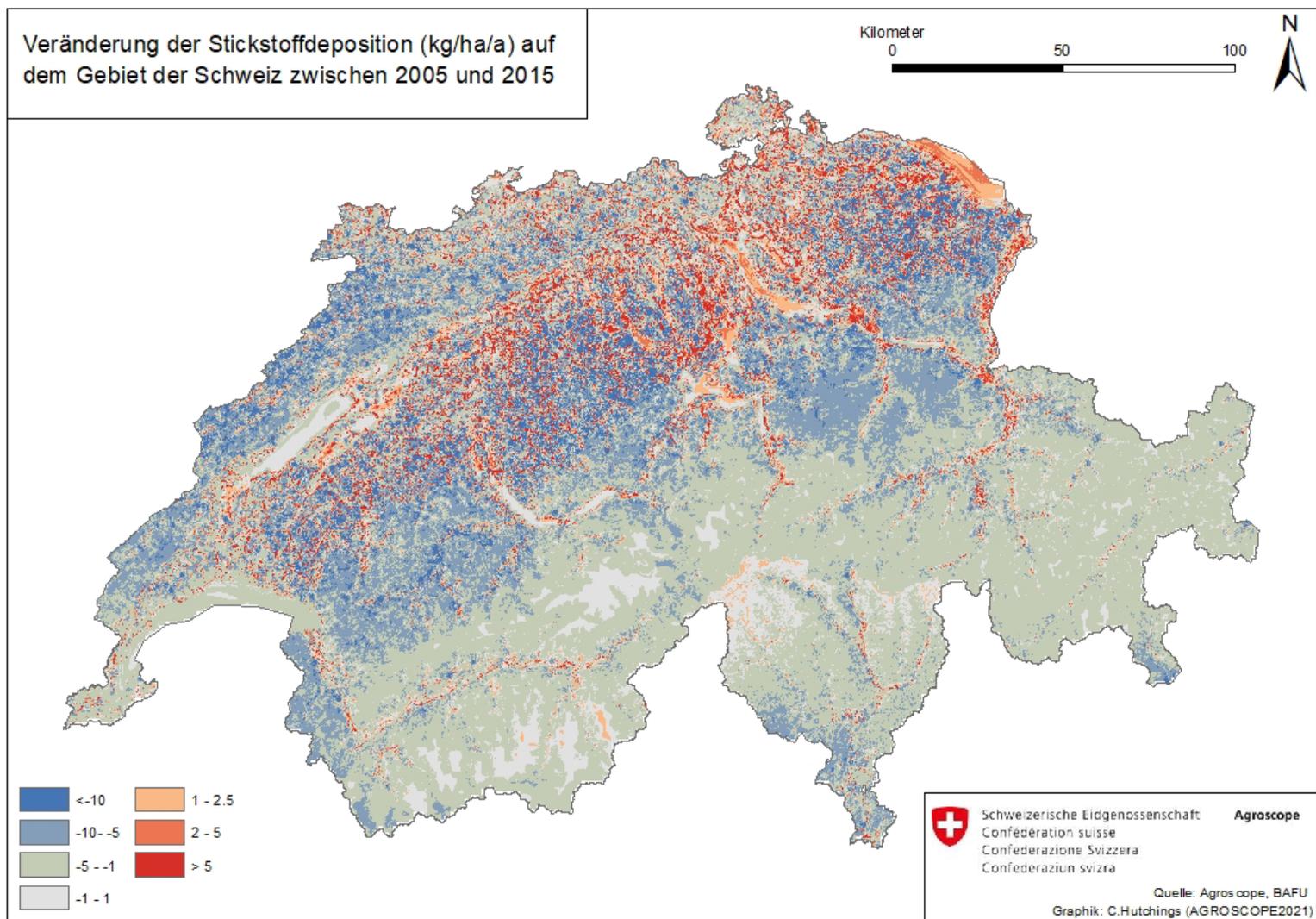


Abbildung 6: Veränderung der Stickstoffdeposition zwischen 2005 und 2015 (in kg/ha). Die Werte zeigen nicht den zeitlichen Unterschied innerhalb einer konsistenten Zeitreihe, sondern den Unterschied zwischen der N-Deposition 2005 aus dem einem alten Modell (verwendet für MODIFFUS 2010) mit der N-Deposition 2015 aus einem neueren Modell (verwendet für MODIFFUS 2020).

2.1.6 Bodeneigenschaften

2.1.6.1 Erosionsgefährdung: Erosionsrisikokarte

Für die Berechnung der Erosion auf Ackerland (inkl. Wein- und Gartenbau) wurde die neue Erosionsrisikokarte der Schweiz ERK2 (Bircher et al., 2019) verwendet. Die ERK2 ist ein Update jener Karte von Gisler et al. (2010), welche für MODIFFUS 2010 verwendet wurde. Unter anderem wurden für die neue ERK2 die neue Feldblockkarte, die parzellenscharfen kantonalen Daten zur Unterscheidung von Acker- und Dauergrünland sowie neue kantonale Bodenkarten zur Berechnung des K-Faktors verwendet (Abb. 7). Die ERK2 zeigt das potentielle Erosionsrisiko der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche der Schweiz in einer 2-Meter-Auflösung in Tonnen Bodenmaterial pro Hektare und Jahr. Es handelt sich dabei um On-Site Erosionsschäden, welche unter Annahme eines permanent unbedeckten Bodens entstehen könnten. Um die effektive Erosion abschätzen zu können, wurde die ERK2 mit dem Bedeckungs- und Bodenbearbeitungsfaktor (C-Faktor) sowie Erosionsschutzfaktor (P-Faktor) verrechnet (s. dazu Kap. 2.2.3.4).

Tabelle 10: Vergleich des potentiellen Bodenabtrages gemäss ERK2 (Bircher et al., 2019) und der unterschiedlichen Aggregationsmethoden. ERK2: original 2 m x 2 m-Raster-Ausschnitt der Acker-, Reb- und Gartenbauflächen mit der Arealstatistik 2020; A1: Aggregierungsmethode nach MODIFFUS 2010, A2 Aggregierungsmethode nach MODIFFUS 2020; Diff.: Differenz.

		Ackerland	Gartenbau	Reben	Gesamt
Fläche (ha)	ERK2	350'505	2'746	12'064	365'315
	A1 sowie A2	386'264	4'165	14'955	405'384
	Diff. ERK2 und A1/A2 (ha)	35'759	1'419	2'891	40'069
	Diff. ERK2 und A1/A2 (%)	10.2	51.6	24.0	11.0
Mittlere potentielle Erosion (t/ha/Jahr)	ERK2	14.0	12.9	32.0	14.6
	A1	13.9	13.4	34.6	14.7
	A2	12.7	8.5	25.8	13.2
	Diff. ERK2 zu A1 (t/ha/Jahr)	-0.1	0.5	2.6	0.1
	Diff. ERK2 zu A1 (%)	-0.8	3.9	8.1	0.4
	Diff. ERK2 zu A2 (t/ha/Jahr)	-1.3	-4.4	-6.2	-1.4
	Diff. ERK2 zu A2 (%)	-9.3	-34.1	-19.3	-9.9
	Diff. A1 zu A2 (%)	-8.5	-36.5	-25.4	-10.3
Total potentielle Erosion Schweiz (t/Jahr)	ERK2	4'923'827	35'383	385'976	5'345'186
	A1	5'382'659	55'757	517'382	5'955'798
	A2	4'923'870	35'383	385'981	5'345'235
	Diff. ERK2 zu A1 (t/Jahr)	458'833	20'373	131'406	610'612
	Diff. ERK2 zu A1 (%)	9.3	57.6	34.0	11.4
	Diff. ERK2 zu A2 (t/Jahr)	44	0	5	49
	Diff. ERK2 zu A2 (%)	0.0	0.0	0.0	0.0
	Diff. A1 zu A2 (%)	-8.5	-36.5	-25.4	-10.3

Für die Verwendung der ERK2 in MODIFFUS 2020 wurde in einem ersten Schritt die Ackerland-, Gartenbau- und Rebbau-Flächen der Arealstatistik gesondert aus der ERK2 extrahiert und in der Folge separat aggregiert, um eine Beeinflussung der verschiedenen Landnutzungsflächen untereinander auszuschliessen (Abb. 8). Die Aggregationsmethode wurde in MODIFFUS 2020 im Vergleich zu MODIFFUS 2010 angepasst, um eine bessere Übereinstimmung beim totalen potentiellen Bodenabtrag der Schweiz zwischen MODIFFUS und der ERK2 zu erreichen. 2010 wurden vom 2m x 2m Raster der ERK2 bei der Aggregation nur jene Rasterzellen berücksichtigt, welche ein Erosionsrisiko aufwiesen. Falls z. B. in einer Hektare Ackerland die Hälfte der 2m x 2m-Raster ein Erosionsrisiko aufwiesen und die andere Hälfte nicht, wurde der Mittelwert nur aus den Rasterzellen mit Erosionsrisiko berechnet. Für 2020 wurden diese Zellen ohne Erosion bei der Berechnung der mittleren Erosion pro Hektare auch berücksichtigt.

Somit liegen die mittlere potentielle Erosion pro Rasterzelle sowie die schweizweite potentielle Erosion mit der MODIFFUS-Aggregationsmethodik 2010 höher als mit der Aggregationsmethodik 2020 (Tab. 11, Zeile 6/7 und 14/15). Bei Ackerland ist im Vergleich zu den Reb- und Gartenbauflächen der Unterschied zwischen den zwei Aggregationsmethoden kleiner, da Ackerflächen meist grössere zusammenhängende Flächen sind und somit der Mittelwert pro Hektare aus einer ähnlichen Anzahl an Rasterzellen der ERK2 erstellt wurden. Während bei der Version MODIFFUS 2010 die mittlere Erosion gut mit der ERK2 übereinstimmt (0.4 % Abweichung), liegt mit dieser Methodik die schweizweite totale Erosion um 11.4 % höher, da der gleiche Mittelwert der ERK2 auf eine 11 % grössere Fläche angewandt wurde (Tab. 10, Zeile 4 und 17). Demzufolge ist für MODIFFUS 2020 die mittlere potentielle Erosion mit 13.2 t/ha/Jahr im Vergleich zur ERK2 (14.6 t/ha/Jahr) zu tief, aber die Summe pro Rasterzelle sowie die Summe der schweizweiten potentiellen Erosion stimmen mit jener von der ERK2 sehr gut überein.

Im Vergleich zu 2010 hat aufgrund der neuen ERK2 (Bircher et al., 2019), der neuen Aggregationsmethode sowie Landnutzungsänderungen die schweizweite potentielle Erosion (t/Jahr) um gut 30 % abgenommen (Tab. 11, letzte Zeile). Etwa zwei Drittel dieser Abnahme ist der neuen ERK2 zuzuschreiben, da die mittlere Erosion, berechnet für 2020 mit der Aggregationsmethode 2010, um 20 % (Tab. 11, Zeile 10) abgenommen hat.

Tabelle 11: Vergleich der potentiellen Erosion zwischen MODIFFUS 2010 und 2020.

			Ackerland	Gartenbau	Reben	Gesamt
2010	Fläche (ha)		403'280	3'650	15'405	422'335
	Mittlere Erosion (t/ha/Jahr)		17.7	12.7	36.9	18.4
	Total Erosion (t/Jahr)		7'155'500	46'189	568'091	7'769'779
2020	Fläche (ha)		386'264	4'165	14'955	405'384
	Mittlere Erosion (t/ha/Jahr)	A1	13.9	13.4	34.6	14.7
		A2	12.7	8.5	25.8	13.2
	Total Erosion (t/Jahr)	A1	5'382'659	55'757	517'382	5'955'798
		A2	4'923'870	35'383	385'981	5'345'235
Vergleich 2010 (A1) zu 2020 (A1)	Mittlere Erosion (t/ha/Jahr)	t/ha/Jahr	-3.81	0.73	-2.28	-3.71
		%	-21.5	5.8	-6.2	-20.1
	Total Erosion (t/Jahr)	t/Jahr	-1'772'841	9'568	-50'709	-1'813'981
		%	-24.8	20.7	-8.9	-23.3
Vergleich 2010 (A1) zu 2020 (A2)	Mittlere Erosion (t/ha/Jahr)	t/ha/Jahr	-5.00	-4.16	-11.07	-5.21
		%	-28.2	-32.9	-30.0	-28.3
	Total Erosion (t/Jahr)	t/Jahr	-2'231'630	-10'805	-182'110	-2'424'545
		%	-31.19	-23.39	-32.06	-31.20

2.1.6.2 Abschwemmungs- und Auswaschungsgefährdung aufgrund von Bodeneigenschaften

Die Abschwemmungs- sowie Auswaschungsgefährdung der Böden basiert auf der Bodeneignungskarte (BEK200) (BFS, 2004) sowie einem unvollständigen Mosaik aus diversen kantonalen Daten (Abb. 7). Seit der Berechnung der Stoffeinträge für 2010 wurden in einigen Kantonen Bodenkarten digitalisiert, sodass neben den bereits verwendeten kantonalen Daten für MODIFFUS 2010 (AG, BL, GR, LU, SG, SO, TG, ZH, ZG) neu auch die GIS-Daten der Kantone BE, GL, FR (Murten) und VS verwendet wurden. Weiterhin wurden in den Kantonen Luzern und Solothurn neue Flächen kartiert, weitere Flächen digitalisiert und vorhandene digitale Bodenkarten bereinigt. Etwa ein Drittel der gesamten Fläche dieser Kantone (Stand 2020) wurde seit MODIFFUS 2010 neu kartiert oder digitalisiert. Daher wurde das Auswaschungs- sowie Abschwemmungsrisiko für SO und LU für den ganzen Kanton nochmals neu berechnet. Weiterhin wurde die GIS-Methodik zur Zusammenführung der kantonalen Daten und der BEK200 angepasst, sodass die kantonalen Daten mit allen vorhandenen Flächen der BEK200 ergänzt wurden. Tabelle 12 gibt einen Überblick über die Grösse der Fläche der neu verwendeten Bodenkarten.

Tabelle 12: Neu verwendete Bodendaten in MODIFFUS 2020.

Kanton	Fläche (km ²)	Masstab
BE	461	1:5'000 1:25'000
GL	11	1:5'000
LU*	418	1:5'000 1:10'000 1:25'000
Murten (FR)	142	1:25'000
SO*	219	1:5'000
VS	66	1:10'000
BEK200	1'293	1:200'000

* Fläche der gesamten verfügbaren kantonalen Daten.

Für die Berechnung der potentiellen Abschwemmungsgefährdung wurde als Grundlage die bereits klassifizierte BEK200 von Hürdler et al. (2015) übernommen. Die Risiko-Klassierung (5 Klassen) basiert auf der Wasserdurchlässigkeit (doppelt gewichtet) und dem Vernässungsgrad. Die Einteilung beruht auf der Annahme, dass mit zunehmender Durchlässigkeit die Gefahr von Oberflächenabfluss abnimmt bzw. bei gehemmter Durchlässigkeit die Wahrscheinlichkeit von Wassersättigung bis zur Oberfläche zunimmt und damit die Oberflächenabflussgefahr steigt. Vernässte Böden sind häufig bis zur Oberfläche gesättigt und dementsprechend setzt bei Niederschlag Oberflächenabfluss ein.

Auch die kantonalen Daten wurden in fünf Klassen eingeteilt. Wie bei MODIFFUS 2010 wurde die Klassierung von Schmid & Prasuhn (2000) angewendet, welche die Wasserhaushaltsgruppe (WHG), den Bodentyp (Halbmoor und Moor), den Skelettgehalt und die Körnung des Oberbodens berücksichtigt (s. Abb. A1 im Anhang A). Bodenbedingt – also unabhängig von der Neigung, Bewirtschaftung und klimatischen Gegebenheiten – zeigen vor allem organische Böden (z. B. im Seeland) oder schlecht durchlässige Böden (z. B. entlang Voralpen) ein hohes Abschwemmungsrisiko (Abb. 9).

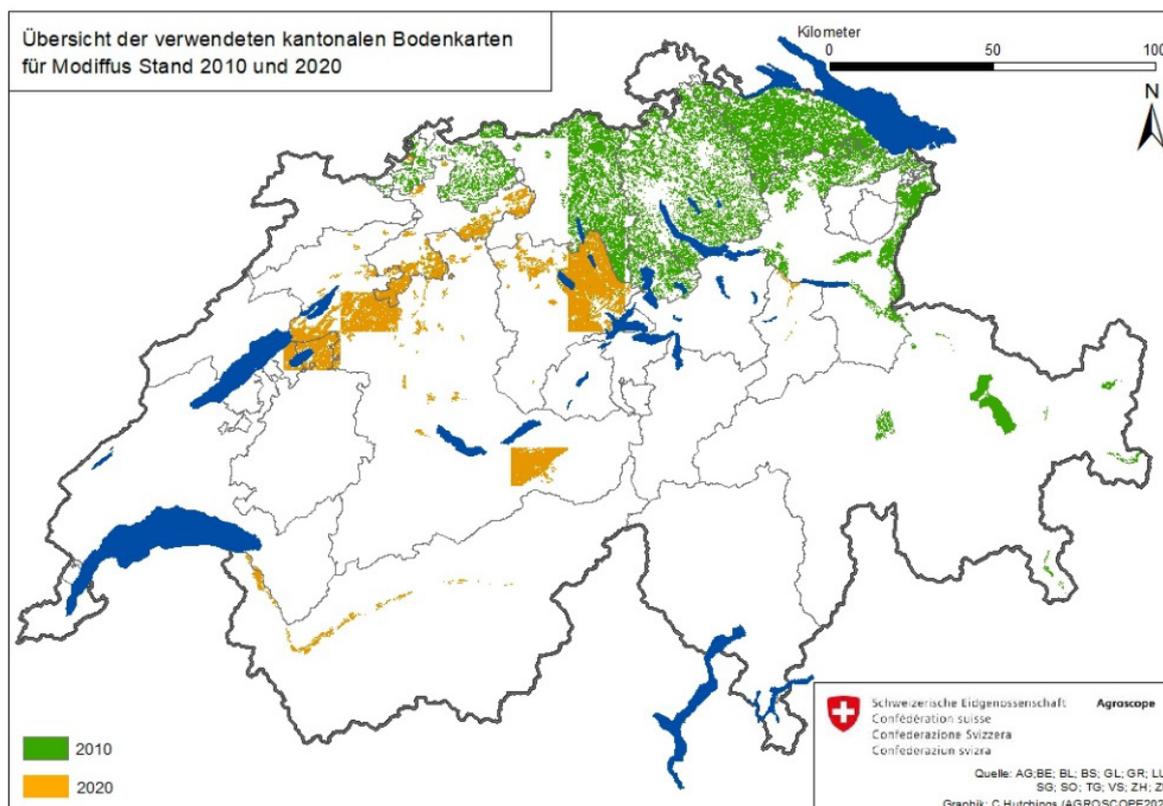


Abbildung 7: Übersicht der verwendeten kantonalen Bodenkarten für MODIFFUS Stand 2010 (grün) und zusätzlich zu den Flächen von 2010 für 2020 (ocker).

Auch für die potentielle Auswaschungsgefährdung wurde ebenfalls die klassifizierte BEK200 von Hürdler et al. (2015) übernommen. Die Klassifizierung basiert auf dem Wasserspeichervermögen (doppelt gewichtet) und der Wasserdurchlässigkeit. Je höher das Wasserspeichervermögen, desto geringer ist die Auswaschungsgefahr. Bei gehemmter Wasserdurchlässigkeit 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. Moor- und Torfböden wurden wegen des hohen Mineralisierungspotentials generell in die zweithöchste Klasse eingestuft. Bei den kantonalen Daten wurde dementsprechend, wiederum basierend auf Schmid & Prasuhn (2000), die Bodentypen Halbmoor und Moor in die zweithöchste Klasse eingeteilt. Die anderen Böden wurden basierend auf der WHG klassiert. Die Körnung des Oberbodens und Unterbodens kann bei allen Bodentypen zu einer Zu- oder Abnahme um eine Klasse führen (Anhang A, Abb. A2). In den Alpen und im Tessin ist das bodenbedingte Auswaschungsrisiko hoch, da hier vielfach flachgründige und gut durchlässige Böden mit geringem Wasserspeichervermögen vorliegen (Abb. 10). Im Mittelland herrschen dagegen eher tiefgründige Böden mit hohem Wasserspeichervermögen vor, weshalb das bodenbedingte Auswaschungsrisiko eher mässig bis gering ist.

Die Karten der Abschwemmungs- sowie der Auswaschungsgefährdung (Abb. 9 und 10) wurden im Vergleich zu 2010 einerseits mit 1290 km² der BEK200 ergänzt sowie mit knapp 900 km² kantonalen und somit feiner aufgelösten Daten. Regional führt dies daher zum Teil zu einer Veränderung der Risikoklassifizierung. Kantonal sowie schweizweit ist diese Veränderung aber sehr gering. Die Veränderung des Mittelwertes auf kantonaler Ebene ist unter 2 %; Ausnahmen sind die Kantone Zürich (6 %) und Thurgau (3 %), da aufgrund ergänzter BEK200-Daten zusätzliche Flächen nun mitberücksichtigt wurden. Die geschätzten Abschwemmungs- und Auswaschungsrisiken unterscheiden sich zwischen den zwei untersuchten Zeitabschnitten (2010 vs. 2020) nur unwesentlich (1-2 %). Da der Mittelwert bei Klassen nicht die ideale Kenngrösse ist, wurde auch der schweizweite Flächenanteil pro Risikoklasse betrachtet: auch hier haben sich die Anteile sowohl bei der Auswaschung als auch bei der Abschwemmung nur sehr geringfügig verändert (Tab. 13).

Tabelle 13: Fläche (km²) sowie Anteil (%) pro Risikoklasse des potentiellen Auswaschungs- sowie Abschwemmungsrisikos in den Jahren 2010 und 2020.

Risikoklassen	Fläche (km ²)				Anteil (%) pro Risikoklasse			
	Auswaschung		Abschwemmung		Auswaschung		Abschwemmung	
	2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020
1: gering	3363	3835	6454	6559	10.8	11.8	20.6	20.1
2: mässig	8849	9428	13'100	13226	28.3	29.0	41.8	40.5
3: mittel hoch	6015	6223	7133	7952	19.3	19.1	22.7	24.4
4: hoch	2675	2735	3412	3570	8.6	8.4	10.9	10.9
5: sehr hoch	10'337	10'313	1267	1351	33.1	31.7	4.0	4.1
Total	31'238	32'535	31'365	32'658	100	100	100	100

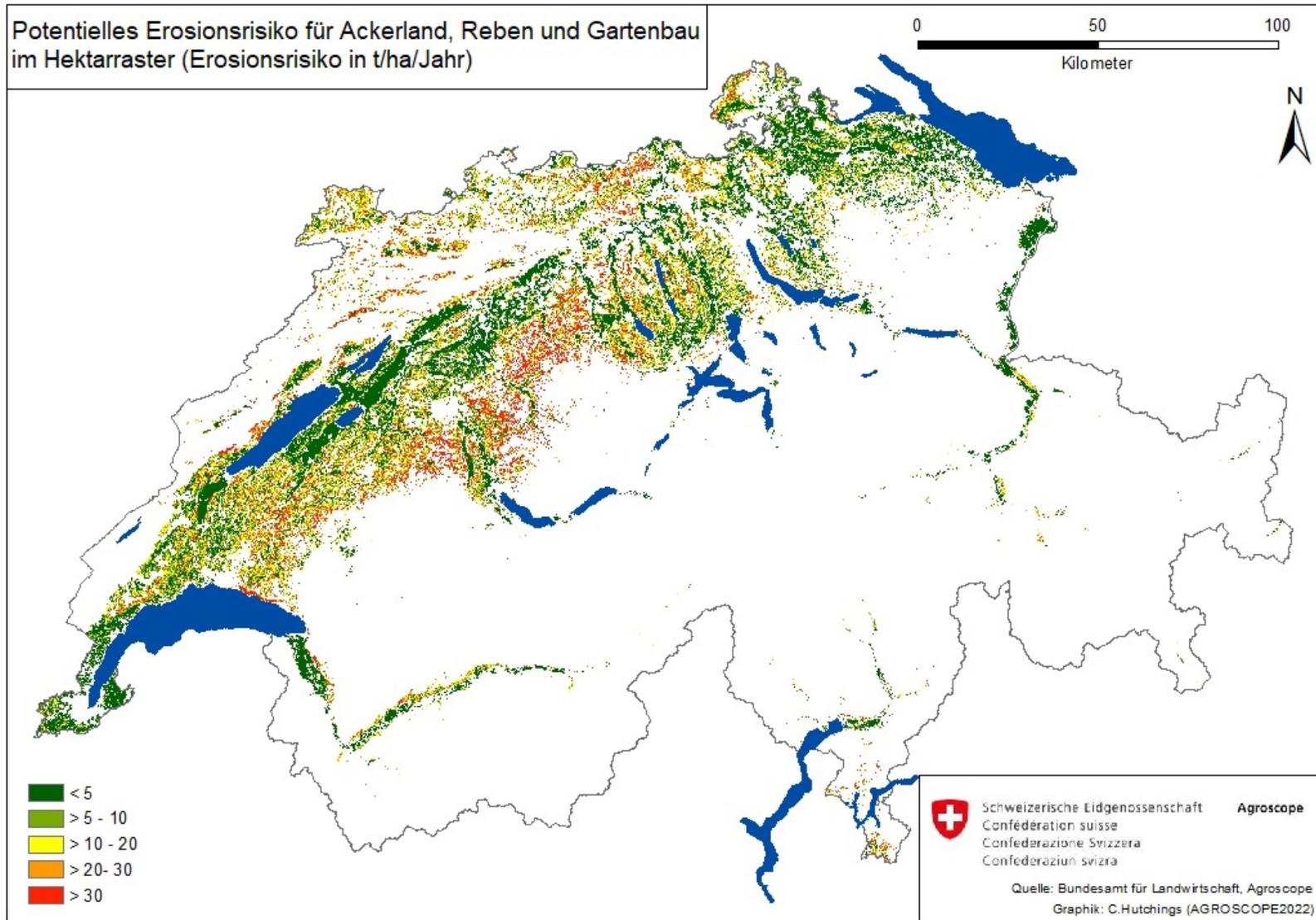


Abbildung 8: Potentielles Erosionsrisiko für Ackerland, Reben und Gartenbau im Hektarraster (Erosionsrisiko in t/ha/Jahr).

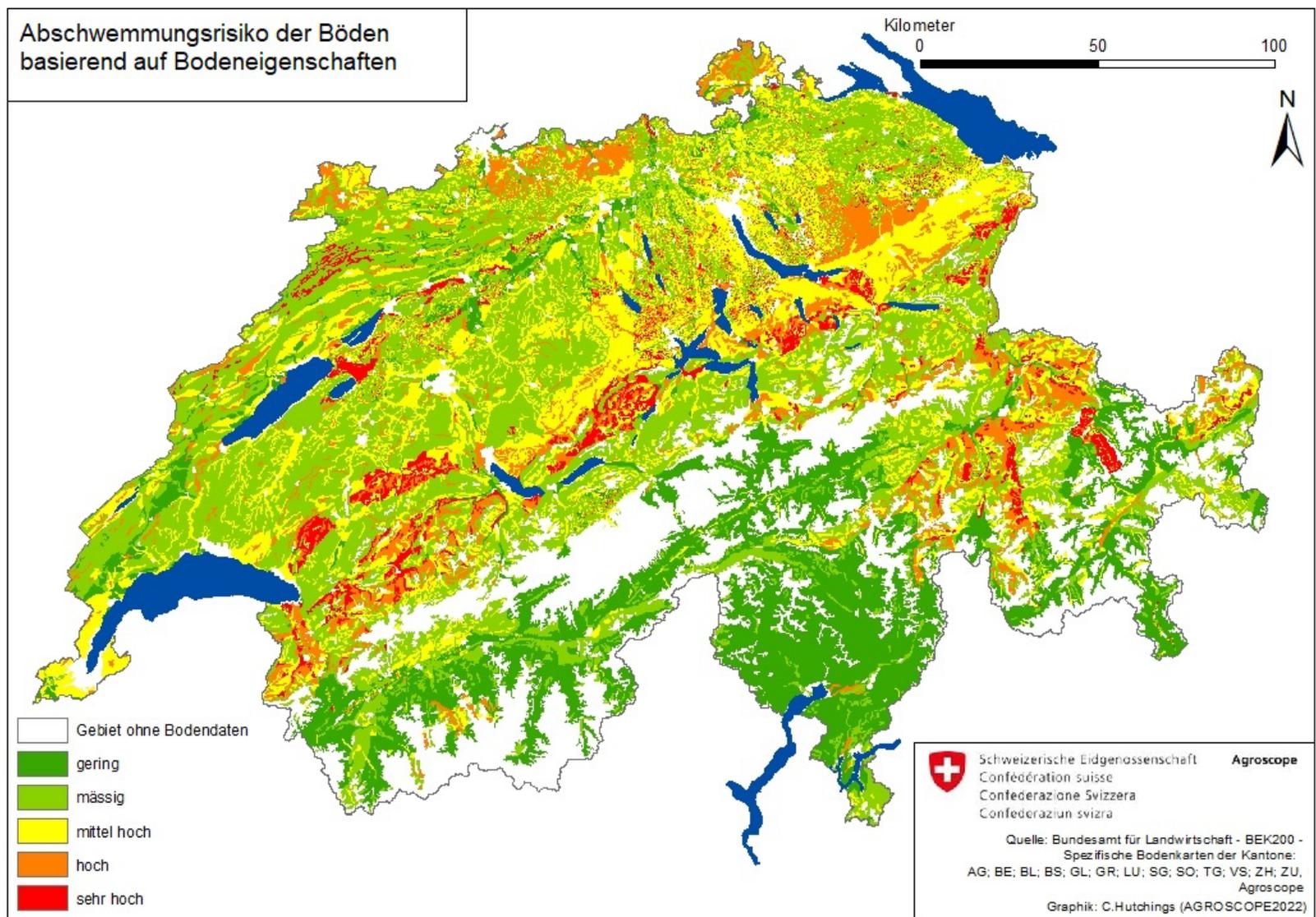


Abbildung 9: Potentielles Abschwemmungsrisiko der Böden in der Schweiz aufgrund verschiedener Bodeneigenschaften.

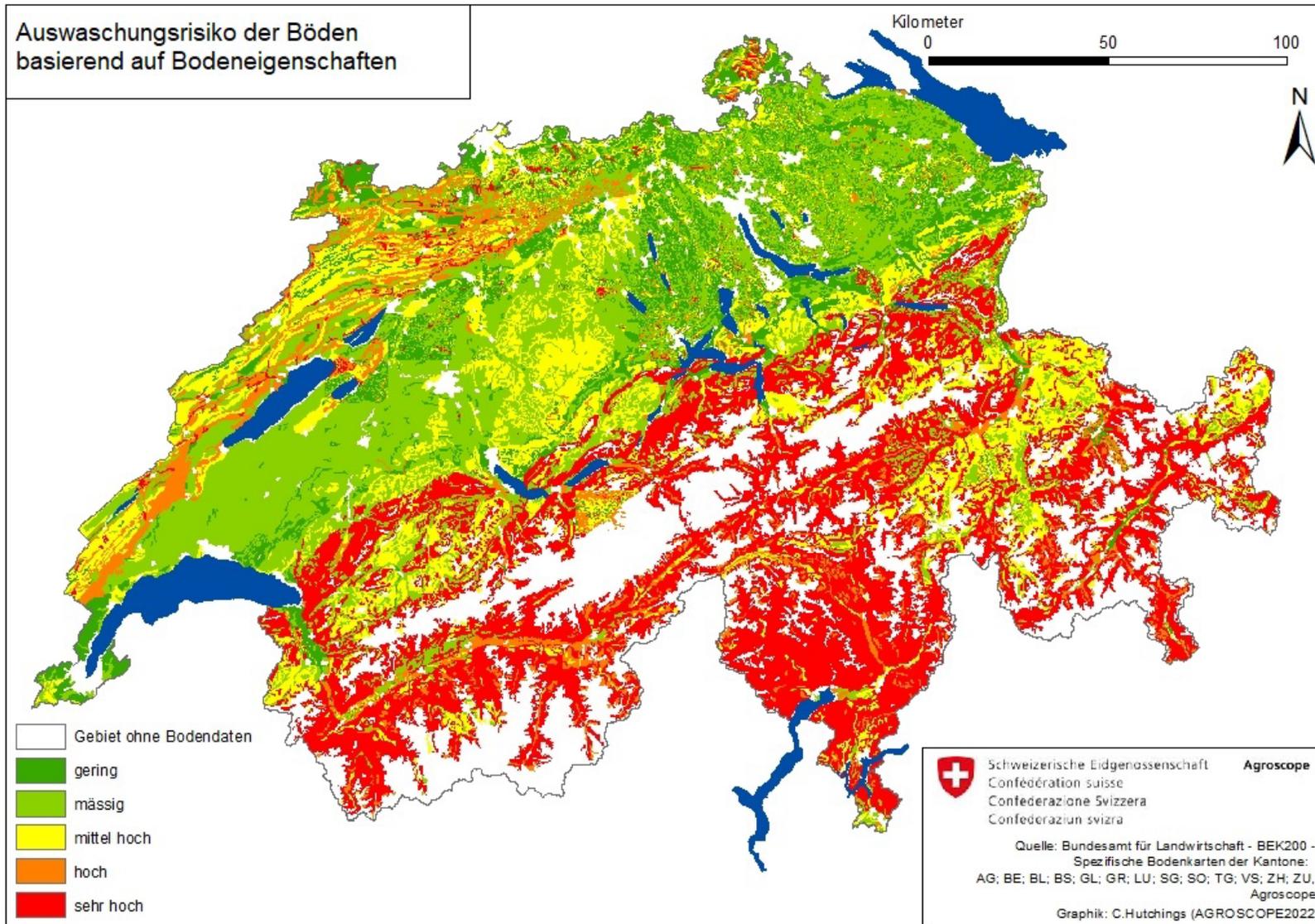


Abbildung 10: Potentielles Auswaschungsrisiko der Böden in der Schweiz aufgrund verschiedener Bodeneigenschaften.

2.1.7 Stickstoff- und Phosphorzufuhr durch Ausbringung von Hof- und Recyclingdüngern sowie durch Beweidung

Die Methodik zur Berechnung der N- und P-Zufuhr durch Ausbringung von Hof- und Recyclingdüngern sowie durch Beweidung wurde für MODIFFUS 2020 komplett geändert. Um zwischen methodisch bedingten Veränderungen und realen Veränderungen zwischen den Jahren 2010 und 2020 unterscheiden zu können, wurde die N- und P-Zufuhr einerseits – soweit wie möglich – nach dem Vorgehen von Hürdler et al. (2015) berechnet (Methodik A) und andererseits mit einer angepassten Berechnungsmethodik sowie mit zusätzlichen Datengrundlagen (Methodik B). Untenstehend werden zuerst die beiden Methoden beschrieben und anschliessend die Resultate zwischen 2010 und 2020 (Methodik A) und der unterschiedlichen Methoden miteinander verglichen.

2.1.7.1 Berechnung Methodik A

Die N- und P-Zufuhr wurde für jede Gemeinde aus den Tierzahlen des BFS (2020b) berechnet. Die Richtwerte für die Nährstoffausscheidung im Kot und Harn pro Tierkategorie wurden den Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD) entnommen (Richner et al., 2017). Die Tierzahlen des Stichtages des Jahres wurden verwendet und die Zuteilung der Tierkategorien des BFS zu jenen der GRUD wurde analog zu 2010 vorgenommen. Wo dies nicht möglich war, wie beispielsweise bei den Equiden, welche in 2020 nur noch nach Alter und Widerristhöhe und nicht mehr nach Nutzungsrichtung erfasst worden sind, wurde diese Zuteilung basierend auf Kupper et al. (2022) vorgenommen.

2.1.7.2 Berechnung Methodik B

Die N- und P-Zufuhr für MODIFFUS 2020 wurde von Rihm & Künzle (2019; 2023), welche im Auftrag des BAFU die schweizweiten Ammoniakemissionen sowie die Stickstoffdeposition modellieren, berechnet. Parallel zu den Ammoniakemissionen wurden mittels der gleichen Methodik die Zufuhr von Stickstoff und an Phosphor, welche via Hof- und Recyclingdüngerausbringung sowie Beweidung in den Boden gelangen, berechnet.

Wie bei Methodik A wurden die Tierzahlen des Stichtages des BFS (2020b) verwendet. Es wurden jedoch leicht andere Tierkategorien verwendet: Bisons, Hirsche, Lamas und Alpakas wurden nicht berücksichtigt, dafür Ponys, Kleinpferde, Esel und Maultiere. Weiterhin wurde bei den Ziegen neu auch die Kategorie «andere weibliche Ziegen über 1-jährig» verwendet, nicht nur jene der gemolkenen, sowie auch das übrige Geflügel (u. a. Enten, Gänse, Wachteln), und nicht nur die Anzahl Strausse. Bei Tierkategorien mit mehreren Umtrieben pro Jahr (z. B. Mastschweine), wo Leerzeiten zwischen den Umtrieben entstehen, wird dies mittels eines Faktors korrigiert (Kupper et al., 2022). Insgesamt liegt die Anzahl Tiere somit höher in Methodik B als in Methodik A (Tab. 17). Für die P-Ausscheidung werden wie bei Methodik A die Werte der GRUD verwendet. Bei der N-Ausscheidung werden jedoch jene von Kupper et al. (2022) verwendet, welche basierend auf einer Umfrage der HAFL mit dem Modell Agrammon berechnet wurden. Das Modell Agrammon ermöglicht eine einzelbetriebliche Berechnung der Stickstoffflüsse (inklusive Ammoniakemissionen), welche auf der Weide, im Stall und Laufhof sowie durch die Hofdüngerlagerung und -ausbringung entstehen (Abb. 11). In einem ersten Schritt werden die N-Ausscheidungswerte der GRUD mittels Angaben zur Fütterung und/oder Milchleistung angepasst, und mit weiteren Informationen (s. Tab. 14) können die Emissionen auf den einzelnen Emissionsstufen berechnet werden. Basierend auf einer Umfrage der HAFL und des BFS liegen diese Informationen für rund 3'000 Betriebe, unterteilt in 40 Betriebsklassen (geographische Region, Höhenstufe, Betriebstyp), vor. Basierend auf diesen einzelbetrieblichen Berechnungen wird für 24 Tierkategorien und für jede Betriebsklasse ein mittlerer Emissionsfaktor für die jeweilige Emissionsstufe (Weide, Stall/Laufhof, Hofdüngerlagerung etc.) berechnet. Somit liegt auch für Weide und für Hofdüngerausbringung ein Mittelwert der Menge an Gesamtstickstoff, welche in den Boden gelangt, für die jeweilige Kombination von Tierkategorie und Betriebsklassen vor.

Der N-Anfall auf der Weide sowie die mit den Hofdüngern ausgebrachte N-Menge wird pro Betrieb berechnet, indem die Anzahl Tiere mit diesen Mittelwerten multipliziert wird. Informationen zur Aufteilung zwischen dem Anfall auf der Weide und der Menge in den ausgebrachten Hofdüngern liegen für P nicht vor. Daher wurde das Verhältnis von Weide zu Hofdüngerausbringung pro Tierkategorie von N übernommen. Da nur der Standort der Betriebe bekannt ist und nicht, welche Flächen beweidet bzw. welche mit Hofdünger gedüngt werden, wurde die gesamte N- und P-Zufuhr aller Betriebe einer Gemeinde auf die «relevanten» Flächen der Arealstatistik (Heimweiden, Ackerland...) pro Gemeinde verteilt. Die Beschreibung dieser Verteilung folgt im Kapitel 2.1.7.8.

Die wichtigsten Anpassungen gegenüber der Methodik A sind folgende:

- Korrekturfaktor bei Tierkategorien mit mehreren Umtrieben
- N-Ausscheidung der GRUD korrigiert basierend auf Fütterung und Milchleistung (Mittelwert pro Tierkategorie und Betriebsklasse)
- N-Ausscheidung abzüglich der N-Emissionen in die Luft
- Unterscheidung der N- und P-Zufuhr zwischen Weide und Hofdüngerausbringung

Im Weiteren wird bei Methodik B zusätzlich die Abgabe von Hof- und Recyclingdüngern an andere Betriebe sowie der Einsatz von landwirtschaftsexternen Recyclingdüngern (Auswertung der HODUFLU-Daten) berücksichtigt und es wird auch die regionale Verschiebung von gesömmerten Tieren berücksichtigt. Diese zwei Aspekte werden nachfolgend erläutert.

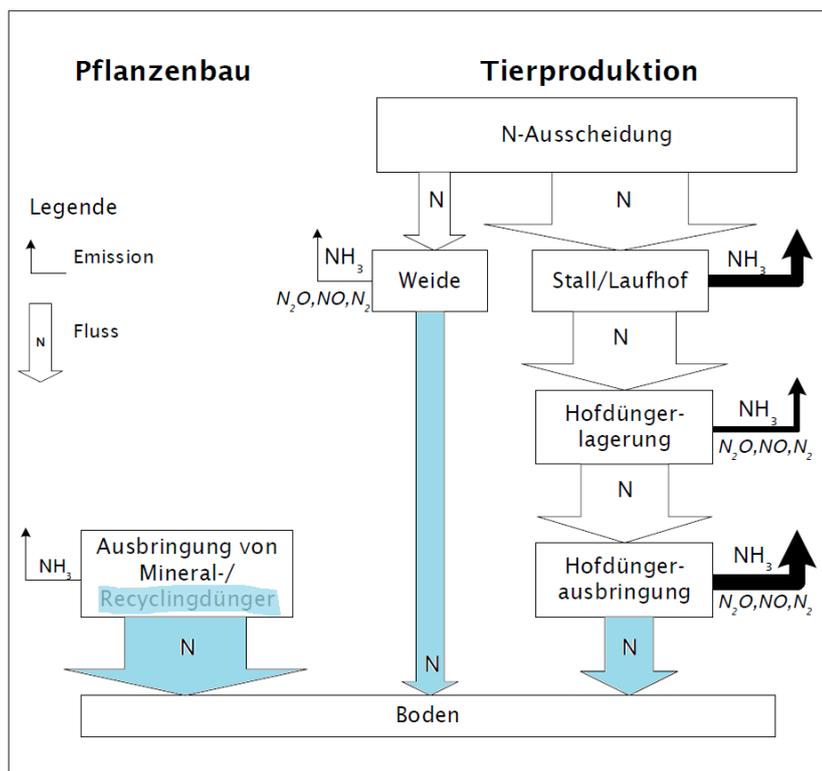


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Stickstoffflussmodells, das dem Modell Agrammon zugrunde liegt (Kupper et al., 2018). Die blau markierten Pfeile sind die N-Flüsse, welche für MODIFFUS verwendet werden (Mineraldünger konnte nicht berücksichtigt werden).

Tabelle 14: Übersicht der wichtigsten Parameter der Tierproduktion, welche im Modell Agrammon zur Berechnung der Emissionen verwendet werden (Quelle: Kupper et al., 2018).

N-Ausscheidung	Weide	Stall	Laufhof	Lagerung	Ausbringung
Milchleistung (Milchkühe)	Anteil Tiere mit Weide	Aufstallung (Rindvieh, Schweine, Geflügel)	Anteil Tiere mit Auslauf	Emittierende Oberfläche des Güllelagers	Anteil Gülleausbringung mit emissionsmindernden Verfahren
Sommerfütterung (Milchkühe)	Weidetage pro Jahr	Anzahl belegter Tierplätze in Laufställen (Rindvieh)	Auslauf-tage pro Jahr	Abdeckung des Güllelagers	Verdünnung der Gülle
Winterfütterung (Milchkühe)	Weidestunden pro Tag	Emissionsmindernde Massnahmen (Rindvieh, Schweine)*	Auslauf-stunden pro Tag	Häufigkeit des Auf-rührens des Güllela-gers	Mittlere Ausbringungsmenge von Gülle pro Gabe
Kraftfuttermenge (Milchkühe)		Abluftreinigung (Schweine, Geflügel)*	Laufhof-typ: Beschaffen-heit des Bodens, Weide als Auslauf (Rindvieh)	Anteil von direkt aus-gebrachtem Mist (Rindvieh, Schweine, Geflügel)	Anteil Gülleausbringung nach 18 Uhr
Gehalt an Rohprotein und verdauliche Energie der Rationen (Schweine)		Entmistungsintervall Geflügelställe		Anteil von gedeckt ge-lagertem Mist*	Anteil Gülleausbringung an heissen Tagen
		Tränkesystem für Geflügel			Einarbeitung von Mist nach dem Ausbringen
					Ausbringanteil Sommer und Frühjahr/Herbst

2.1.7.3 Verschiebungen von Nährstoffen wegen Sömmerung

Die N- und P-Zufuhr durch Tiere, welche gesömmert wurden, wurde auch seitens Meteotest berechnet (Rihm & Künzle, 2023). Rihm & Künzle (2019; 2023) verwendeten hierfür BFS-Daten zur Anzahl gesömmelter Rinder, Equiden, Schafe und Ziegen und ergänzten diese mit BAFU-Daten zur Anzahl Alpschweine, welche auf einer Umfrage des Schweizerischen Alpwirtschaftlichen Verbandes beruhen. Die N- und P-Zufuhr pro abgebenden Betrieb wurde mit der Annahme, dass alle Tiere 100 Tage lang gesömmert werden, nach dem gleichen Prinzip wie oben beschrieben (2.1.7.2 Berechnung Methodik B), berechnet. Diese N- und P-Zufuhr wurde den «abgebenden Betrieben» abgezogen. Da nicht bekannt ist, wo welche Tiere gesömmert werden, wurde die gesamte N- und P-Zufuhr der Tiere während der Sömmerungszeit auf die alpwirtschaftlichen Flächen der Arealstatistik verteilt. Die Verteilung wird gewichtet in drei Klassen vorgenommen und basiert auf der zu erwartenden Intensität der Nutzung. Ausser bei den Schafalpen wird diese Intensität einerseits aus BLW-Daten der Sömmerungsbetriebe abgeleitet und andererseits aus der Höhe der Nährstoffzufuhr aller abgebenden Betriebe innerhalb eines Radius von 8 km (Rihm & Künzle, 2019 & 2023). Tabelle 15 zeigt die Gewichtung sowie die jeweilige N- und P-Zufuhr für 2020; Abbildung 12 zeigt die räumliche Verteilung.

Tabelle 15: N- und P-Zufuhr während der Sömmerung nach Gewichtung verschiedener Kategorien der Arealstatistik.

Grundkategorien der Arealstatistik	Gewichtung	kt N	kt P
Schafalpen (49)		0.22	0.05
Alpwiesen (45)	tiefere Intensität	0.66	0.21
Günstige Alp- und Juraweiden (46)			
Verbuschte Alp- und Juraweiden (47)	höhere Intensität	1.00	0.87
Versteinte Alp- und Juraweiden (48)			
Total		5.09	1.13

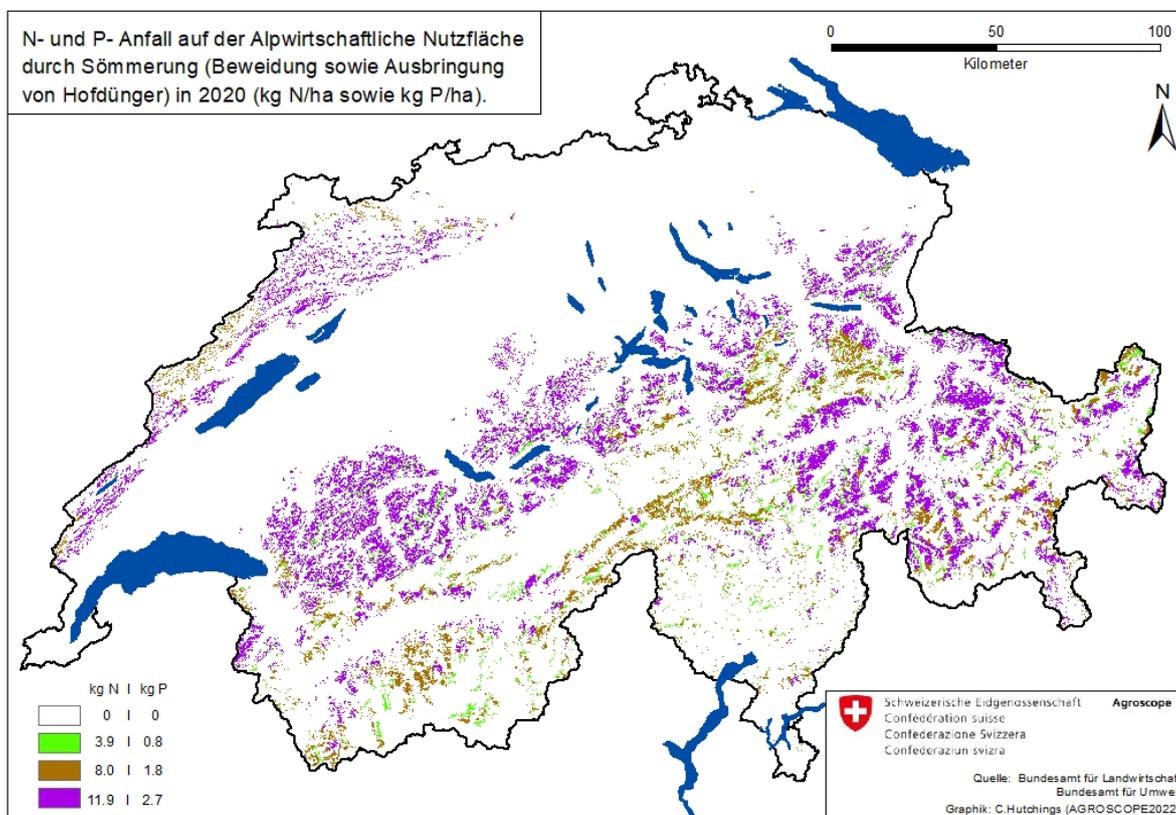


Abbildung 12: N- und P-Zufuhr auf die alpwirtschaftliche Nutzfläche durch die gesömmerten Tiere (Beweidung sowie Ausbringung von Hofdüngern) im Jahr 2020 (kg N/ha/Jahr sowie kg P/ha/Jahr).

2.1.7.4 Verschiebungen von Hof- und Recyclingdüngern wegen gesetzlicher Vorgaben

Alle Verschiebungen von Hof- und Recyclingdüngern zwischen Betrieben müssen in der Datenbank HODUFLU des BLW erfasst werden. Neben landwirtschaftlichen Betrieben sind auch Betreiber von gewerblich-industriellen Biogas- und Kompostierungsanlagen und Transportbetriebe bei der Annahme oder Abgabe von Hof- und Recyclingdüngern sowie Ernterückständen beteiligt. Im Jahr 2020 haben insgesamt 21'601 Betriebe mindestens eine Lieferung erhalten oder abgegeben. 24 % der 21'601 Betriebe sind rein abgebende Betriebe, 65 % nehmen nur Produkte an und 11 % der Betriebe sind sowohl Abgeber wie auch Annehmer.

Die Daten aller Lieferungen des Jahres 2020 wurden seitens BLW (2020c) anonymisiert zur Verfügung gestellt, wobei die Postleitzahlen der abgebenden und der annehmenden Betriebe bekannt sind. In einem ersten Schritt konnten die Betriebe für jede Lieferung mittels diversen Filterungen nach Art der Produkte sowie des jeweiligen abgebenden oder annehmenden Betriebes einem der folgenden Typen zugeordnet werden: gewerbliche-industrielle Biogasanlage, landwirtschaftliche Biogasanlage, Kompostanlage, landwirtschaftlicher Betrieb sowie Transportbetrieb. Angaben in HODUFLU zu den verschobenen Mengen an N und P pro Lieferung (Menge x Gehalt) wurden übernommen. Die Gehaltswerte basieren auf der GRUD oder auf betriebsspezifischen Werten (Berechnungen, Laboranalysen). Kompost und Gärgut müssen – ausser bei kleinen Jahresmengen – mindestens vier Male auf ihren Nährstoffgehalt analysiert werden. Bei Ernterückständen und teils bei Kompost lagen in HODUFLU nur die Werte für N-verfügbar vor. Daher musste N-gesamt aus diesen Werten abgeleitet werden. Die Angabe in HODUFLU zu N-verfügbar der Ernterückstände ist ein Mittelwert unterschiedlichster Arten von Ernterückständen. Der Anteil an N-verfügbar an N-gesamt kann je nach Kultur zwischen 5 bis 95 % liegen. In Absprache mit Experten wurde die Annahme getroffen, dass 10 % des gesamten N pflanzenverfügbar ist. Bei Kompost wurde basierend auf Angaben in der Wegleitung zur Suisse-Bilanz ebenfalls mit 10 % gerechnet (BLW, 2018).

Die weitergehenden Berechnungen basieren auf der Methodik von Rihm & Künzle (2019; 2023), welche jedoch für MODIFFUS angepasst wurde und hier dementsprechend erläutert wird. Pro Postleitzahl wurden die N- und P-Mengen berechnet, die mit Hof- und Recyclingdüngern sowie Ernterückständen zwischen Landwirtschaftsbetrieben mit unterschiedlichen Postleitzahlen bzw. zwischen einem Landwirtschaftsbetrieb und einem Biogas-/Kompost-/Transportbetrieb verschoben wurden (Abb. 13 und 14). Sämtliche Abgaben und Annahmen wurden gegeneinander aufgerechnet und der Saldo ergab die Nettomenge. Falls mehr Nährstoffe auf die Landwirtschaftsbetriebe einer Postleitzahl zugeführt als weggeführt wurden, wurde dies mit einer positiven Zahl angegeben. Negative Zahlen bedeuten, dass mehr Nährstoffe weggeführt als zugeführt wurden.

Lieferungen von Hof- und Recyclingdüngern ins Ausland oder an Private wie Schrebergärten wurden (ausser im Kt. SG) der Landwirtschaft zugeschrieben. Grund dafür sind die anonymisierten Daten. Mit den anonymisierten Daten konnte nicht zwischen den kantonalen HODUFLU-Betriebsnummern, unter denen solche Lieferungen in HODUFLU meist registriert werden, und einem landwirtschaftlichen Betrieb unterschieden werden. Weiterhin gab es Probleme mit Landwirtschaftsbetrieben, welche auch eine Biogasanlage betreiben. Zum Teil werden solche Betriebe als zwei Betriebe in HODUFLU erfasst, zum Teil nur als ein Betrieb. Letzterer Fall sowie auch generell die nicht eindeutige bzw. eventuell falsche Betriebszuweisung (z. B. Schrebergärten) sind jedoch höchstwahrscheinlich Einzelfälle. Solche Fälle können jedoch fälschlicherweise zu sehr hohen Netto-N- bzw. P-Werten einer Postleitzahl führen. Daher wurde in Absprache mit Experten ein maximaler Netto-N- bzw. -P-Wert pro Postleitzahl festgelegt. Bei Werten über 125 kg N oder 35 kg P pro ha LN sowie über 20'000 kg N wurde der Netto-N- und/oder -P-Wert auf 125 kg N/ha oder 35 kg P/ha festgelegt.

Die HODUFLU-Daten geben in den MODIFFUS-Berechnungen einerseits Auskunft über die Höhe des Inputs von Recyclingdüngern, andererseits dienen sie der Korrektur der Hofdüngerausbringung. Die Berechnung pro Postleitzahl bezieht sich auf die Postleitzahl des Betriebes und dementsprechend nicht zwingend auf jene Flächen, wo N und P auch tatsächlich ausgebracht wurden. Da die Postleitzahlen relativ kleinräumige Gebiete umfassen und unter der Annahme, dass die Ausbringung in einem etwas grösseren Radius um die Postleitzahl erfolgt, wurde mittels GIS density Funktion der Mittelwert über einen 4 km Radius berechnet (Rihm & Künzle, 2019; 2023).

Für die Berechnung der verschobenen N- und P-Mengen (Tab. 16) wurden die Lieferungen von und an Transportbetriebe den ursprünglichen Abgeber/innen und Abnehmer/innen zugeschrieben (dies hat keine Auswirkung auf die Nettomengen schweizweit oder pro PLZ). Die Lieferungen von Transportbetrieben an landwirtschaftliche Betriebe konnten auf Grund der Art der Produkte dem ursprünglich abgebenden Betrieb zugeschrieben werden. Abgaben von

Hofdüngern der landwirtschaftlichen Betriebe an Transportbetriebe konnten aufgrund der Hofdüngermenge, welche die Transportbetriebe abgeben, anteilmässig dem endgültigen Abnehmenden zugeschrieben werden. Insgesamt wurden schweizweit somit rund 8'500 t N und 1900 t P als Hofdünger im Jahr 2020 in Regionen mit anderer Postleitzahl oder in Biogas- oder Kompostbetriebe verschoben (etwa 8 % des Hofdüngeranfalls) sowie rund 6500 t N und 1200 t P mit Recyclingdüngern ausgebracht.

Unsere Auswertungsergebnisse der HODUFLU-Daten stimmen von der Grössenordnung her gut mit den Berechnungen von Kupper et al. (2022) und Reutimann et al. (2022) überein. Kupper et al. (2022) berechneten den Input von Recyclingdüngern in die Landwirtschaft für 2020. Die Mengen an Gärgut aus industriell-gewerblichen Anlagen basieren bei Kupper et al. (2022) auf dem Treibhausgasinventar. Bei Gärgülle aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen wurde die Menge, die mit den N-Werten der GRUD verrechnet wurde, aus Daten von Ökostrom Schweiz abgeleitet und für Kompost wurde die N-Menge von Schleiss (2019) verwendet. Aus diesen Mengen wurde der lösliche Stickstoff gemäss Richner et al. (2017) berechnet. Um unsere Resultate mit jenen von Kupper et al. (2022) zu vergleichen, wurden letztere gemäss Richner et al. (2017) auf Gesamtstickstoff umgerechnet. Das Total an Recyclingdüngern stimmt mit 6526 t N sehr gut mit dem Wert aus HODUFLU überein. Zusätzlich zu den Recyclingdünger-Inputs in die Landwirtschaft haben Reutimann et al. (2022) auch die Mengen an Gesamtstickstoff, welcher von landwirtschaftlichen Betrieben an Biogas- und Kompostanlagen geht, für 2018 berechnet. Ihre Werte stimmen gut mit den Berechnungen aus HODUFLU überein (s. Tab. 16). Für Phosphor haben Mehr et al. (2018) für das Jahr 2015 berechnet, dass 1273 t P von Biogas- und Kompostanlagen an die Landwirtschaft gehen. Bei HODUFLU liegt dieser Wert bei 1176 t P.

Tabelle 16: Nettomengen an N und P in den verschobenen Hof- und Recyclingdüngern sowie Ernterückständen im Jahr 2020 berechnet mit den HODUFLU-Daten sowie gemäss Reutimann et al. (2022) und Kupper et al. (2022).

Art der Verschiebung	Produkt	HODUFLU		Reutimann	Kupper
		t P	t N	t N	t N
Landwirt/in an Landwirt/in mit anderer PLZ	Total	1'176	5'217		
	Ernterückstände	0	0		
	Gülle	740	3'666		
	Mist	437	1'550		
Landwirt/in an Biogas-/Kompost Anlage	Total	759	3'296	2'933	
	Ernterückstände	3	215	33	
	Gülle	283	1'418	2'900	
	Mist	473	1'664		
Biogas-/Kompost Anlage an Landwirt/in	Total	1'176	6'454	5'100	6'526
	Gewerbliche Biogasanlage	422	2'373	1'900	3'384
	Festes Gärgut	83	417	400	1'620
	Flüssiges Gärgut	336	1'937	1'500	1'764
	Gärgut	3	19		
	Landwirtschaftliche Biogasanlage	453	2'565	2'600	1392*
	Gärdünngülle	124	760	300	
	Gärgülle	302	1'704	2'200	1'392
	Gärmist	27	100	100	
	Kompostieranlage	301	1'516	600	1'750
	Kompost	301	1'516	600	1'750

* Material nicht-landwirtschaftlicher Herkunft nach der Vergärung.

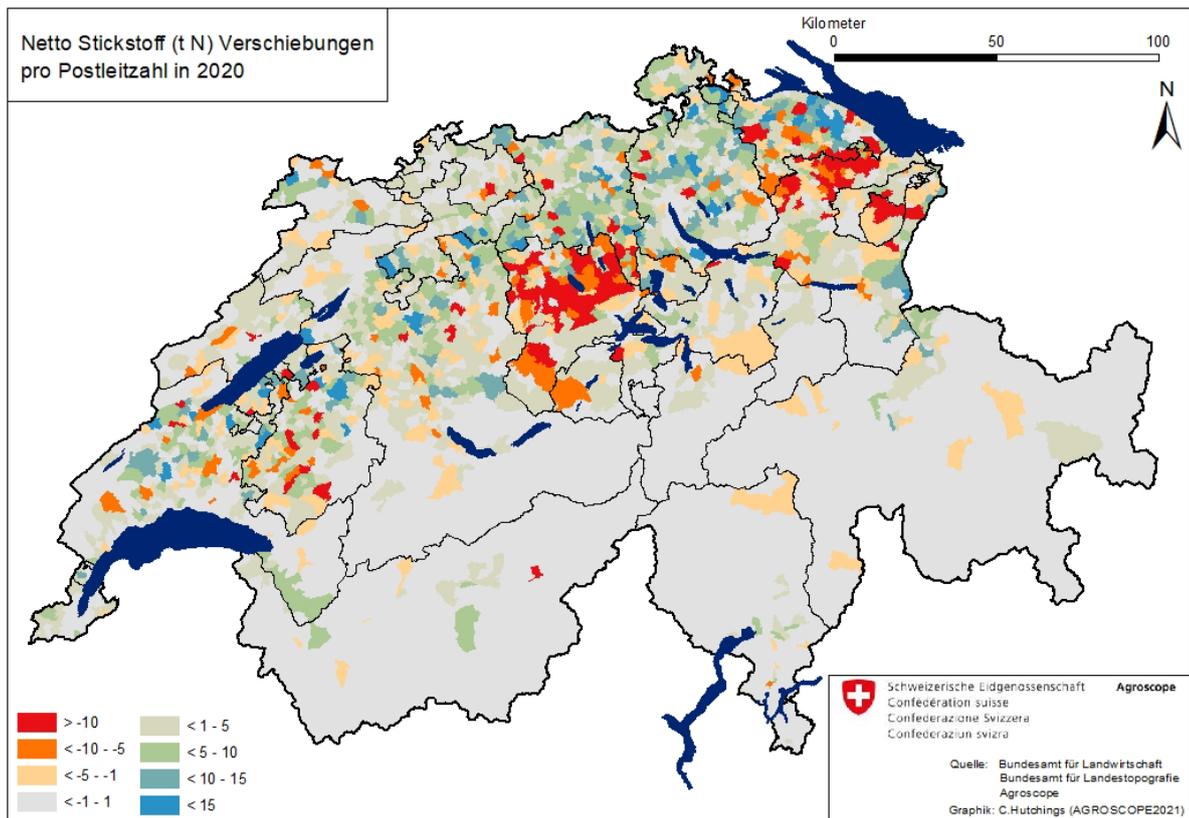


Abbildung 13: Nettomengen an N in den verschobenen Hof- und Recyclingdüngern sowie Ernterückständen pro Postleitzahl im Jahr 2020 (in t N; Nettomenge = gesamte Abgaben minus gesamte Annahmen).

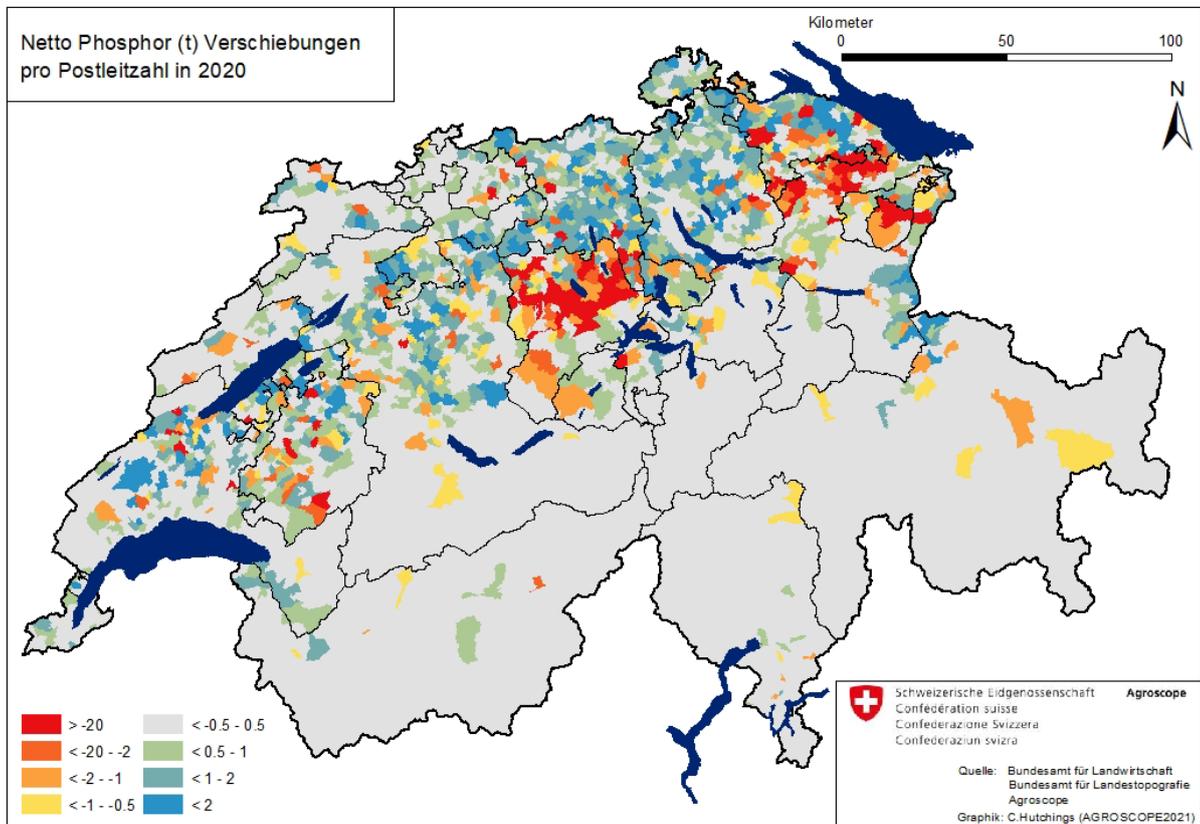


Abbildung 14: Nettomengen an P in den verschobenen Hof- und Recyclingdüngern sowie Ernterückständen pro Postleitzahl im Jahr 2020 (in t P; Nettomenge = gesamte Abgaben minus gesamte Annahmen).

2.1.7.5 Anzahl Tiere – Vergleich zwischen 2010 und 2020 sowie zwischen Methodik A und B

Die Anzahl Nutztiere hat für alle Kategorien mit Ausnahme des Nutzgeflügels zwischen 2010 und 2020 abgenommen (Tab. 17). Mit gut 75 % trägt das Rindvieh anteilmässig am meisten zum gesamten N- und P-Anfall bei, gefolgt von den Schweinen (rund 12 %) und dem Nutzgeflügel (knapp 6 %) (Tab. 18).

Bei Methodik A haben hat das Rindvieh um 7 % und die Schweine um 14 % abgenommen, während die Tierzahlen beim Nutzgeflügel um 40 % zugenommen haben. Die Differenz zwischen den Jahren 2010 und 2020 ist in dieser Grössenordnung auch bei Methodik B zu sehen.

In Methodik A und B wird, wie bereits erläutert, die Anzahl Tiere basierend auf dem Stichtag verwendet. Bei Methodik B wird jedoch die Anzahl bei Tierkategorien mit mehreren Umtrieben (z. B. Mastschweine) mittels einem Faktor korrigiert, sodass Methodik B bei diesen Tierkategorien die Anzahl der effektiven Tiere im Schnitt pro Jahr besser abbildet. Weiterhin werden etwas andere bzw. mehr der vorhandenen Tierkategorien (Codes) des BFS (2013 & 20220b) verwendet. Diese methodischen Differenzen zeigen sich beim Vergleich der Tierzahlen für 2020: 33'000 Rinder (2.2 %), 100'000 Schweine (9 %), sowie 2.5 Millionen Nutzgeflügel (21 %) sind 2020 mehr erfasst worden. Abgesehen von den «anderen Raufutter verzehrenden Nutztieren» (welche in Methodik B nicht verwendet werden, aber auch nur 0.3 % des gesamten Hofdüngeranfalles ausmachen), sind für alle Tierkategorien mehr Tiere erfasst worden.

2.1.7.6 Berechnung der N- und P-Zufuhr nach Methodik A – Vergleich zwischen 2010 und 2020

Die Nährstoffzufuhr über die Hofdünger entspricht bei Methodik A dem Hofdüngeranfall und liegt für 2020 bei 127 kt N und 20 kt P. Dies ist im Vergleich zu 2010 eine Abnahme bei N um 3 % und bei P um 7 %. Da Rinder zusammen mit den Schweinen mit knapp 90 % am meisten zum gesamten Nährstoffanfall beitragen, ist die Abnahme des Hofdüngeranfalls in erste Linie auf die Reduktion der Anzahl Schweine (14 %) und Rinder (7 %) zurückzuführen. Teilweise hängt diese Abnahme aber auch mit den angepassten N- und P-Ausscheidungswerten der GRUD (Richner et al., 2017) im Vergleich zur GRUDAF (Flisch et al., 2009) zusammen, welches sich vor allem in der unterschiedlich grossen prozentuellen Abnahme des Hofdüngeranfalls von N und P zeigt. Tabelle A3 im Anhang B zeigt die Nährstoffausscheidung pro Tierkategorie nach GRUD/GRUDAF, die Anzahl Tiere sowie den Anteil an der übergeordneten Tierkategorie (%) sowie den Hofdüngeranfall (N und P) jeweils für 2010, 2020 und die prozentuale Änderung zwischen 2010 und 2020.

Bei der Anzahl Tiere machen beim Rindvieh die Milchkühe mit knapp 40 % den grössten Anteil aus, gefolgt von den Aufzuchtrindern (33 %) (siehe Anhang B). Bei Letzteren ist die Abnahme der Anzahl Tiere um 13 % ausschlaggebend für die Abnahme des Nährstoffanfalls, da die Nährstoffausscheidung bei N unverändert ist und bei P (im Schnitt über die Alterskategorien) leicht zunimmt. Die Anzahl Milchkühe hat um 8 % abgenommen und neu ist in der GRUD (Richner et al., 2017) die Nährstoffausscheidung für eine Milchkuh von 7500 kg anstelle von 6500 kg bei GRUDAF (Flisch et al., 2009) angegeben. Die Nährstoffausscheidung pro Tiereinheit nimmt für N um 3 %, bei P um 6 % ab. Dies trägt dazu bei, dass die prozentuale Abnahme des Nährstoffanfalls bei N auch geringer ist im Vergleich zu P. Bei den Schweinen sind 64 % dieser Kategorien Mastschweine. Hier ist die N-Ausscheidung pro Tier unverändert geblieben während die P-Ausscheidung um 8 % abgenommen hat. Dementsprechend ist auch hier wiederum die prozentuale Abnahme des gesamten P-Anfalls höher als bei N. Nach den Rindern und Schweinen machen Nutzgeflügel noch gut 5 % des gesamten N- und P-Anfalls aus. Bei dieser Kategorie hat die Anzahl Tiere gesamthaft um knapp 30 % zugenommen. Mastpoulets machen 60 % und Legehennen 26 % dieser Tierkategorie aus. Da bei den Legehennen die Ausscheidungswerte unverändert sind und bei Mastpoulet die P Ausscheidungswerte bei N um 20 % bei P um 14 % abgenommen haben, nimmt der Hofdüngeranfall bei N um knapp 30 % zu und bei P um 38 % zu.

Tabelle 17: Vergleich der Anzahl Tiere zwischen 2010 und 2020 verwendet für Methodik A sowie B. Detaillierte Aufschlüsselung der Tierkategorien im Anhang B, Tabelle A2.

	Methodik A				Methodik B				Vergleich Methodik A und B für 2020	
	2010	2020	Differenz	%	2010	2020	Differenz	%	Differenz	%
Rindvieh	1'591'233	1'481'941	-109'292	-6.9	1'591'234	1'515'123	-76'111	-4.8	33'182	2.2
Pferde	59'101	46'980	-12'121	-20.5	62'113	46'980	-15'133	-24.4	0	0.0
Schafe und Ziegen	277'041	256'210	-20'831	-7.5	295'279	280'437	-14'842	-5.0	24'227	9.5
andere Raufutter verzehrende Nutztiere	17'682	20'139	2'457	13.9	-	-	-	-	-20'139	-
Schweine	1'282'320	1'102'364	-179'956	-14.0	1'443'796	1'202'406	-241'390	-16.7	100'042	9.1
Nutzgeflügel	9'001'750	12'517'033	3'515'283	39.1	10'605'441	15'175'407	4'569'966	43.1	2'658'374	21.2
übriges Geflügel (nur Strausse Methodik A)	979	568	-411	-42.0	23'153	24'011	858	3.7	23'443	4127.3
Ponys, Kleinpferde, Esel, Maultiere	-	-	-	-	20'407	33'092	12'685	62.2	33'092	-

Tabelle 18: Vergleich N- und P-Anfall in Hofdüngern schweizweit zwischen 2010 und 2020 (Methodik A). Detaillierte Aufschlüsselung der Tierkategorien im Anhang B, Tabelle A2.

	kt N					kt P				
	2010	2020	% Total-N 2020	Differenz	%	2010	2020	% total P 2020	Differenz	%
Rindvieh	104.5	100.8	78.9	-3.7	-3.5	16.2	14.9	74.2	-1.3	-8.0
Pferde	2.6	2.1	1.6	-0.6	-21.9	0.6	0.5	2.3	-0.1	-22.8
Schafe + Ziegen	3.6	4.6	3.6	1.0	28.5	0.6	0.7	3.4	0.1	17.1
andere Raufutter verzehrende Nutztiere	0.4	0.4	0.3	0.1	17.8	0.1	0.1	0.3	0.0	16.5
Schweine	15.5	13.7	10.7	-1.8	-11.6	3.2	2.6	13.2	-0.6	-17.7
Nutzgeflügel	4.8	6.2	4.9	1.4	29.8	1.0	1.3	6.6	0.4	37.8
Total	131.3	127.8	100	-3.5	-2.7	21.6	20.0	100	-1.6	-7.4

2.1.7.7 N- und P-Zufuhr 2020 – Vergleich zwischen Methodik A und Methodik B

Mit Methodik B fallen nach Abzug der Stall-, Lagerungs- und Ausbringungsverluste für das Jahr 2020 gesamthaft 87 kt N sowie 24 kt P an (Tab. 19). Rund 75 % davon ist auf die Ausbringung von Hof- und Recyclingdüngern zurückzuführen. Da insgesamt weniger N und P von landwirtschaftlichen Betrieben an die Biogas- und Kompostierungsanlagen geliefert wird, als in Form von Recyclingdüngern an die landwirtschaftlichen Betriebe zurückgeht, gibt es einen Nettoimport von ausserhalb der Landwirtschaft (Kompost und in Biogasanlagen vergärte Co-Substrate), welcher bei N 5 % und bei P 2 % zu den ausgebrachten Hof- und Recyclingdüngern beiträgt.

Tabelle 19: N- und P-Zufuhr im Jahr 2020 berechnet nach Methodik B.

	kt N	kt P	Anteil (%) am N-Total	Anteil (%) am P-Total
Ausbringung von Hof- und Recyclingdüngern	62.4	18.0	71.6	76.3
davon Nettoimport an Recyclingdüngern	3.0	0.4		
Beweidung auf LN	19.7	4.4	22.6	18.9
Nährstoffzufuhr durch die gesömmerten Tiere (Beweidung + Ausbringung Hofdünger)	5.1	1.1	5.8	4.8
Total	87.2	23.5	100%	100%

Im Vergleich zu den berechneten 128 kt N und 20 kt P der Methodik A für das Jahr 2020, liegt die N-Zufuhr bei Methodik B um 32 % tiefer, während die P Zufuhr um 17.5 % höher ausfällt (Tab. 20). Die höhere P-Zufuhr beruht teilweise auf dem Nettoimport von ausserhalb der Landwirtschaft von 0.37 kt P, welcher zu 10 % der Zunahme führt. Da beide Methoden die P-Ausscheidungswerte pro Tierkategorie der GRUD verwenden, sind die restlichen gut 90 % Zunahme aufgrund der höheren Anzahl Tiere bzw. der Methodik, um sie zu berechnen (Gründe hierfür wurden bereits in Kapitel 2.1.7.2 sowie 2.1.7.5 diskutiert), zurückzuführen. Bei der Berechnung der N-Zufuhr wurden grössere methodische Veränderungen vorgenommen und daher kann die Abweichung nicht eindeutig einzelnen Veränderungen zugeschrieben werden. Jedoch gehen gemäss Rihm & Künzle (2023) rund 40 kt N in Form von gasförmigen Verlusten (v.a. Ammoniak; s. Abb. 11) nach der Ausscheidung verloren. Dementsprechend scheinen die zum Teil tieferen N-Ausscheidungswerte (insbesondere bei den Schweinen, siehe Anhang B, Tabelle A3) die höhere Anzahl an Tieren zu kompensieren.

Tabelle 20: Vergleich der N- und P-Zufuhr (kt) zwischen 2010 und 2020 sowie zwischen den Methoden A und B.

	Methodik A		Methodik B	Vergleich zwischen Methodik A und B für 2020		Vergleich zwischen 2010 und 2020 (Me- thodik A)	
	2010	2020	2020	Differenz	%	Differenz	%
N	131.3	127.8	87.2	-40.6	-31.8	-3.5	-2.7
P	21.6	20.0	23.5	3.5	17.5	-1.5	-7.1

2.1.7.8 Verwendung der N- und P-Zufuhr in MODIFFUS: Verschnitt mit der Arealstatistik

Zusätzlich zu den Anpassungen der Berechnungsmethodik der N- und P-Zufuhr wurde die Methodik des Verschnitts mit der Arealstatistik angepasst. Im Jahr 2010 (Methodik A) wurde anhand der BFS-Daten (2013) zur Kulturartenverteilung die totale Fläche, welche beweidet oder gedüngt werden kann, pro Gemeinde berechnet. Die Nährstoffzufuhr wurde gemeindeweise durch diese Fläche dividiert. Dieser Durchschnittswert (kg pro ha) wurde anschliessend für folgende Flächen der Arealstatistik pro Gemeinde verwendet: (Gartenbau, Obstbau, Rebbau, Dauerwiesen, Heimweiden und Ackerland).

Bei Methodik B wurde, wie bereits in Kapitel 2.1.7.2 beschrieben, die N- und P-Zufuhr pro Betrieb berechnet. Die gesamte N- und P-Zufuhr aller Betriebe einer Gemeinde wurde auf die entsprechenden Flächen der Arealstatistik der Gemeinde verteilt, wobei zwischen Hof- und Recyclingdüngerausbringung und Weide unterschieden wurde. Hierfür wurde die Arealstatistik 2013/18 mit den 72 Grundkategorien verwendet und nicht die gröbere Einteilung nach MODIFFUS. Weiterhin wurden die jeweiligen Kategorien je nach Intensität der Hof- und Recyclingdüngerausbringung bzw. Beweidung unterschiedlich gewichtet (s. Tab. 21).

Tabelle 21: Fläche der jeweiligen Landnutzung nach Arealstatistik (2010/2020) sowie Gewichtung für die Verteilung der N- und P-Zufuhr.

Landnutzung Arealstatistik	Gewichtung		Flächen (ha)		
	Hof- und Recyclingdünger Ausbringung	Beweidung	2010	2020	Veränderung (%)
Ackerland	0.75	0	407'069	388'383	-4.6
Alpwiesen	0.25	0	27'980	26'635	-4.8
Günstige Alp- und Juraweiden	0.25	0.5	348'232	339'183	-2.6
Gartenbauflächen	0.5	0	4'525	4'629	2.3
Heimweiden	0.5	1	166'029	175'928	6.0
Verbuschte Wiesen und Heimweiden	0.25	0.25	2'077	2'054	-1.1
Obstanlagen	0.5		8'563	7'862	-8.2
Feldobst	0.75	0.25	22'177	19'920	-10.2
Rebbaufflächen	0.25	0	15'708	15'557	-1.0
Naturwiesen	1	0.25	341'661	334'806	-2.0
Total			1'344'021	1'314'957	-2.2

Da die N- und P-Zufuhr durch die gesömmerten Tiere separat berechnet wurde, ist bei den Klassen der Arealstatistik «Alpwiesen» sowie «günstige Alp- und Juraweiden» zu präzisieren, dass die Ausbringung von Hofdüngern sowie Beweidung nur ausserhalb der landwirtschaftlichen Zonengrenze Sömmerungsgebiet (BLW, 2022a) mit 0.25 gewichtet wurden. Somit entspricht die N- und P-Zufuhr auf den alpwirtschaftlichen Nutzflächen gemäss Arealstatistik in der landwirtschaftlichen Zonengrenze Sömmerungsgebiet nur der Zufuhr durch die gemeldeten gesömmerten Tiere. Auf den alpwirtschaftlichen Nutzflächen (Arealstatistik) ausserhalb des Sömmerungsgebietes entspricht die N- und P-Zufuhr der Anzahl Tiere der Gemeinde (gewichtet verteilt nach Tab. 21) plus der Nährstoffzufuhr durch die gesömmerten Tiere. Weiterhin gilt bei Biotopen von nationaler Bedeutung ein generelles Düngeverbot (BAFU & BLW, 2012). Daher haben Rihm & Künzle (2023) alle Flächen der Arealstatistik, welche innerhalb eines Objektes des Bundesinventare Hochmoore, Flachmoore und Trockenwiesen (inkl. Anhang 2) liegen, von der Verteilung von Hof- und Recyclingdüngern ausgeschlossen.

Insgesamt hat die Fläche, auf der Hof- und Recyclingdünger ausgebracht wurde und/oder die beweidet wurde, gemäss Arealstatistik von 2010 zu 2020 um gut 2 % abgenommen. Die Heimweiden, welche am intensivsten genutzt werden, haben jedoch um 6 % zugenommen. Dieser gesamten Flächenabnahme von 2 % steht eine Abnahme der Nährstoffzufuhr um 7 % für P bzw. 3 % für N (Methodik A) gegenüber. Schweizweit auf alle düngbaren Flächen gemäss Arealstatistik bezogen hat dementsprechend die N- und P-Zufuhr pro ha geringfügig abgenommen. Dies kann, wie im Kapitel 2.1.7.6 beschrieben, einer realen Abnahme der Anzahl Schweine und Rinder sowie den angepassten Ausscheidungswerten zugeschrieben werden.

Methodisch bedingt hat die Nährstoffzufuhr jedoch bei N um gut 30 % abgenommen und bei P um 18 % zugenommen. Es kann davon ausgegangen werden, dass Methodik B insgesamt die Realität besser abbildet; insbesondere durch die Berücksichtigung der N- und P-Verschiebung von Hof- und Recyclingdüngern sowie durch die Sömmerung

von Tieren sind die regionalen Verhältnisse besser abgebildet. Auch schweizweit gesehen ist die N-Zufuhr in MODIFFUS 2010 wahrscheinlich relativ stark überschätzt, die P-Zufuhr unterschätzt worden. Weiterhin methodisch bedingt hat die Fläche, auf der Hof- und Recyclingdünger ausgebracht wurden und/oder die beweidet wurden von 969'775 ha auf 1'283'277 ha um 30 % zugenommen (s. Tabelle 22). In MODIFFUS 2020 wurden nicht mehr die BLW-Daten zur Kulturlandverteilung, sondern direkt die Arealstatistik verwendet. Die Fläche, auf der Hof- und Recyclingdünger ausgebracht wurden und/oder die beweidet wurden, beinhaltet neu z. B. auch die alpwirtschaftliche Nutzfläche. Daher werden in Methodik B auch nicht mehr alle Flächen gleich gewichtet. Der Vergleich die Nährstoffzufuhr pro Flächeneinheit zwischen den Methoden (Tab. 22) zeigt, dass die Veränderung der Fläche bereits zu einer 25 %igen Abnahme der Nährstoffzufuhr pro ha führt. Tabelle 23 zeigt die flächenspezifische Zufuhr von N und P in kg pro ha für 2020. Da die düngbare Fläche für 2010 nicht gemäss Methodik B berechnet worden ist, ist ein direkter Vergleich zu MODIFFUS 2010 nicht möglich. Jedoch ist einzig bei Heimweiden und Dauerwiesen, welche insgesamt eine Gewichtung von über 1 haben, zu erwarten, dass die Summe der methodischen Veränderung zu einer leichten Zunahme der N- und P-Zufuhr pro ha führen kann. Abbildungen 15 und 16 zeigen die berechnete N- und P-Zufuhr durch Ausbringung von Hof- und Recyclingdüngern sowie Beweidung für 2020.

Insgesamt zeigt sich, dass die Grössenordnung der Veränderung der N- und P-Zufuhr pro ha aufgrund der methodischen Anpassungen viel höher liegen als jene der realen Veränderungen. Weiterhin wurden die Berechnung der N- und P-Zufuhr pro ha nur in Form eines Korrekturfaktors zur Regionalisierung der Abschwemmung sowie der Auswaschung in den MODIFFUS-Berechnungen verwendet. Die Umrechnung der N- und P-Zufuhr in einen Faktor wurde im Vergleich zu 2010 auch angepasst, sodass im Schnitt die Werte dieses Faktors tiefer liegen (s. Kapitel 2.2.3). Daher werden allfällige Veränderungen der Nährstoffeinträge auf Grund des Hofdüngereffektors allein den methodischen Veränderungen zugeschrieben.

Tabelle 22: Nährstoffzufuhr pro ha düngbare Fläche: Vergleich zwischen Methodik A und B. In grün: Die düngbare Fläche wurde mit Methodik A bzw. B berechnet, die Hofdüngerzufuhr immer mit Methodik A. In gelb: düngbare Fläche und Hofdüngerzufuhr wurden beide mit Methodik A bzw. B berechnet. Grüner Pfeil: Vergleich Methodik A und B für 2010. Gelber Pfeil: Vergleich Resultat MODIFFUS 2010 (Methodik A) mit MODIFFUS 2020 (Methodik B).

					Methodik der düngbaren Fläche				Vergleich zwischen				
					A		B		1. Methodik A und B (Fläche) mit Methodik A Hofdünger		2. Methodik A und B (Fläche sowie Hofdünger)		Vergleich
Methodik		N kt	P kt	Düngbare Fläche (ha)*	kg N/ha	kg P/ha	kg N/ha	kg P/ha	kg N/ha	kg P/ha	N %	P %	
A	2010	131.3	21.6	969'775	135.4	22.3	102.3	16.8	-33.1	-5.4	-24.4	-24.4	1
	2020	127.8	20.0	-	-	-	101.0	15.8					
B	2010	-	-	1'283'277	-	-	-	-					
	2020	87.2	23.5	1'265'815	-	-	68.9	18.6	-66.5	-3.7	-49.1	-16.6	2

*Methodik B flächengewichtet

Tabelle 23: Nutzungsspezifische totale und flächenspezifische Zufuhr von N und P im Jahr 2020.

Landnutzung Arealstatistik	Fläche (ha)	t N	t P	kg N/ha	kg P/ha	Anteil am total N (%)	Anteil am total P (%)
Heimweiden	175'863	20'203	5'014	114.9	28.5	23.2	21.3
Naturwiesen	334'652	31'858	8'633	95.2	25.8	36.5	36.7
Feldobst	19'913	1'806	505	90.7	25.4	2.1	2.1
Ackerland	388'006	25'559	7'598	65.9	19.6	29.3	32.3
Gartenbauflächen	4'617	189	55	41.0	12.0	0.2	0.2
Obstanlagen	7'861	305	89	38.8	11.3	0.3	0.4
Verbuschte Wiesen und Heimweiden	2'052	54	13	26.5	6.5	0.1	0.1
Alpwiesen	26'630	530	121	19.9	4.5	0.6	0.5
Günstige Alp- und Juraweiden	338'882	5'422	1'224	16.0	3.6	6.2	5.2
Rebbauf Flächen	15'516	196	54	12.6	3.5	0.2	0.2
Verbuschte Alp- und Juraweiden	51'392	539	120	10.5	2.3	0.6	0.5
Versteinte Alp- und Juraweiden	30'024	299	66	10.0	2.2	0.3	0.3
Schafalpen	55'927	223	49	4.0	0.9	0.3	0.2
Total	1'451'335	87'182	23'541	60.07	16.22	100.00	100.00

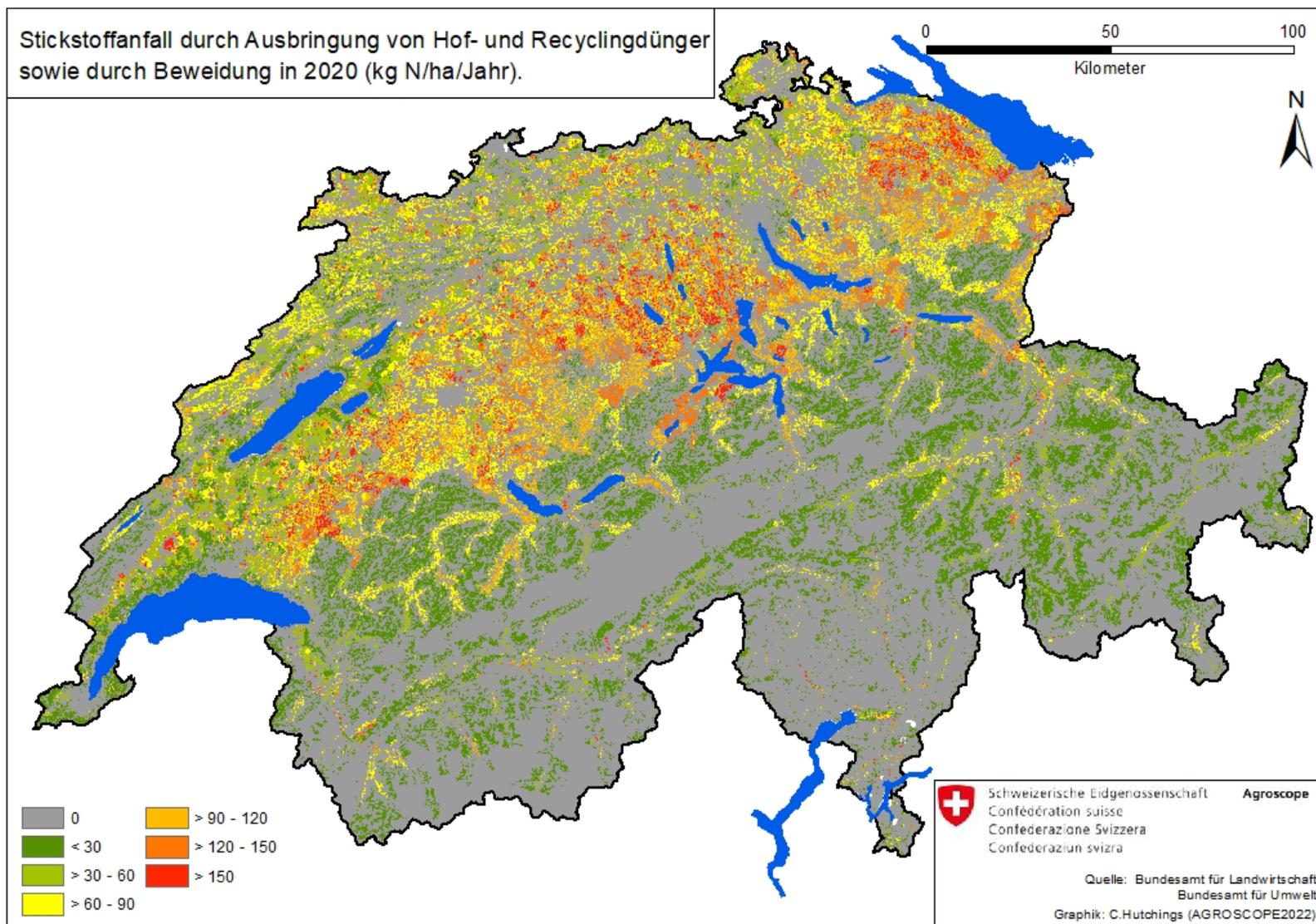


Abbildung 15: Stickstoffzufuhr durch Ausbringung von Hof- und Recyclingdünger sowie durch Beweidung 2020 (kg N/ha/Jahr).

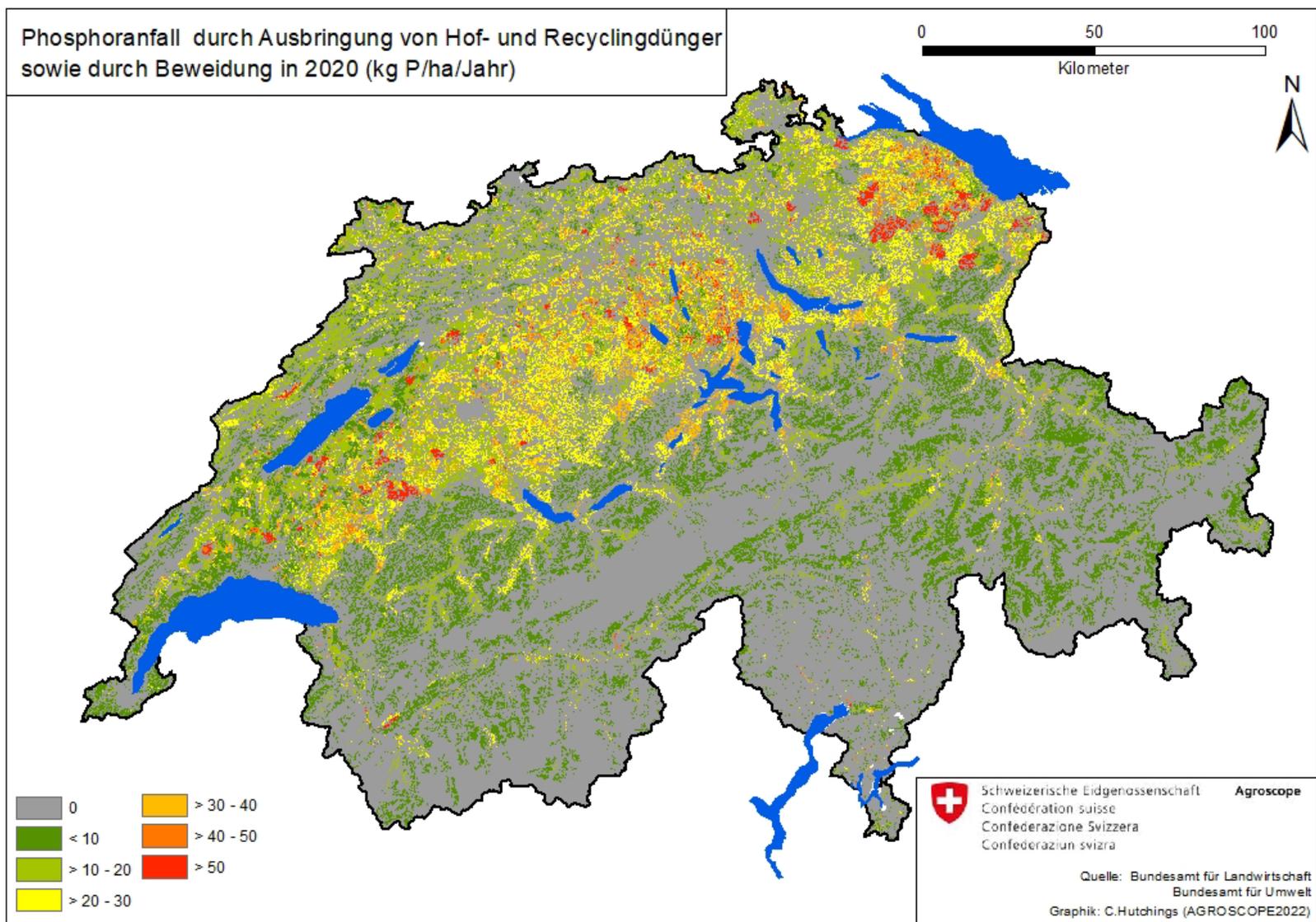


Abbildung 16: Phosphorzufuhr durch Ausbringung von Hof- und Recyclingdünger sowie durch Beweidung 2020 (kg P/ha/Jahr).

2.1.8 Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphor im Oberboden

Der P-Gehalt des Oberbodens hat einen Einfluss auf die Höhe der P-Abschwemmung, P-Auswaschung sowie P-Verluste durch Erosion. Zum Zeitpunkt der MODIFFUS-Berechnung 2010 lagen keine Daten zu P-Testzahlen auf gesamtschweizerischer Ebene vor, sodass ein gemeindespezifischer P-Testzahlfaktor in Abhängigkeit der Hofdüngermenge abgeleitet wurde. Für MODIFFUS 2020 liegen nun die Daten aller Bodenproben, welche im Rahmen des ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN) durchgeführt wurden, vor. Es handelt sich um die Resultate von Beprobungen zwischen 2010 und 2019. Aus diesen Daten lässt sich kein zeitlicher Trend im pflanzenverfügbaren P im Oberboden erkennen. Da der P-Gehalt sich im Boden nur langsam verändert, wurden die Daten aller Jahre verwendet.

Da der genaue Entnahmeort der Bodenproben nicht bekannt ist, wurde für MODIFFUS der Mittelwert des pflanzenverfügbaren P-Gehaltes (CO₂ oder H₂O₁₀ Methode) für jede Postleitzahl sowie Kulturgruppe verwendet. Die Angaben der Kulturgruppen des ÖLN wurden den Klassen der Arealstatistik zugewiesen (Tab. 24).

Tabelle 24: Kulturgruppen mit Daten des pflanzenverfügbarem P im Oberboden.

Klasse Arealstatistik	Kulturgruppe ÖLN	Methode	Mittelwert* (mg P/kg Boden)
Ackerland	Ackerland	CO ₂	1.74
	Kunstwiese		
Weiden + Dauerwiesen	Grasland	CO ₂	1.78
			1.72
Reben	Reben	H ₂ O ₁₀	10.02

*Mittelwert für die Flächen der Arealstatistik, bei welchen ein Postleitzahlspezifischer Wert vorhanden ist

2.1.9 Einzugsgebiete

Für die abschliessende Ergebnisdarstellung wurden verschiedene hydrologische und administrative Ebenen zur Berechnung und Auswertung verwendet. Der Datensatz swissBOUNDARIES3D Swisstopo (2020a) wurde für die Kantons Grenzen verwendet.

Nach hydrologischen Einzugsgebieten wurden einerseits die River Basin Districts (RBD) ausgewertet (EEA, 2022) sowie das REZGUS (Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der grossen Seen), welches mittels der topographischen Teileinzugsgebiete 2 km² (BAFU, 2020c) erstellt wurde.

2.1.10 Gemessene Nährstoffkonzentration und Frachten in Oberflächengewässern und im Grundwasser

Für die Plausibilisierung der Berechnungsergebnisse wurden die berechneten Gesamt-N- sowie Gesamt-P- und gelösten P-Frachten ausgewählter Messstationen der Nationalen Daueruntersuchung Fliessgewässer (NADUF) für die Jahre 2010 bis 2021 – sofern für alle Jahre vorhanden – vom BAFU (2022b) zur Verfügung gestellt. Die Daten der Jahre 2019-2021 sind dabei noch provisorisch. Weiterhin wurden Daten zu den gemessenen Nitrat-Konzentrationen im Grundwasser der Nationalen Grundwasserbeobachtung (NAQUA) für die Jahre 2010 bis 2020 vom BAFU (2022c) geliefert.

2.1.11 Daten zu Nährstofffrachten aus Abwasserreinigungsanlagen (ARA) und Mischwasserentlastungen

Das vorliegende Projekt befasst sich ausschliesslich mit der Berechnung der diffusen Nährstoffeinträge in die Gewässer der Schweiz. Für eine Überprüfung der abgeschätzten diffusen Nährstoffeinträge mit gemessenen Nährstofffrachten an Flusspegeln ist aber eine Berücksichtigung der punktuellen Nährstoffeinträge aus ARA und Mischwasserentlastungen notwendig. Die Daten zu den Gesamt-N- und Gesamt-P-Einträgen der ARA sowie über die Mischwasserentlastungen wurden von Rebekka Gulde vom VSA (Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute), Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, vermittelt. Sie wurden unverändert übernommen. Die Daten wurden für jede ARA und Mischwasserentlastung mit entsprechenden geografischen Koordinaten geliefert, sodass eine exakte Zuteilung zu den verschiedenen hydrologischen Einzugsgebieten möglich war. Die Daten zu den ARA beruhen auf den neuesten Messdaten, allfällige Lücken in den Datensätzen wurden von der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) oder dem VSA aufgefüllt.

Die Daten zu den N-Frachten aus den ARA basieren auf den vom VSA (2022) erhobenen Kosten- und Leistungsdaten der Abwasserentsorgung. Diese wurde von Thomann et al. (2022) ergänzt und ausgewertet. Thomann et al. (2022) schreiben: «Die gesamte Ntot Ablauffracht lag im Jahr 2020 mit 22'200 t N/a um ca. 4% tiefer als in 2013 (23'000 t N/a gemäss (Strähl, et al., 2013)). Die gesamte Ntot Elimination steigerte sich somit von 45% auf 52% (Strähl, et al., 2013). Diese Steigerung ist wahrscheinlich auf den zwischenzeitlichen Ausbau und Zusammenschluss von ARA und auf die in der Studie von Strähl et al. (2013) etwas tiefer geschätzten Ntot Zulauffrachten zurückzuführen. Dass ARA zwischen 2013 und 2020 ausgebaut und oder zusammengeschlossen wurden ist unterem daran zu erkennen, dass sich die Anzahl ARA in den Grössenklassen >100'000 EWdim und 50'000-100'000 EWdim von 22 auf 30 bzw. von 43 (Strähl, et al., 2013) auf 50 erhöht hat.»

Die Daten zu den P-Frachten aus der ARA basieren ebenfalls auf VSA (2022). Lücken wurden von der VSA-Plattform ergänzt.

Die Daten zu den N- und P-Frachten aus Mischwasserentlastungen beruhen auf Abschätzungen der VSA-Plattform in Zusammenarbeit mit Lena Mutzner von der Eawag. Diese basieren auf einer Abschätzung des Abwasseranteils in Mischwasserentlastungen je Gemeinde gemäss Mutzner et al. (2016), den Daten zu den Einwohnerzahlen von 2021 und einer mittleren N- bzw. P-Fracht pro Einwohner. Ein Eintrag aus Mischwasserentlastungen wurde für jeden ARA-Standort und für Gemeinden ohne ARA für den geologisch tiefsten Punkt am grössten Fliessgewässer der Gemeinde angenommen und abgeschätzt. Da sich diese Methode von den in Hürdler et al. (2015) verwendeten Verfahren (konstanter Anteil Abwasser für alle Gemeinden) unterscheidet, ergeben sich methodisch bedingt grosse Unterschiede bei den abgeschätzten N- und P-Frachten aus Mischwasserentlastungen.

2.2 Berechnung mit MODIFFUS 3.1

Die Berechnung der N- und P-Einträge aus diffusen Quellen in die Gewässer erfolgte über das Geoinformationssystem ArcGIS 10.8 von Esri. Eine grundsätzliche Aufbereitung gewisser Grundlagendaten (z. B. Hofdüngeranfall, Verteilung intensiv, wenig intensiv und extensiv genutzter Dauerwiesenflächen) wurde mit dem Tabellenkalkulationsprogramm EXCEL (Microsoft) durchgeführt. Für jeden Grundlagendatensatz wurde ein schweizweites Hektarraster erstellt. Diese Rasterdatensätze wurden durch verschiedene Rechenoptionen und mit Hilfe von Toolboxen gemäss dem Berechnungsansatz von MODIFFUS 3.1 für jeden Eintragspfad in ArcGIS 10.8 verrechnet.

2.2.1 Modellkonzept

Nach Aufbereitung aller Grundlagendaten im Hektarraster wurde in einem ersten Schritt die Berechnung der verschiedenen Wasserflüsse (Oberflächenabfluss, Drainage- und Grundwasserabfluss) für die einzelnen Landnutzungskategorien gemacht (Abb. 17). Anschliessend wurde die rasterbezogene Berechnung der Stoffflüsse über die verschiedenen Eintragspfade vorgenommen. Die Ergebnisse wurden abschliessend über verschiedene Ansätze auf Plausibilität geprüft.

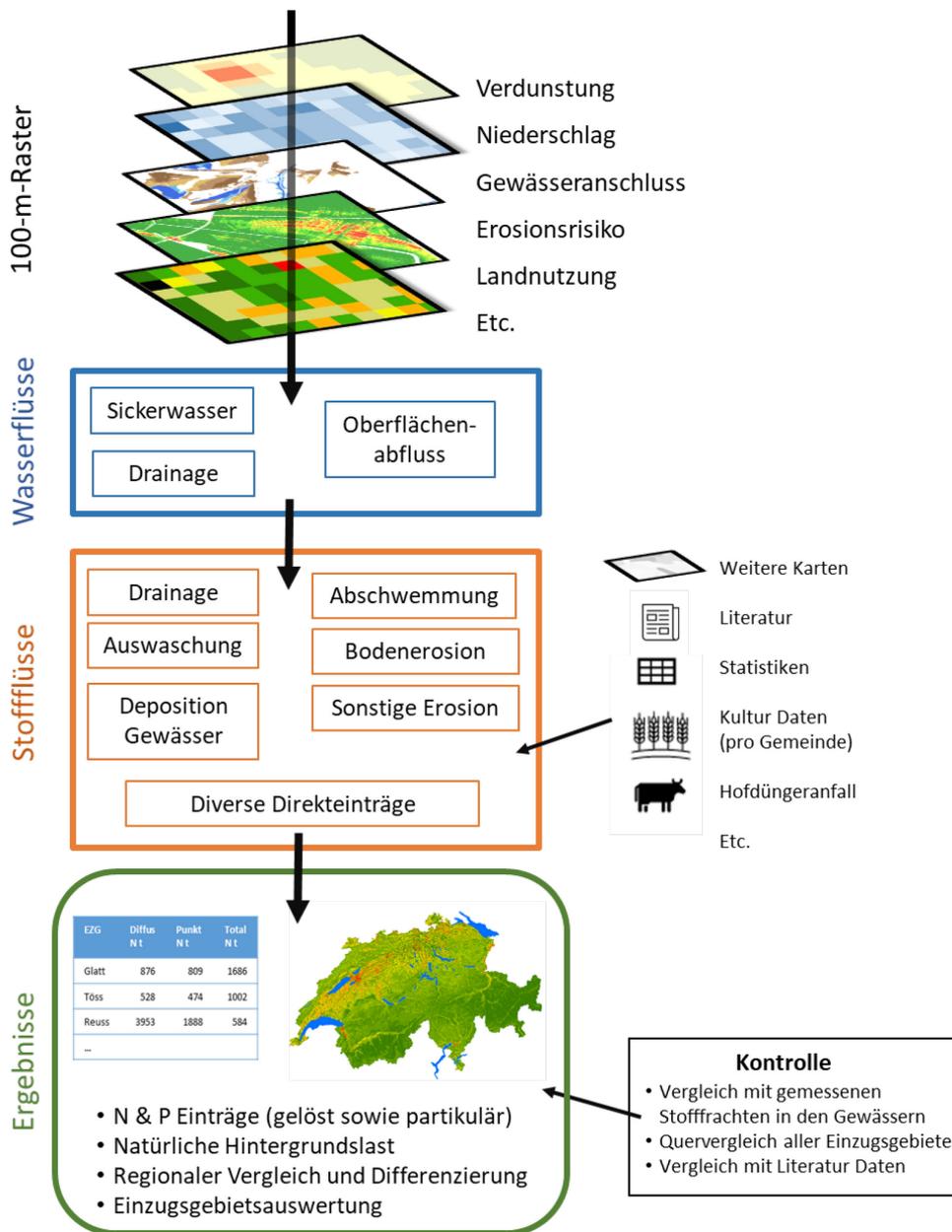


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Vorgehensweise der Berechnung der diffusen Stoffeinträge in die Gewässer der Schweiz mit MODIFFUS.

Fast alle Berechnungen wurden im GIS durchgeführt. Mit Hilfe einer geeigneten Struktur der GIS-Toolboxen und ArcGIS-Geodatenbanken wurden Eingangsdaten, Teilergebnisse und Endergebnisse differenziert bereitgehalten. Durch die zwischengeschalteten Berechnungsmodulen (z. B. eine Toolbox oder ein Modellwerkzeug pro Stoffflusspfad) wurden die Grundlagenraster mit Berechnungsfaktoren verrechnet. Diese anpassungsfähigen, eigenständigen Module können jederzeit angepasst werden, wodurch aktuelle Erkenntnisse der Wissenschaft jederzeit berücksichtigt werden können.

Die den Berechnungen der Wasser- und Stoffflüsse zugrundeliegenden Formeln, Algorithmen und Annahmen entsprechen in vielen Fällen den bisherigen Berechnungen von MODIFFUS 3.0 nach Hürdler et al. (2015) und wurden nur dann verändert, wenn begründete neue Erkenntnisse oder neue Grundlagendaten dies notwendig machten. Sie werden in den anschliessenden Kapiteln (2.2.2 & 2.2.3) jeweils auch kurz erläutert.

2.2.2 Berechnung der Wasserflüsse

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 erläutert, wurde in einem ersten Schritt der potentielle Abfluss aus der Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung (jeweils 30-Jähriger Mittelwert 1991 bis 2020) pro Rasterzelle berechnet. Der potentielle Abfluss wurde anschliessend aufgeteilt in Oberflächenabfluss, Drainageabfluss 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.

Je nach Landnutzung fliesst prinzipiell mehr oder weniger des gesamten potentiellen Abflusses oberflächlich ab. Daher wurden im ersten Schritt Annahmen zum prozentualen Anteil des Oberflächenabflusses am gesamten potentiellen Abfluss pro Landnutzungskategorie der Arealstatistik getroffen (s. Tabelle 25) und anhand dieser der Oberflächenabfluss pro Hektare berechnet. Bei den landwirtschaftlich genutzten Flächen, dem Siedlungsgrün und den unproduktiven Flächen fliesst nur ein geringer Teil (unter 10 %) oberflächlich ab. Bei den Strassen wurde zwischen innerorts und ausserorts unterschieden. Da bei Strassenflächen innerorts eine Versiegelung von 100 % angenommen wurde und die dabei anfallenden oberflächlichen Abflussmengen durch die Kanalisation (Mischkanalisation/Abwasserreinigungsanlagen bzw. mittels Trennkanalisation) den Oberflächengewässern direkt zugeführt werden, werden sie als punktuelle Einträge betrachtet. Für die Abflussberechnung fliesen sie aber mit einem Faktor von 100 % in die Berechnung ein. Bei Strassen ausserorts wurde in Anlehnung an Angaben aus der Literatur und der generellen Entwässerungsplanung (GEP) der Wert von Hürdler et al. (2015) bei 40 % Oberflächenabfluss festgelegt. Durch die Spritzwirkung vorbeifahrender Autos kommt es zu einer starken Verteilung von Wasser, welches sich auf der Strassenoberfläche befindet. Dieses kann nicht vollständig in die Kanalisation abgeführt werden und unterliegt somit der Versickerung. Weiterhin handelt es sich je nach Strassenbelag teils um nicht 100 % versiegelte Flächen. In Anlehnung an Prasuhn & Mohni (2003) wurde für MODIFFUS 2020 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 m ü. M. gibt. Die Unterscheidung anhand der Höhengrenze 1200 m ü. M. erfolgte basierend auf der Annahme steigender Niederschläge, sinkender Evapotranspiration, karger Böden und geringerer Vegetationsdichte mit zunehmender Höhe. Somit erfolgte die Parametrisierung des Oberflächenabflusswertes von 0 % für Wälder unterhalb der Grenze von 1200 Meter ü. M. und von 2 % oberhalb dieser Höhengrenze.

Tabelle 25: MODIFFUS-Landnutzungs-klassen und Anteil des Oberflächenabflusses an der potentiellen Abflussmenge.

MODIFFUS Landnutzungs-kategorie	Oberflächen-abflusswert in %
Ackerland	6.6
Alpwirtschaftliche Nutzfläche	5.5
Gartenbau	6.6
Heimweiden	7.7
Obstbau	6.6
Rebbau	6.6
Dauerwiesen	6.6
Siedlungsgrün	7.7
Strassen ausserorts	44
Strassen innerorts	100
Siedlung überbaut	100
unproduktive Vegetation	4.4
stehende Gewässer	100
fliessende Gewässer	100
Fels, Geröll, Sand	100
Gletscher	100
Wald <1200 m	0
Wald > 1200 m	2.2

Die Abflusswerte für die verschiedenen Landnutzungsklassen wurden von Hürdler et al. (2015) übernommen und – mit Ausnahme der Flächen mit 100 % Oberflächenabflusses – um 10 % erhöht. Gemäss dem vom BAFU (2021a) veröffentlichtem Bericht «Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer» hat die Intensität der höchsten Tagesniederschläge eines Jahres im Durchschnitt aller Messstationen in 100 Jahren um 10.4 % zugenommen. Weiterhin hat die Häufigkeit von Starkregenereignissen zugenommen. Für den Zeitraum 1961 bis 1990 wurden für jede Messstation die 100-jährlichen Tagesniederschläge berechnet. Die Häufigkeit der Intensivereignisse hat um 26.5 % in 100 Jahren zugenommen. Da bei stärkeren Niederschlägen prozentual weniger Wasser versickern kann, wurden die Anteile des Oberflächenabflusses um 10 % erhöht.

Im zweiten Schritt wurde, wie bei MODIFFUS 2010, die Gewässeranschlusskarte (GAK2, Abb. 4) verwendet, um die Wahrscheinlichkeit, dass das oberflächlich abfliessende Wasser auch ein Oberflächengewässer erreicht, zu berücksichtigen. Je nach Wahrscheinlichkeit gemäss Einstufung GAK2 wurden die prozentualen Werte angepasst bzw. bei mittlerer Wahrscheinlichkeit beibehalten (Tab. 26). Bei Ackerland beispielsweise liegt nach diesem zweiten Schritt der Anteil von Oberflächenabfluss am gesamten potentiellen Abfluss zwischen 4.95 % und 8.25 %. Auf Flächen, welche in die Klasse „0“ eingestuft wurden, wird kein Oberflächenabfluss erwartet, da hier die Hangneigung unter 2 % ist oder diese Flächen in den Wald oder ins Siedlungsgebiet entwässern. Auf Grund der räumlichen Begrenzung der GAK2 auf das Talgebiet bis zur Bergzone 2 wurde für die landwirtschaftlich genutzten Flächen in Teilen von Graubünden, besonders im Inntal, welche nur in der Bergzone 3 & 4 lokalisiert sind, ein mittlerer Gewässeranschluss pauschal angenommen.

Tabelle 26: Klassifizierung der Gewässeranschlusskarte (GAK2).

Gewässer-an-schlussklasse	Klassifizierung	Gewässer-an-schlussfaktor
0	Nicht	0
1	Niedrig	0.75
2	Mittel	1.00
3	Hoch	1.25

Im dritten Schritt wurde der Einfluss der Bodeneigenschaften auf den Oberflächenabfluss berücksichtigt. Hierfür wurde das Abschwemmungsrisiko der Böden (s. Kapitel 2.1.6.2) in die Berechnung des Oberflächenabflusses einbezogen. Die landwirtschaftlich genutzten Böden der Schweiz weisen hauptsächlich ein mässiges (Klasse 2) sowie mittel hohes (Klasse 3) Abschwemmungsrisiko auf (Abb. 18). Da die Grundlagendaten hierfür nur geringfügig angepasst wurden (s. Kapitel 2.1.6.2), unterscheidet sich diese Verteilung kaum von MODIFFUS 2010. Je nach Risikoklasse wurden die Anteile des Oberflächenabflusses angepasst (s. Tab. 27).

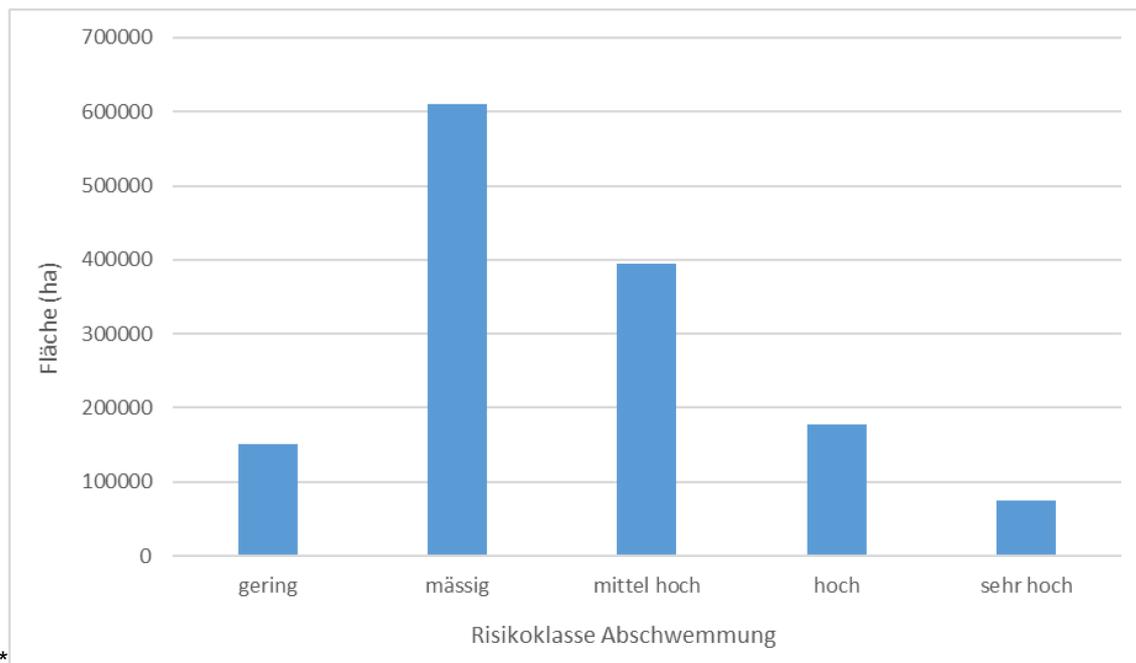


Abbildung 18: Verteilung des Abschwemmungsrisikos von Böden der landwirtschaftlich genutzten Fläche in der Schweiz.

Tabelle 27: Verteilung der Anpassungsfaktoren bezogen auf das Abschwemmungsrisiko.

Abschwemmungsrisikoklasse	Klassenbezeichnung	Anpassungsfaktor
1	gering	0.80
2	mässig	0.90
3	mässig hoch	1.00
4	hoch	1.10
5	sehr hoch	1.20

2.2.2.2 Drainageabfluss (Abfluss aus geschlossenen künstlichen Drainagen)

Der Drainageabfluss wurde für die drainierten Flächen gemäss neuer Drainagekarte (Abb. 2) berechnet. Wie bei Hürdler et al. (2015) basieren die Abflussmengen grundsätzlich auf den Literaturangaben in Prasuhn & Braun (1994), welche dann mittels einer linearen Beziehung in Abhängigkeit von der Sickerwassermenge pro Hektare modifiziert wurden.

Je höher die Menge des potentiellen Abflusses, welcher nicht oberflächlich abfließt, desto geringer ist der Anteil des versickernden Wassers, welches via Drainage abfließt. Dies unterliegt der Annahme, dass bei höherer Menge an versickerndem Wasser, weniger Wasser über die Drainage abfließen kann. Somit gelangen in den drainierten Gebieten zwischen 58 % und 86 % des Sickerwassers je Hektare 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. Weiterhin wird – wie bei MODIFFUS 2010 – die Sickerwassermenge aus der Differenz zwischen der potentiellen Abflussmenge und der Summe aus Oberflächenabfluss und Drainageabfluss berechnet.

2.2.2.4 Wasserflüsse der natürlichen Hintergrundlast

Bei der Berechnung der Wasserflüsse der natürlichen Hintergrundlast wurden für MODIFFUS 2020 die berechneten natürlichen Abflussmengen von Hürdler et al. (2015) übernommen. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da einerseits die natürliche Hintergrundlast theoretisch ein konstanter Wert sein sollte und andererseits, wie bereits in Kapitel 2.2.1

diskutiert, die klimatischen Änderungen grösstenteils anthropogen bedingt sind und sich folglich die natürlichen Abflussmengen auch nicht geändert haben sollten.

Die (anthropogenen) Wasserflüsse haben sich zwar im Vergleich zu MODIFFUS 2010 auch auf Grund von methodischen Anpassungen verändert. Angepasst wurde der betrachtete Zeitraum: statt einem 11-Jahre-Mittelwert wurde ein 30-Jahre-Mittelwert für Verdunstung und Niederschlag verwendet. Mit der Methodik von 2020 hätte der potentielle Abfluss für das Jahr 2010 bei 928 mm statt 942 mm betragen (s. Tab. 47). Dies entspricht aber nur einer Differenz von 1.5 %. Weiterhin gibt es auch natürlicherweise jährliche Schwankungen des Niederschlages und der Verdunstung. Es müsste ein natürlicher langjähriger Wert für Verdunstung und Niederschlag festgelegt werden. Dies ist jedoch schwierig, da jegliche natürliche Werte vor Messbeginn liegen und es in der Vergangenheit auch grössere natürliche klimatische Veränderung gegeben hat. Dementsprechend muss immer eine Auswahl des Zeitraums bestimmt werden. Da die Berechnung der natürlichen Wasserflüsse von vielen Unsicherheiten geprägt ist und seit der Berechnung für MODIFFUS 2010 keine weiteren neuen Grundlagen oder besseren Berechnungsmethoden vorhanden sind, wurden die Werte von 2010 übernommen.

2.2.3 Berechnung der Stoffflüsse

2.2.3.1 Atmosphärische Nährstoffdeposition auf die Gewässer

Bei der atmosphärischen Nährstoffdeposition auf die Gewässer wird die aus der Atmosphäre direkt auf die Gewässeroberfläche (Fliessgewässer sowie stehende Gewässer gemäss Arealstatistik) gelangende Menge abgeschätzt.

Stickstoffdeposition:

Für die Einträge per N-Deposition wurden die Daten der Stickstoffdeposition 2015 verwendet (s. Kap. 2.1.5).

Phosphordeposition:

Die Daten zu P-Konzentrationen im Niederschlag basieren auf Literaturwerten, die Prasuhn & Braun (1994) zusammengestellt haben. Diese Werte wurden von Hürdler et al. (2015) für 2010 um 10 % reduziert, da von verbesserten Anbaumethoden in der Landwirtschaft (Direktsaat, Winterbegrünung, etc.) mit weniger Staub und von verbesserten Filteranlagen aufgrund von Luftreinemassnahmen gerechnet wurde. Für die Berechnung des Jahres 2020 wurden die im Jahr 2010 verwendeten Werte erneut um 10 % reduziert (Tabelle 28). Es ist von einer weiteren Verringerung der Entwicklung von Staub in der Landwirtschaft auszugehen: Seit 2014 gibt es Ressourceneffizienzbeiträge für schonende Bodenbearbeitung (Direktsaat, Streifensaat, Mulchsaat). Die bodenschonend bearbeitete Fläche betrug im 2010 50'493 ha und nahm bis 2019 um etwa 75 % auf 87 594 ha zu (BLW, 2020a). Weiterhin haben beispielsweise die Feinstaub-Emissionen im Vergleich zu 2010 um 10 % abgenommen (Abb. 19). Wie bei MODIFFUS 2010 fällt die Deposition je nach biogeografischer Region unterschiedlich hoch aus. Die biogeografischen Regionen wurden seit 2010 angepasst. Neu wurde der 2001 erstellte Datensatz auf Grundlage der Wassereinzugsgebiete modifiziert. Diese Einteilung widerspiegelt die (bio-)geographische Realität besser als die bisher verwendeten Gemeindegrenzen (BAFU, 2020b).

Tabelle 28: Regionsspezifische Niederschlagskonzentration der P-Deposition.

Biogeografische Region	mg P/l
Alpine Regionen	0.0198
Voralpine Regionen	0.0261
Jura	0.0288
Mittelland	0.0324

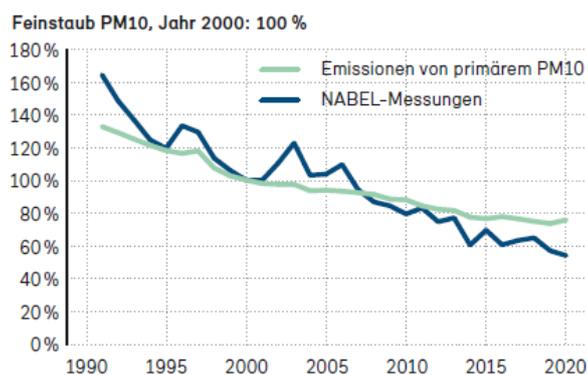


Abbildung 19: Entwicklung der im NABEL gemessenen Aussenluftkonzentration und der Emissionen von PM10. Nur die Emissionen von primärem PM10 wurden berücksichtigt (Quelle: BAFU, 2021b).

2.2.3.2 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 wie bei MODIFFUS 2010 eine mittlere P-Konzentration des Oberflächenabflusses pro Landnutzungskategorie verwendet. Es wurden die gleichen Werte, welche in Anlehnung an Werte aus der Literatur festgelegt wurden, verwendet (Tabelle 29). Einzig die Konzentrationen im Niederschlag wurden angepasst, wie bereits im vorherigen Kapitel 2.2.3.1 beschrieben. Die aufgeführten Mittelwerte wurden als Ausgangswerte pro Landnutzungskategorie flächendeckend für die ganze Schweiz verwendet und mit folgenden Korrekturfaktoren angepasst:

Phosphorausgangswert (mg P/l)

- x Niederschlagskonzentrationsfaktor
- x Hofdüngerfaktor
- x P-Testzahlfaktor

= Phosphorkonzentration (mg P/l)

Die Faktoren wurden mit den im Kapitel 2.1 erläuterten neuen Datengrundlagen berechnet, und teils wurde auch die Berechnungsmethodik angepasst. Anschliessend wird die Berechnung von jedem Faktor kurz beschrieben. Die Faktoren werden teilweise nur auf gewisse Landnutzungskategorien angewandt. Welche Faktoren für welche Landnutzungskategorien relevant sind, wurden im Vergleich zu MODIFFUS 2010 angepasst (s. Tabelle 29).

Ausgangswerte für Ackerland

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 Bodenerosion kommt als auf Kunstwiesen. So wird ein Teil des abgeschwemmten P an Bodenpartikel gebunden und mit dem Erosionsmaterial ausgetragen. Daher wurde der Anteil der Kunstwiesen am gesamten Ackerland aus den AGIS-Daten zur Kulturlandverteilung (BLW, 2020b) 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. Dieses Vorgehen entspricht jenem von MODIFFUS 2010, ausser dass die Daten vom BLW anstelle vom BFS bezogen wurden (s. Kapitel 2.1.1.5).

Ausgangswerte für Dauerwiesen und Weide

Auf extensiv und wenig intensiv genutzten Wiesen und Weiden wird mit einer geringeren P-Abschwemmung gerechnet als auf intensiv genutzten Wiesen und Weiden, weil weniger bzw. nicht gedüngt wird. Daher wurde der prozen-

tuale Anteil der extensiven Wiesen und Weiden sowie wenig intensiven Wiesen an den Dauerwiesen und Heimweiden aus den AGIS-Daten (BLW 2020b) für jede Gemeinde berechnet und mit den entsprechenden Konzentrationswerten der Tabelle 29 verrechnet. Da die Lage der extensiven und wenig intensiven Flächen nicht bekannt ist, wird die berechnete mittlere P-Konzentration der Dauerwiesen auf die gesamte Fläche der Dauerwiesen jeder Gemeinde umgelegt, analog dazu die mittlere P-Konzentration der Weiden auf alle Heimweiden. Im Gegensatz zu MODIFFUS 2010 wurde die Bewirtschaftungsintensität der Dauerwiesen und Weiden separat betrachtet. Dies erlaubt eine genauere Darstellung der jeweiligen Intensitäten.

Niederschlagskonzentrationsfaktor

Für nicht gedüngte 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 30 herangezogen und so der nutzungsspezifische Ausgangswert berechnet (Tabelle 29). Für die anderen, gedüngten Flächen wurde pro Gebiet ein Niederschlagskonzentrationsfaktor in Abhängigkeit von der Höhe der regionsspezifischen P-Niederschlagskonzentration berechnet. Da die landnutzungsspezifischen Ausgangswerte der P-Abschwemmung grösstenteils auf Literatur zu Abschwemmung des Mittellands bzw. ähnlich intensiv genutzten Regionen stammt, gibt es für die anderen Regionen jeweils einen Abzug des Ausgangswertes. Dieses Vorgehen entspricht jenem von MODIFFUS 2010. Da die regionsspezifische Niederschlagskonzentration um 10 % reduziert wurden (s. Kapitel 2.2.3.1), liegt der Faktor um 10 % tiefer; für die Niederschlagskonzentration wurde derselbe Faktorwert beibehalten.

Tabelle 29: Nutzungsspezifischer Ausgangswert für die Berechnung der P-Abschwemmung (mg P/l) sowie verwendete Korrekturfaktoren. (In Grün = in MODIFFUS 2020 Faktor neu verwendet).

Landnutzungskategorie MODIFFUS	Ausgangswert (mg P/l)	Faktoren
vegetationslose Flächen (Gletscher; Fels, Geröll, Sand)	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	-Hofdünger
Dauerwiesen ^a		-Hofdünger
intensive	1.2	-Niederschlagskonzentration
wenig intensive	0.6	-P-Testzahl Grasland
extensiv	Konzentration im Niederschlag * 8	
Heimweiden ^a		-Hofdünger
intensiv	1.2	-Niederschlagskonzentration
extensiv	Konzentration im Niederschlag * 8	-P-Testzahl Grasland
Ackerland ^a		-Hofdünger
offenes Ackerland	0.8	-Niederschlagskonzentration
Kunstwiesen	1.2	-P-Testzahl Acker
Rebbau	0.8	-Niederschlagskonzentration
		-P-Testzahl
Gartenbau	0.8	-Hofdünger
		-Niederschlagskonzentration
Obstbau	1.2	-Hofdünger
		-Niederschlagskonzentration
Siedlungsgrün, Strassen innerorts Siedlung überbaut stehende & fliessende Gewässer	0	-

^a Unterteilung der Intensität der Nutzung basiert auf den Daten des BLW (2020b) zur Kulturlandverteilung und wird pro Gemeinde berechnet.

Tabelle 30: Regionsspezifische Niederschlagskonzentration der P-Deposition mit zugehörigen Niederschlagskonzentrationsfaktor.

Biogeografische Region	mg P/l	Faktor
Alpine Regionen	0.0198	0.8738
Voralpine Regionen	0.0261	0.9131
Jura	0.0288	0.9300
Mittelland	0.0324	0.9525

Hofdüngerfaktor

Die P-Zufuhr durch Ausbringung von Hof- und Recyclingdüngern sowie durch Beweidung wurde für die gesamte landwirtschaftlich genutzte Fläche berechnet (Kapitel. 2.1.7). Aus diesen Daten wurde anschliessend ein Faktor erstellt, sodass bei der jeweiligen Landnutzungskategorie der Ausgangswert je nach Höhe der P-Zufuhr um bis zu 30 % erhöht oder um bis zu 20 % reduziert wurde. Da die Ausgangswerte der P-Abschwemmung pro Landnutzungskategorie (Tabelle 29, «Ausgangswert») sowie die mittlere P-Zufuhr durch Ausbringung von Hof- und Recyclingdüngern und durch Beweidung pro Landnutzungskategorie (s. Tabelle 23) eine grosse Spannweite aufweisen, wurden neu drei Faktoren nach dem gleichen Prinzip berechnet. Diese Einteilung erfolgte, da der Hofdüngerfaktor die P-Abschwemmungsausgangswerte der jeweiligen Landnutzungskategorien je nach Höhe der P-Zufuhr anpassen soll. Aufgrund der Intensität der Nutzung haben beispielsweise Heimweiden im Vergleich zur alpwirtschaftlichen Nutzfläche bereits einen höheren Ausgangswert. Bei einem einheitlichen Faktor über die gesamte landwirtschaftlich genutzte Fläche würden dementsprechend alle Heimweiden einen Zuschlag erhalten, alle alpwirtschaftlichen Nutzflächen einen Abzug und somit wären regional die einzelnen Landnutzungen nicht besser abgebildet. Die Einteilung für die drei Faktoren ist aus Tabelle 29 ersichtlich. Verbuschte Wiesen und Heimweiden kommen, trotz niedriger Düngungsintensität im Vergleich zu Heimweiden, in die intensivste Kategorie, da sie den gleichen Ausgangswert wie Heimweiden haben. Da über den Einsatz von Hof- und Recyclingdüngern in Reben nicht viel bekannt ist und dieser auch vermutlich unterschiedlich ist, wurde hier auf einen Faktor verzichtet. Weiterhin ist in Tabelle 29 auch der Mittelwert der P-Zufuhr (kg P/ha) der jeweiligen Kategorie, bei welchem der Faktor = 1 festgelegt wurde, ersichtlich. Bei den Graslandflächen mit intensiver Düngung erfolgte in einer linearen Beziehung ein Zuschlag oder Abzug, wenn die P-Zufuhr über bzw. unter diesem Mittelwert lag. Die maximalen Werte liegen bei +30 % bei einer P-Zufuhr von 43.5 kg/ha und bei -20 % bei einer P-Zufuhr von 9.5 kg/ha. Die gleiche lineare Beziehung wurde für die anderen beiden Kategorien angewandt, aber mit dem entsprechenden Mittelwert der P-Zufuhr der Kategorie für Faktor = 1.

Tabelle 31: Schema der Einteilung der Landnutzungen in die drei Faktoren.

Düngungsintensitätskategorie	Landnutzung gemäss Arealstatistik (72 Klassen)	Faktor = 1 bei xx kg P/ha
Graslandflächen mit intensiver Düngung	Heimweiden	23.0
	Dauerwiesen	
	Feldobst	
	Verbuschte Wiesen und Heimweiden	
Diverse LN mit «mittel intensiver» Düngung	Ackerland	16.5
	Gartenbauflächen	
	Obstanlagen	
alpwirtschaftliche Nutzflächen	Alpwiesen	3.0
	Günstige Alp- und Juraweiden	
	Verbuschte Alp- und Juraweiden	
	Versteinte Alp- und Juraweiden	
	Schafalpen	

Bei MODIFFUS 2010 wurde nur ein Hofdüngerfaktor berechnet, welcher basierend auf der Anzahl Tiere sowie der düngbaren Fläche pro Gemeinde berechnet wurde (s. Kapitel 2.1.7.). Dieser Faktor pro Gemeinde wurde mittels linearer Beziehung berechnet und zwischen 1 und 1.2 bei 0 und 100 kg P/ha festgelegt. In MODIFFUS 2020 wird neben der grösseren methodischen Anpassung der N- und P-Zufuhr (s. Kapitel 2.1.7) sowie der Unterteilung in drei Faktoren der drei «Düngungsintensitätskategorien» (Tab. 31), neu der Faktor stärker gewichtet (Spannweite 50 % statt 20 %). Weiterhin werden die P-Abschwemmungsausgangswerte nicht nur einseitig erhöht, sondern auch reduziert, wenn die P-Zufuhr eines Hektars unter dem schweizweiten Mittelwert der entsprechenden Düngungsintensitätskategorie lag. Daher liegt der Mittelwert des Hofdüngerfaktors pro Landnutzungskategorie trotz stärkerer Gewichtung im Vergleich zu MODIFFUS 2010 meist tiefer. Weiterhin wurde der Hofdüngerfaktor im 2010 nur auf Dauerwiesen angewandt, während er bei MODIFFUS 2020 neben den Dauerwiesen auch bei alpwirtschaftlichen Nutzflächen, Heimweiden, Ackerland, Garten- und Obstbau angewandt wurde. Der mittlere Wert des Faktors pro Landnutzungskategorie hat sich wie folgt verändert: Dauerwiesen (-8 %), Heimweiden (+5 %), Ackerland (+1 %), alpwirtschaftliche Nutzfläche (-4 %), Gartenbau (-9 %) und Obstbau (-3 %).

P-Testzahlfaktor

Es wurde 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 (Hahn et al., 2012). Für MODIFFUS 2020 wurde, wie bereits im Kapitel 2.1.8 beschrieben, der Gehalt an pflanzenverfügbarem P im Oberboden aus der Beprobung für den ÖLN verwendet. Der Mittelwert pro MODIFFUS-Landnutzungskategorie (Ackerland, Weiden und Dauerwiesen, Reben) und Postleitzahl (PLZ) wurde verwendet. Basierend auf der Einteilung der P-Versorgungsklassen der Böden (A-E) gemäss GRUD (Flisch et al., 2017) wurden die P-Werte der H₂O₁₀- und der CO₂-Methode in einen Faktor umgerechnet. Bei Ackerland, Weiden und Dauerwiesen (alle CO₂-Methode) wurde bei Werten von 0.62 - 1.551 mg P/kg Boden (Klasse C) keine Anpassung vorgenommen (Faktor 1). Ab 1.551 mg P/kg nimmt der Faktor linear zu bis zu einem Maximalwert von 1.30 bei 4.656 mg P/kg Boden. Diese Werte entsprechen den Versorgungsklassen D und E. Ab 0.62 mg P/kg Boden nimmt der Faktor linear ab bis auf einen Wert von 0.93 bei 0.309 mg P/kg Boden (Versorgungsklassen A und B). Analog dazu wurde der Faktor für Reben (H₂O₁₀) berechnet. Auf Grund von weniger Daten von Bodenproben pro PLZ wurde der Faktor hier jedoch nicht so stark gewichtet (0.90 - 1.20). Alle PLZ ohne Beprobungen erhielten den Faktor 1.

Im Vergleich zu 2010 liegt der mittlere P-Testzahlfaktor im 2020 im Schnitt um etwa 5 % niedriger (Ackerland -13 %, Reben + 6 %, Dauergrünland - 2%). Dies ist – mit Ausnahmen – rein methodisch bedingt. Für MODIFFUS 2010 wurde der Faktor bei der P-Abschwemmung nur bei Ackerland angewandt, in 2020 zusätzlich auch bei Reben, Heimweiden sowie Dauerwiesen. Weiterhin zeigt der Vergleich des mittleren pflanzenverfügbaren P-Gehalts im Oberboden aller ÖLN-Bodenproben zwischen drei Zeiträumen (2010-2013, 2014-2016 und 2017-2020), dass bei Grasland die Phosphorkonzentrationen zwischen 2010-2013 und 2014-2016 von 2.2 auf 1.8 mg P pro kg Boden (CO₂-Methode) abnahmen (aber dann bis 2017-2020 bei 1.8 mg P pro kg Boden stagnieren). In Ackerkulturen zeigen die P-Konzentrationen über das letzte Jahrzehnt keinen klaren Trend. Für den Weinbau gab es zwischen diesen drei Zeiträumen keine signifikanten Veränderungen, jedoch war die Anzahl der Messungen eher niedrig, so dass die Vergleichbarkeit zwischen den Zeiträumen mit grosser Wahrscheinlichkeit eingeschränkt ist (BLW, 2022b). Zum einen erfolgt im Boden eine Immobilisierung von P, welche zu einer Abnahme der P-Gehalte im Boden führt, zum anderen kann es bei reduziertem P-Input zu einer Abreicherung von P im Boden kommen, welche aber nach von Arb et al. (2021) nur sehr langsam stattfindet. Auf nationaler Ebene werden aber immer noch beträchtliche P-Überschüsse ausgewiesen (Spiess & Liebisch, 2022), so dass es zu einer weiteren P-Anreicherung kommt.

N-Abschwemmung

Bei der Berechnung der N-Abschwemmung wurde aus den Daten der N-Depositionskarte (Abb. 5) und der Niederschlagskarte (Abb. 22) eine landnutzungsspezifische mittlere N-Konzentration im Niederschlag abgeleitet. Die Angaben in Tabelle 32 geben einen groben Überblick der berechneten schweizweiten mittleren Werte für die Stickstoffdeposition pro Landnutzungsklasse. In MODIFFUS erfolgt eine genaue Berechnung pro Rasterzelle. Die berechneten Konzentrationen wurden dann mit den jeweiligen berechneten Oberflächenabflussmengen kombiniert. Gewässeranschluss und Bodeneigenschaften wurden bereits bei der Berechnung der Oberflächenabflussbildung berücksichtigt. Anschliessend wurde der berechnete N-Abschwemmungswert pro Hektare im Vergleich zu

MODIFFUS 2010 neu noch mittels einem Dauerwiesen- und Weideintensitätsfaktor sowie einem Hofdüngerfaktor angepasst.

Tabelle 32: Vergleich des nutzungsspezifischen Ausgangswertes für die Berechnung der N-Abschwemmung (mg N/l) sowie der mittleren nutzungsspezifische N-Deposition (kg N/ha) zwischen 2010 und 2020.

	N-Deposition				Ausgangswerte für N-Abschwemmung			
	2010	2020	Differenz	%	2010	2020	Differenz	%
Ackerland	23.5	19.4	-4.1	-18	2.06	1.80	-0.27	-13
Alpwirtschaftliche Nutzfläche	13.5	8.4	-5.1	-38	0.87	0.55	-0.32	-37
Gartenbau	22.4	21.3	-1.0	-5	1.96	1.95	-0.01	-1
Heimweiden	25.8	21.2	-4.6	-18	2.00	1.74	-0.27	-13
Obstbau	24.5	23.0	-1.5	-6	2.15	2.11	-0.04	-2
Rebbau	17.0	14.6	-2.4	-14	1.69	1.49	-0.20	-12
Dauerwiesen	25.1	18.9	-6.2	-25	1.87	1.47	-0.40	-21
Siedlungsgrün	21.5	17.6	-3.9	-18	1.80	1.55	-0.25	0
Siedlung überbaut	21.4	17.8	-3.6	-17	1.79	1.57	-0.23	0
Strassen ausserorts	22.6	16.3	-6.3	-28	1.80	1.38	-0.42	-23
Strassen innerorts	21.2	17.6	-3.6	-17	1.80	1.57	-0.24	0
unproduktive Vegetation	11.2	8.0	-3.2	-29	0.76	0.56	-0.20	-27
Stehende Gewässer	14.8	13.8	-1.1	-7	1.25	1.21	-0.04	0
fließende Gewässer	17.9	13.5	-4.4	-25	1.40	1.11	-0.29	0
Fels, Geröll, Sand	7.9	4.9	-3.1	-39	0.51	0.32	-0.19	-37
Gletscher	6.0	4.6	-1.4	-24	0.33	0.28	-0.06	-17
Wald = <1200	24.1	24.6	0.5	2	1.83	1.98	0.15	0
Wald > 1200	15.0	11.9	-3.1	-21	1.04	0.85	-0.19	-19
Total	17.9	14.9	-3.0	-17	1.36	1.19	-0.16	-12

Dauerwiesen- und Weideintensitätsfaktor

Wie bei der P-Abschwemmung wurde der prozentuale Anteil an extensiven Wiesen und Weiden sowie wenig intensiven Wiesen an den Dauerwiesen und Heimweiden pro Gemeinde verwendet. Da die Ausgangswerte aber pro Hektare mittels des Stickstoffdepositions- und Niederschlagsrasters berechnet wurden, konnten die prozentualen Anteile – im Vergleich zur P-Abschwemmung – nicht direkt als Ausgangswerte verwendet werden und wurden in einen Faktor umgewandelt. Für intensive Weiden sowie intensiven Dauerwiesen liegt der Faktor bei 1 (keine Anpassung), bei extensiven Weiden sowie bei extensiv und wenig intensiven Wiesen bei 0.8. Da dieser Faktor 2010 nicht verwendet wurde und der Mittelwert des Faktors aller Graslandflächen in 2020 bei 0.9 liegt, wurden die berechnete N-Abschwemmungswerte pro Hektare (N-Konzentration x Oberflächenabfluss) in MODIFFUS 2020 im Schnitt um 10 % reduziert.

Hofdüngerfaktor

Der Faktor wurde nach dem gleichen Prinzip wie bei der P-Abschwemmung berechnet. Die Mittelwerte, welche dem Faktorwert 1 entsprechen, liegen bei 98.5 kg N/ha (intensive Kategorie), 64.5 kg N/ha («mittel intensiv») und 13.5 kg N/ha (alpwirtschaftliche Nutzfläche). Auch hier wird wiederum mit einer linearen Beziehung der Ausgangswert bis zu 20 % reduziert oder bis zu 30 % erhöht.

2.2.3.3 Nährstoffeinträge durch Auswaschung und Drainage

Nitratauswaschung

Für alle Landnutzungsklassen, ausser der alpwirtschaftlichen Nutzfläche und dem Ackerland, wurden die gleichen Ausgangswerte wie 2010 verwendet (Tabelle 33) und mit folgenden, teilweise neuen oder angepassten, Faktoren regional angepasst:

Nitratausgangswert (kg N/ha)

- x Bodenbearbeitungsfaktor
- + Zuschlag für Graslandumbruch
- x Hofdüngereffizienzfaktor
- x Bodenfaktor
- x Höhenfaktor
- x N-Depositionsfaktor Wald
- x Denitrifikationsfaktor
- x Sickerwasserfaktor
- x Drainagefaktor

= Nitratfracht (kg N/ha)

Der Ausgangswert der alpwirtschaftlichen Nutzflächen wurde auf Grund von methodischen Anpassungen von 13 kg N/ha auf 12 kg N/ha reduziert. Bei MODIFFUS 2010 entspricht der Ausgangswert von 13 kg N/ha jenem der Dauerwiesen. Auf den alpwirtschaftlichen Nutzflächen wurde für MODIFFUS 2010 der Dauerwiesenintensitätsfaktor jedoch auch angewandt, sodass der landnutzungsspezifische Mittelwert (Ausgangswert x Dauerwiesenintensitätsfaktor) bei 12.4 kg N/ha lag. Da jedoch für die Berechnung des gemeindespezifischen Dauerwiesenintensitätsfaktors die Dauerwiesenflächen im Sömmerungsgebiet gemäss BLW-Daten (2020b) nicht berücksichtigt wurden, wurde im 2020 der Ausgangswert auf der alpwirtschaftlichen Nutzfläche auf 12 kg N/ha gesetzt, der Dauerwiesenintensitätsfaktor aber nur auf Dauerwiesen angewandt.

Tabelle 33: Nutzungsspezifischer Ausgangswert für die Berechnung der Nitratauswaschung.

MODIFFUS Landnutzungs-kategorie	Ausgangswert (kg N/ha)
Wald	5.5
Unproduktive Vegetation	6.5
Strassen ausserorts	9
Dauerwiesen ^a	
intensive	13
wenig intensive + extensive	10.4
Heimweiden ^a	
Berg (extensiv/intensiv)	15/20
Tal (extensiv/intensiv)	20/25
Alpwirtschaftliche Nutzfläche	12
Siedlungsgrünflächen	25
Obstbau	13
Rebbau	30
Gartenbau	45
Ackerland ^b	47.7
Siedlung überbaut	0
Strassen innerorts	
Stehende & fliessende Gewässer	
Fels, Geröll, Sand	
Gletscher	

^a Unterteilung der Intensität der Nutzung basiert auf den Daten des BLW (2020b) zur Kulturlandverteilung und wird pro Gemeinde berechnet.

^b flächengewichteter Mittelwert, Berechnung erfolgte kulturspezifisch und gemeindespezifisch

Die Berechnung der Ausgangswerte für Ackerland erfolgt weiterhin via kulturspezifischen Ausgangswerten. Hier wurden kleinere Anpassungen vorgenommen. Neu wird mittels kulturspezifischer Ausgangswerte in mg N/l statt kg N/ha gerechnet. Dies wird unter «Nitrat Ausgangswert für Ackerland» erläutert.

Weiterhin wurden zwei neue Faktoren für die Berechnung der Nitrat auswaschung unter Ackerland (der Bodenbearbeitungsfaktor und der Umbruchfaktor) sowie bei Wald der Stickstoffdepositionsfaktor eingeführt.

Nitrat Ausgangswert für Ackerland

Für das Ackerland konnte aufgrund der grossen Unterschiede zwischen den verschiedenen Kulturen kein für die gesamte Schweiz einheitlicher Ausgangswert verwendet werden. Daher wurde pro Gemeinde ein Ausgangswert aufgrund der Kulturartenzusammensetzung und kulturspezifischen Auswaschungswerten berechnet. Für Letztere wurden grösstenteils jene Werte von MODIFFUS 2010 verwendet, welche auf der so genannten Nitratmatrix basieren: Aufbauend auf Resultaten praxisrelevanter Verfahren von schweizerischen Lysimeterversuchen sowie von Literaturwerten wurden die N-Mengen, die unter den Kulturkombinationen (Hauptkultur des aktuellen Jahres mit eventueller Zwischenkultur und Nachkultur im Folgejahr) im Zeitabschnitt zwischen Juli eines bestimmten Jahres und Juni des folgenden Jahres ausgewaschen wurden, zusammengestellt. Diese N-Mengen dienen zur Ableitung von durchschnittlichen Werten für Kulturkombinationen, die in einer Tabelle, der Nitratmatrix, angeordnet wurden. Kulturkombinationen wurden verwendet, weil verschiedene Lysimeterversuche gezeigt haben, dass die unter einer bestimmten Kultur ausgewaschene Nitratmenge durch die Vorkultur beeinflusst wird (Nievergelt, 2002). Da gesamtschweizerisch nur die Flächen der Ackerkulturen erhoben werden, nicht aber diejenige der verschiedenen Kulturkombinationen, musste deshalb ein kulturspezifischer Ausgangswert aus den Werten für die Kulturkombinationen abgeleitet werden. Dazu wurde abgeschätzt, welche Nachkulturen wie häufig auf eine bestimmte Kultur folgen. Die Werte von MODIFFUS 2010 wurden für MODIFFUS 2020 teilweise aufgrund zusätzlicher Lysimeterwerte angepasst und bei neuen Kulturen ergänzt (s. Anhang C, Tabelle A4).

Bei der Berechnung für MODIFFUS 2010 wurden Mengen (in kg N/ha) als Ausgangswerte verwendet, für MODIFFUS 2020 dagegen Konzentrationen (in mg N/l). Diese wurden ermittelt, indem die kulturspezifischen N-Auswaschungswerte (in kg/ha) von 2020 durch die Sicker- und Drainagewassermengen von 2010 dividiert wurden. Für Letztere wurden die Wassermengen für 2010 verwendet, weil die Nitratmatrix meistens auch auf älteren Daten beruht und somit eher den Sickerwassermengen des Zeitraums von 1999 bis 2009 (MODIFFUS 2010) entspricht. Die Umstellung von Mengen zu Konzentrationen wurde vorgenommen, da gemäss neuerer Literatur insbesondere bei Ackerland die Auswaschung stark an die versickernden Wassermengen gekoppelt ist. Beisecker & Piegholdt (2021) kommen z. B. in einer umfangreichen Meta-Analyse von Lysimeter-, Saugsonden- und Nitrat tiefe profildaten in Deutschland zum Schluss, dass die ausgewaschene N-Fracht standort- und jahresübergreifend vor allem von der jährlichen Sickerwassermenge bzw. der Austauschhäufigkeit des Bodenwassers bestimmt wird. Weiterhin ist Ackerland diejenige Landnutzungskategorie, welche die höchsten ausgewaschenen N-Mengen aufweist, sodass diese Verfeinerung der Methodik auch stärker ins Gewicht fällt.

Bodenbearbeitungsfaktor

Bei bodenschonender Bearbeitung ist im Ackerbau mit reduzierter Nitrat auswaschung zu rechnen (Skaalsveen et al., 2019). Spiess et al. (2020) fanden zum Beispiel in einem siebenjährigem Lysimeterversuch in Bern-Liebefeld im Mittel eine 20 % geringere Nitratkonzentration und eine 14 % niedrigere N-Fracht unter Direktsaat gegenüber Pflugbearbeitung. Je nach Anteil der bodenschonend bearbeiteten Fläche an der gesamten Ackerfläche einer Gemeinde (Daten vom BLW, 2020b; s. Kap. 2.1.1.7) und unabhängig von der Kulturartenzusammensetzung wurde die Nitrat auswaschung reduziert, indem angenommen wurde, dass bei schonender Bodenbearbeitung die ausgewaschene N-Menge um 5 % und die Nitratkonzentration um 10 % geringer ist (Tab. 34).

Tabelle 34: Anpassung des N-Ausgangswertes je nach Höhe des Anteils an Ackerfläche mit bodenschonender Bearbeitung (BB).

Anteil Ackerfläche Gemeinde mit BB (%)	Abnahme um kg N/ha	mg N/l
100	5	0.90
50	2.5	0.45
25	1.25	0.22

Zuschlag für Graslandumbruch

Die Umwandlung von Dauerwiesen, Weiden sowie Obstbau zu Ackerland führt während vieler Jahre zu erhöhter Nitratauswaschung. Eulenstein et al. (2018) schreiben dazu: «Massive Auswirkungen auf die Nitratkonzentrationen des Grundwassers haben Grünlandumbrüche. Es gibt keine andere landwirtschaftliche Maßnahme, bei der annähernd vergleichbare Nitratmengen pro Fläche in das Grundwasser ausgetragen werden». Um dem in MODIFFUS Rechnung zu tragen, erhalten alle Flächen, welche gemäss Arealstatistik in MODIFFUS 2020 Ackerland und gemäss Arealstatik in MODIFFUS 2010 Dauerwiesen, Obstbau oder Heimweiden waren (s. Tab. 4), einen Zuschlag. Für Heimweiden ist dieser Zuschlag auf Grund der zusätzlichen von den Tieren ausgeschiedenen Nährstoffmenge höher (Tab. 35).

Tabelle 35: Zuschlag des N-Auswaschungsausgangswertes von Ackerland auf Grund von Umwandlung.

Nutzung in 2010	Zuschlag um kg	Zuschlag um mg N/l
Dauerwiesen sowie Obstbau	20	3.59
Heimweiden	25	4.48

Ausgangswerte Dauerwiesen und Weide

Auf extensiv und wenig intensiv genutzten Wiesen und Weiden wurde mit einer geringeren N-Auswaschung gerechnet als auf intensiv genutzten Wiesen und Weiden. Die Berechnung erfolgte nach dem gleichen Prinzip wie bei der P-Abschwemmung (s. Kap. 2.2.3.2) mit Verwendung der N-Auswaschungswerte gemäss Tabelle 33. Zusätzlich wurde noch zwischen Berggebiet (über 1000 m ü. M.) und Tal (unter 1000 m ü. M.) unterschieden.

Hofdüngerfaktor

Die Berechnung des Hofdüngerfaktors wurde analog zur Berechnung der P- bzw. N-Abschwemmung vorgenommen (s. Kap. 2.2.3.2). Da die Menge der ausgebrachten Hofdünger aber die ausgewaschene N-Menge weniger stark beeinflusst als die abgeschwemmte, wurde die Gewichtung angepasst: der maximale Abzug beträgt 10 % und der maximale Zuschlag 20 %.

Bodenfaktor

Der Einfluss der Bodeneigenschaften auf die Auswaschung 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. Mittels kantonalen Bodenkarten und der BEK200 wurden die Böden in fünf Risikoklassen eingeteilt. Wie bereits in Kapitel 2.1.6.2 beschrieben, gab es zwar im Vergleich zu MODIFFUS 2010 Ergänzungen und Anpassungen der Datengrundlagen, aber an der Ermittlung der Risikoklassen sowie den entsprechenden Bodenfaktoren hat sich nichts geändert. Wie bei MODIFFUS 2010 entspricht die Risikoklasse 2 von den Bodeneigenschaften her am ehesten den Böden aus den Lysimeterversuchen. 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 in Regionen ohne detaillierte Bodenkartierung nur eine grobe räumliche Differenzierung möglich ist.

Höhenfaktor

Die Gebietshöhe wirkt sich auf die anthropogene Luftverschmutzung und über die Temperatur auf die Dauer der Vegetationsperiode, die mineralisierte N-Menge, den Pflanzenentzug und die Denitrifikation aus. Mit zunehmender Gebietshöhe wird daher die Nitrat Auswaschung abnehmen. Da der maximale Höhenunterschied in der Schweiz mit über 4'000 m sehr gross ist, wurde die Gewichtung des Höhenfaktors sehr hoch angesetzt. Die Grenzwerte der maximalen Zunahme bzw. Abnahme der Ausgangswerte (s. Tabelle 33) sowie die lineare Beziehung wurde von MODIFFUS 2010 übernommen. Der Faktor wurde wiederum hektarweise berechnet und auf alle Landnutzungen, mit Ausnahme von Siedlung überbaut, Strassen innerorts, Gewässer sowie die vegetationslosen Flächen, angewandt. Einzig für die Landnutzung Wald wurde der Höhenfaktor angepasst, da für MODIFFUS 2020 neu der «N-Depositionsfaktor Wald» eingeführt wurde. Der Faktor berücksichtigt anhand der Stickstoffdepositionskarte bereits die anthropogene Luftverschmutzung (siehe im anschliessenden Abschnitt «N-Depositionsfaktor Wald»). Um eine doppelte Berücksichtigung der anthropogenen Luftverschmutzung zu vermeiden, wurde bei Wald der Höhenfaktor nur halb so stark gewichtet wie bei den anderen Nutzungen (Dauerwiesen, Heimweiden, alpwirtschaftliche Nutzfläche, Obstbau, Rebbau, Gartenbau, Ackerland und Siedlungsgrünflächen (Tab. 36).

Tabelle 36: Höhenfaktor.

Schwellenwert Höhe m. ü. M.	Höhenfaktor	Höhenfaktor Wald
260	1.2	1.1
2490	0.2	0.6

N-Depositionsfaktor für Wald

Dieser Faktor wurde in MODIFFUS 2020 neu eingeführt. Ein Vergleich mit N-Auswaschungswerten verschiedener Studien und diverse Expertengespräche haben gezeigt, dass MODIFFUS 2010 die ausgewaschenen N-Mengen in Waldflächen im Mittelland generell unterschätzt und im alpinen Bereich überschätzt (Details siehe Prasuhn, 2016). Der N-Auswaschungsausgangswert in Waldflächen von 5.5 kg/ha wurde gemäss MODIFFUS 2010 basierend auf Literaturwerten festgelegt und stimmt relativ gut mit den Werten der von Prasuhn (2016) verglichenen Studien überein. Der Ausgangswert wurde in MODIFFUS 2010 jedoch noch mittels Bodenfaktor, Denitrifikationsfaktor, Höhenfaktor und Sickerwasserfaktor regional angepasst. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren lag die effektiv berechnete N-Auswaschung für 2010 bei 4.4 kg/ha.

In Gebieten mit hoher atmosphärischer N-Deposition ist erhöhte N-Auswaschung aus dem Wald wahrscheinlicher als in Gebieten mit tiefen N-Einträgen. Der Einfluss der N-Deposition auf die Höhe der N-Auswaschung ist in der internationalen Literatur unbestritten, wurde in MODIFFUS 2010 aber noch nicht berücksichtigt. Waldner et al. (2019) haben den Zusammenhang zwischen der N-Auswaschung und Indikatoren für die Stickstoffsättigung anhand von Messungen auf 70 Waldflächen in der Schweiz, Deutschland, Frankreich, Belgien, Italien und Irland statistisch untersucht. Als erklärende Variablen wurden die N-Deposition, die Gründigkeit und die Vernässung des Bodens aus der Bodeneignungskarte verwendet. Ebenfalls signifikant, als erklärende Variablen jedoch weniger wichtig, waren der N-Status der Bäume (N-Konzentration in Blättern/Nadeln), die Niederschlagsmenge und der Deckungsgrad der Strauchschicht (inklusive Verjüngung der Waldbaumarten). Bei der Anwendung ihrer Modellgleichung ergab sich eine obere Grenze des N-Eintrags von 35 kg N/ha/Jahr. Zusätzlich wurde die Obergrenze der N-Auswaschung ebenfalls auf 35 kg N/ha/Jahr limitiert. Die kartierte Waldfläche (ohne Gebüschwald) umfasste 11'190 km², die Austräge lagen zwischen 0 und 35 kg/ha/Jahr. Der Mittelwert über die Waldfläche betrug 4.3 kg N/ha/Jahr (Abb. 20, Tab. 38).

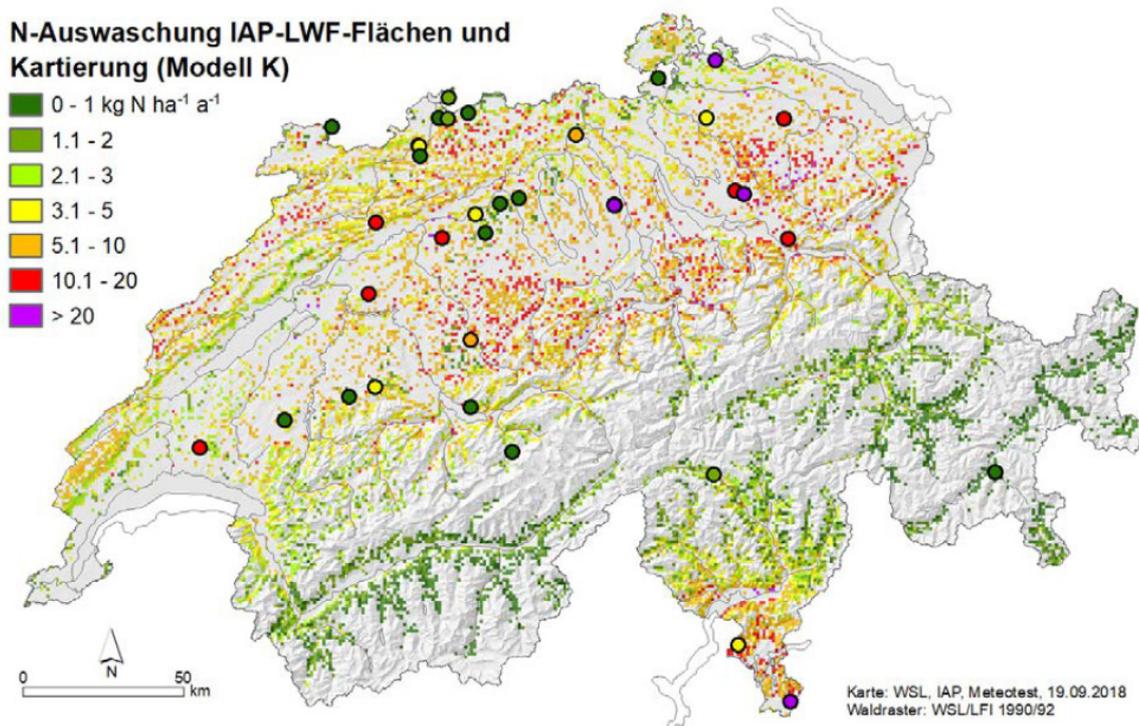


Abbildung 20: Kartierung des erhaltenen mittleren Schätzwertes für die N-Auswaschung im Jahr 2005 aus Waldflächen mit dem Sickerwasser (Modell K implementiert mit Deposition auf 35 kg/ha/Jahr begrenzt und Auswaschung auf maximal Deposition begrenzt) (Kartendaten: (WSL/LFI, 1990/92), BFS-Waldmischungsgrad, BLW-Bodeneignungskarte 1:200'000, Swisstopo Grenze, Gewässer & Topografie), sowie mittlere N-Auswaschung auf IAP- und LWF-Flächen (Quelle: Waldner et al., 2019).

Achermann et al. (2016) haben die N-Auswaschung in Waldflächen für die Schweiz mit der N-Deposition von 2010 abgeschätzt. Aus gemessenen N-Auswaschungswerten sowie der N-Deposition haben sie eine Beziehung erstellt (s. Abb. 21) und dann mit den Daten des Landesforstinventars (ohne Gebüschwald) verknüpft.

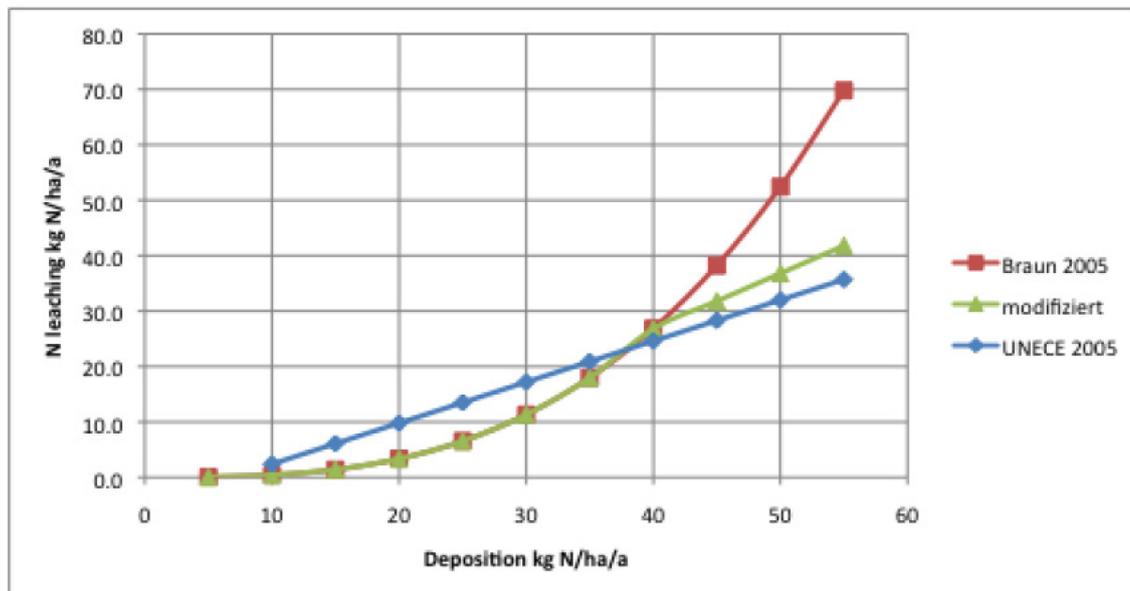


Abbildung 21: Beziehungen zwischen N-Deposition und N-Auswaschung nach Braun (2005), UNECE (2005) sowie modifiziert für die Bewertung der durch atmosphärische N-Einträge erzeugten N-Auswaschung bei Waldstandorten in der Schweiz nach Achermann et al. (2016) (Quelle: Achermann et al., 2016).

In Anlehnung an die Beziehung zwischen N-Deposition und N-Auswaschung von UNECE (2005) sowie Achermann et al. (2016) (s. Abb. 21) wurde für MODIFFUS 2020 eine einfachere, angepasste lineare Beziehung erstellt und diese in den N-Depositionsfaktor umgerechnet (s. Tab. 37). Gemäss Braun et al. (2012) und Thimonier et al. (2010) ist mit einer N-Auswaschung über 5 kg N/ha/Jahr zu rechnen, wenn die N-Deposition 10 kg N/ha/Jahr übersteigt (siehe auch Prasuhn, 2016). Der N-Auswaschungsausgangswert für Wald von 5.5 kg N/ha/Jahr wurde neu in MODIFFUS 2020 als Faktor 1 bei einer N-Deposition von 12 kg/ha/Jahr festgelegt (Tab. 37). Entsprechend kommt es bei Werten der N-Deposition von mehr als 12 kg/ha/Jahr zu einem Zuschlag, darunter zu einer Reduktion der N-Auswaschung. Für den N-Depositionsfaktor wurden die minimale N-Auswaschung in Waldflächen auf 2.8 kg N/ha/Jahr, die maximale auf 11 kg N/ha/Jahr festgelegt. Die mit MODIFFUS 2020 berechnete N-Auswaschung in Waldflächen (Ausgangswert 5.5 kg/ha multipliziert mit allen relevanten Faktoren) liegt für 2020 zwischen 1.16 und 15.61 kg N/ha. Damit wird eine deutlichere regionale Differenzierung erzielt als bei MODIFFUS 2010, die Spannweite ist aber erheblich geringer als bei Waldner et al. (2019) mit 0 bis 35 kg N/ha/Jahr. Der schweizweite Median der N-Deposition 2015 in Waldflächen gemäss Arealstatistik lag bei 18 kg N/ha/Jahr, mit einem Minimalwert von 2 kg N/ha/Jahr und Maximalwert von 51 kg N/ha/Jahr.

Tabelle 37: Beziehung zwischen N-Deposition und N-Auswaschung in Waldflächen für MODIFFUS 2020.

	N-Deposition kg/ha	Faktor	N-Auswaschung kg N/ha
Min	2	0.5	2.75
Faktor = 1	12	1	5.50
Max	32	2	11.00

Um die methodische Auswirkung des zusätzlichen Faktors (und angepassten Höhenfaktors) von möglichen realen Änderungen zu unterscheiden, wurde die N-Auswaschung in zwei Varianten gerechnet:

1. Alte Methodik: Methodik wie bei MODIFFUS 2010, aber mit Arealstatistik 2013/18 sowie leicht angepasstem Bodenfaktor und Sickerwasserfaktor (unveränderte Denitrifikations- und Höhenfaktoren)
2. Neue Methodik: Methodik MODIFFUS 2020: Arealstatistik 2013/18, leicht angepasster Bodenfaktor und Sickerwasserfaktor (unveränderte Denitrifikationsfaktor), neuer N-Depositionsfaktor Wald, angepasster Höhenfaktor

Methodisch bedingt liegt die gesamte wie auch die durchschnittlich ausgewaschene N-Menge in Waldflächen in MODIFFUS 2020 höher als 2010 (Tab. 38), vor allem aber gibt es nun grössere regionale Unterschiede. Die mittlere N-Auswaschung in Waldflächen liegt nun zwischen den Werten von Achermann et al. (2016) und Waldner et al. (2019).

Tabelle 38: N-Auswaschung in Waldflächen gemäss MODIFFUS sowie nach Achermann et al. (2016) und Waldner et al. (2019).

	MODIFFUS			Achermann et al. (2016)	Waldner et al. (2019)
	2010	2020 alte Methodik	2020 neue Methodik		
Waldfläche (ha)	1'293'017	1'311'525	1'311'525	1'040'000	1'119'000
Mittelwert (kg N/ha)	4.41	4.34	5.51	7.30	4.25
Summe (t N)	5'698	5'690	7'227	7'560	4'756

Denitrifikationsfaktor

Je nach Standortfaktoren ist mit mehr oder weniger hohen Denitrifikationsverlusten im Boden zu rechnen. Als Kriterien für die Höhe der Denitrifikation wurden wie bei MODIFFUS 2010 der Vernässungsgrad des Bodens aus der Bodeneignungskarte und das Vorhandensein einer Drainage herangezogen. Folgende Denitrifikationsfaktoren wurden hektarweise für alle landwirtschaftlichen Nutzungskategorien verwendet (Tab. 39).

Tabelle 39: Ableitung des Denitrifikationsfaktors aus den Bodeneigenschaften (Hürdler et al., 2015).

	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

Sickerwasserfaktor

Der Sickerwasserfaktor wurde für alle Nutzungskategorien hektarweise angewandt und korrigiert die Ausgangsfracht in Abhängigkeit von der gesamten versickernden Wassermenge (Drainageabfluss + Sickerwasser). Es wird davon ausgegangen, dass mit zunehmender Sickerwassermenge die Stickstofffracht – trotz Verdünnungseffekten – leicht zunimmt. Die Gewichtung des Sickerwassereinflusses wurde, wie bei MODIFFUS 2010, auf 20 % festgelegt. Auch die maximalen Abzüge bzw. Zuschläge wurden bei den gleichen Sickerwassermengen festgelegt: eine Reduktion des Ausgangswertes von 10 % bei 200 mm Sickerwasser (Faktor 0.9) und einen Zuschlag von 10 % bei 2000 mm Sickerwasser (Faktor 1.1).

Da bei MODIFFUS 2020 neu bei Ackerland mit Konzentrationen statt mit Mengen gerechnet wurde, wurde der Sickerwasserfaktor dort nicht mehr angewandt. Dafür wurde die berechnete N-Konzentration (Ausgangskonzentration inklusive aller angewandten Faktoren) mit der effektiven Sicker- sowie Drainagewassermenge verrechnet. Für die anderen Landnutzungen wurde neu auch zwischen N-Fracht via Drainage sowie N-Fracht via Auswaschung unterschieden, weil die N-Einträge über Drainagen in die Oberflächengewässer, diejenigen über Auswaschung ins Grundwasser gelangen. Die N-Fracht wurde dann für beide zusammen berechnet: Ausgangswerte multipliziert mit allen Faktoren ausser dem Drainagefaktor. Pro Hektare wurde der prozentuale Anteil von Drainageabfluss sowie Sickerwasser an der gesamten versickernden Wassermenge (potentieller Abfluss minus Oberflächenabfluss) berechnet. Die gesamte Fracht (via Auswaschung + Drainage) wurde dann gemäss diesen Prozentwerten pro Hektare aufgeteilt.

Drainagefaktor

Auf drainierten Flächen wird mit höheren N-Verlusten als auf undrainierten Flächen gerechnet. Für den Drainageeffekt auf die N-Auswaschung wurde – neben den geringeren Denitrifikationsverlusten – ein Zuschlag von 10 % (Faktor 1.1) bei drainierter Fläche berücksichtigt. Für MODIFFUS 2020 wurde einerseits die neue Drainagekarte (Abb. 2) verwendet, andererseits wurde der Faktor nur auf jenem Anteil der N-Fracht angewandt, welche via Drainage in die Gewässer gelangt, und nicht auf die gesamte N-Fracht (Sickerwasser + Drainage).

Phosphorauswaschung

Bei der Berechnung der P-Auswaschung wurde ähnlich wie bei der Nitratauswaschung vorgegangen. Der gleiche mittlere P-Ausgangswert (kg P/ha/Jahr) pro Landnutzungskategorie wie bei MODIFFUS 2010 wurde hierfür verwendet (s. Tabelle 40) und mit folgenden Faktoren angepasst:

Phosphorausgangswert (kg P/ha)

- x Bodenfaktor
- x Hofdüngerfaktor
- x P-Testzahlfaktor
- x Sickerwasserfaktor
- x Drainagefaktor

= Phosphorfracht (kg P/ha)

Tabelle 40: Nutzungsspezifischer Ausgangswert für die Berechnung der P-Auswaschung (kg P/ha).

MODIFFUS Landnutzungs- klasse	Ausgangswert (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
Siedlung überbaut Strassen innerorts Stehende & fliessende Gewässer Fels, Geröll, Sand Gletscher	0.00

Bodenfaktor

Analog zur Nitratauswaschung berechnet.

Hofdüngereffizienzfaktor

Die Berechnung erfolgt analog zur P-Abschwemmung (s. Kap.2.2.3.2), einzig die Gewichtung wurde angepasst. Der Ausgangswert wurde maximal um 5 % erhöht bzw. reduziert (Faktor 0.95 bis 1.05) und die Gewichtung ist somit weniger stark als bei der N-Auswaschung (Faktor 0.9 bis 1.2). Die ausgewaschenen P-Mengen sind sehr gering, da P eine höhere Absorptionsfähigkeit aufweist oder via Drainage verloren geht. Bei N ist Auswaschung der bedeutendste Pfad auf Grund der hohen Löslichkeit von Nitrat sowie den N-Mineralisierungsprozessen.

P-Testzahlfaktor

Analog zur P-Abschwemmung berechnet. Im Vergleich zu MODIFFUS 2010 liegt der Faktor im Durchschnitt um etwa 10 % tiefer. Dies beruht, wie bereits in Kapitel 2.2.3.3 erläutert, einerseits auf neuen Datengrundlagen und einer neuen Berechnung des Faktors, andererseits auf Veränderungen bei den Flächen, auf welchen der Faktor angewandt wurde. Für 2020 wurde der Faktor nur bei Ackerland, Reben, Heimweiden sowie Dauerwiesen angewandt (wie bei der P-Abschwemmung), für 2010 bei allen Landnutzungen. Daher ergeben sich folgende Abnahmen des Faktors: 13 % bei Ackerland, 4 % bei Reben, 16 % bei Dauergrünland und für alle anderen Nutzungen im Schnitt 10 % (da hier 2020 kein Faktor angewandt wurde).

Sickerwasserfaktor

Analog zur Nitratauswaschung berechnet.

Drainagefaktor

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 diese Effekte auf die P-Auswaschung wurde ein Zuschlag von Faktor 6 auf den drainierten Flächen angewandt. Im Vergleich zu MODIFFUS 2010 wurde dieser Faktor nur auf denjenigen Teil der P-Fracht, der über die Drainage ausgewaschen wird, verwendet.

2.2.3.4 Nährstoffeinträge durch Erosion

Bodenerosion auf Ackerland

Unter Bodenerosion wird der Abtrag des Bodens durch Wasser auf Ackerland (inkl. Reb- und Gartenbau) verstanden. Die Höhe der potentiellen Bodenerosion wurde der Erosionsrisikokarte ERK2 (Abb. 8) entnommen, welche, wie bereits in Kapitel 2.1.6.1 beschrieben, unter Berücksichtigung der Hangneigung sowie -länge, der Niederschlagsverhältnisse und der Bodeneigenschaften berechnet wurde. Für die Berechnung der aktuellen Erosion wurden die ERK2 mit dem Bodenbedeckungs- und Bearbeitungsfaktor (C-Faktor) sowie dem Erosionsschutzfaktor (P-Faktor) verrechnet.

Die C-Faktoren wurden, wie bei MODIFFUS 2010, aus Daten des AUI-Betriebsnetzes (ca. 300 Betriebe) des Agrarumweltindikators „Erosionsrisiko“ abgeleitet. Sie beziehen sich jeweils auf 365 Tage und umfassen somit auch Phasen der Vorkultur sowie die Winternutzung (Prasuhn & Blaser, 2018). Aus diesen Daten konnte für den Zeitraum 2009-2019 ein mittlerer C-Faktor pro Kultur, aufgeschlüsselt nach drei Bodenbearbeitungsverfahren (Direkt- und Streifensaat, Mulchsaat und Pflug) sowie nach Berg- und Talregion (über bzw. unter 600 m ü. M.) abgeleitet werden (s. Prasuhn et al., 2023). Im Vergleich zu 2010 sind die C-Faktoren somit zusätzlich nach Bodenbearbeitungsverfahren sowie Höhenlage (Berg/Tal) differenziert worden und die Mittelwerte umfassen eine deutlich längere Zeitspanne. Da über die Arealstatistik keine kulturspezifische Differenzierung der Ackerfläche vorgenommen werden kann, musste ein gemeindespezifischer C-Faktor gebildet werden. Mit den Daten der Kulturartenverteilung pro Gemeinde (BLW, 2020b) konnte gemäss Anteil der Kulturen und des Bodenbearbeitungsverfahrens ein flächengewichteter mittlerer C-Faktor pro Gemeinde berechnet werden. Da die Unterscheidung der Lage von 600 m ü. M. nicht mittels BLW-Daten möglich war, wurde pro Gemeinde ein mittlerer C-Wert für die Berg- wie auch ein mittlerer C-Wert für die Talregion mit allen Kulturen gerechnet.

Für den P-Faktor (Erosionsschutzfaktor) liegen nach wie vor keine schweizweiten Daten vor, sodass dieser auf Annahmen zum Erosionsschutz (z. B. Querbearbeitung) abgeleitet wurde. Bei MODIFFUS 2010 wurde ein mittlerer Faktorwert für Ackerland, Reb- und Gartenbau von 0.7 verwendet. Für 2020 wurde der Faktor in Anlehnung an Bircher et al. (2021) auf 0.8 erhöht und liegt somit um 15 % höher als bei MODIFFUS 2010.

Der berechnete aktuelle Bodenabtrag hat von gesamthaft 494'012 t/ha/Jahr im Jahr 2010 um 28 % abgenommen und liegt für 2020 bei 353'512 t/ha/Jahr (s. Tab. 41). Diese Veränderung ist grösstenteils auf die methodischen Anpassungen der Berechnung der potentiellen Erosion zurückzuführen (bereits erläutert in Kap. 2.1.6.1).

Tabelle 41: Vergleich der aktuellen Erosion zwischen 2010 und 2020.

	2010			2020			Differenz 2010 zu 2020			
	Fläche (ha)	Mittlere Erosion (t/ha/Jahr)	Total Erosion (t/Jahr)	Fläche (ha)	Mittlere Erosion (t/ha/Jahr)	Total Erosion (t/Jahr)	Mittlere Erosion (t/ha/Jahr)		Total Erosion (t/Jahr)	
							(t/ha/Jahr)	%	(t/Jahr)	%
Acker	403'280	1.02	411'246	386'249	0.81	313'627	-0.21	-20	-97'619	-24
Gartenbau	3'650	0.89	3'233	4'165	0.68	2'831	-0.21	-23	-403	-12
Reben	15'405	5.16	79'533	14'955	2.48	37'054	-2.69	-52	-42'479	-53
Gesamt	422'335	1.17	494'012	405'369	0.87	353'512	-0.30	-25	-140'500	-28

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 erfolgte wie bei MODIFFUS 2010 in Abhängigkeit von 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 Begrenzung für die sonstige Erosion auf ein Minimum und Maximum festgelegt: 1200 mm/Jahr als Minimum und 2000 mm/Jahr als Maximum. Diese Werte wurden für MODIFFUS 2020 beibehalten. Zwischen den Extremwerten wurde ein exponentieller Ansatz verwendet, um die Entwicklung der sonstigen Erosion in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge zu gewichten. Dieses Vorgehen wurde übernommen, jedoch wurde auf Grund der beobachteten Zunahme der Starkniederschläge (s. Kapitel 2.2.2.1) der Anteil um 5 % erhöht (s. Tab. 42). Der Wert der sonstigen Erosion für Gletscher wurde in MODIFFUS 2010 auf Grund von Angaben aus der Literatur unabhängig des Niederschlages bei 25 kg/ha festgelegt. Dieser wurde in MODIFFUS 2020 auch um 5 % erhöht, da neben der Zunahme der Starkniederschläge der zunehmenden Gletscherrückgang (Klimawandel) und die schleppend nachwachsende, fixierende Vegetation zu einem erhöhten Erosionswert für die ehemals von Gletschern geprägten Flächen führt.

Tabelle 42: Effektminimum und Effektmaximum des Niederschlags. Exp = exponentieller Ansatz.

	Nieder- schlag (mm)	2010			2020		
		Sonstige Erosion	%	Resultat (Exp)	Sonstige Erosion	%	Resultat (Exp)
Min	1200	0.06	0.05	0.05	0.12	0.10	0.11
Max	2000	1.70	0.85	4.65	1.80	0.90	5.44

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. Daher wurde bei MODIFFUS für alle Acker-, Rebbau- und Gartenbauflächen ein mittlerer P-Gehalt des Oberbodens von 900 mg P/kg verwendet, welcher mittels P-Testzahlfaktor (gleicher wie bei P-Abschwemmung, siehe Kapitel 2.2.3.2) regional differenziert wird. Für N wurde für alle Gebiete ein Gehalt von 2'000 mg N/kg Boden angenommen.

Für den Nährstoffgehalt des Materials aus der sonstigen Erosion wurde ein Gehalt von 300 mg P/kg (Kalkstein und Dolomit) bis 400 mg P/kg (sonstige Gesteinsgruppen) und 600 mg N/kg bis 1'500 mg N/kg zu Grunde gelegt (Tab. 43); darüber hinaus wurde eine Unterteilung der unproduktiven Flächen in den Alpen vorgenommen. Die Ausgangswerte für N pro biogeografische Region sind die gleichen wie bei MODIFFUS 2010, jedoch hat das BAFU (2020b) die Einteilung der biographischen Regionen angepasst. Im Vergleich zu 2010 sind die Regionen nicht mehr an die Gemeinden gekoppelt, sondern orientieren sich an Einzugsgebieten. Insbesondere ist die Region Mittelland nun kleiner definiert, was zu einer Abnahme des schweizweiten mittleren Ausgangswertes von etwa 6 % führt.

Tabelle 43: Angenommener Stickstoffgehalt im Oberboden.

Biogeografische Regionen	mg N/kg
Jura	1'000
Mittelland	1'500
Voralpen	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) bei Ackerland, Rebbau sowie für MODIFFUS 2020 neu auch bei Gartenbau verwendet. Bei Materialeinträgen durch sonstige Erosion wurde keine Anreicherung angenommen.

Erosionsmaterialeintrag in Gewässer

Generell gelangt nur ein geringer Anteil des erodierten Bodenmaterials in die Oberflächengewässer (Remund et al., 2021). Wie bei MODIFFUS 2010 wurde mit Hilfe der GAK2 der Gewässeranschluss des jeweiligen Hektarrasters bestimmt, um eine Verfrachtung des erodierten Bodenmaterials in Abhängigkeit der regionalen Gegebenheiten zu erfassen. Die differenzierte Berücksichtigung des Eintrags erodierten Materials schlüsselt sich nach wie vor in Abhängigkeit der Klassifizierung des potentiellen Gewässeranschlusses auf (s. Abb. 4) auf:

Gewässeranschlusswahrscheinlichkeit niedrig = 10 % Erosionsmaterialeintrag ins Gewässer

Gewässeranschlusswahrscheinlichkeit mittel = 20 % Erosionsmaterialeintrag ins Gewässer

Gewässeranschlusswahrscheinlichkeit hoch = 30 % Erosionsmaterialeintrag ins Gewässer.

2.2.3.5 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 Zwecke der Fischerei 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, sodass 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, welche auch von Hürdler et al. (2015) so übernommen wurden.

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. 44). Einzige Anpassung im Vergleich zu MODIFFUS 2010 ist, dass die Nährstoffeinträge durch landwirtschaftliche und sonstige Direkteinträge bei P zu 50 % als gelöst und zu 50 % als partikulär angerechnet werden, im Vergleich zu 100 % gelöst im Jahr 2010.

Tabelle 44: Pauschale Frachtannahme landwirtschaftlicher und sonstiger Direkteinträge.

MODIFFUS Landnutzungs-kategorie	g P/ha	g N/ha
Landwirtschaftlich genutzte Fläche	10	50
Wald	50	500

2.2.3.6 Natürliche Hintergrundlast und diffus anthropogene N- und P-Einträge in Gewässer

Um die diffus anthropogenen Einträge sowie die landwirtschaftsbedingten diffusen Einträge berechnen zu können, ist eine Abschätzung der natürlichen Hintergrundlast notwendig. Die natürliche Hintergrundlast ist ein theoretischer Wert, der die N- und P-Einträge in die Gewässer unter potentiell natürlicher Vegetation und ohne anthropogene

Luftverschmutzung darstellt (s. Kap. 1.3). Die potentiell natürliche Vegetation in der Schweiz wäre unterhalb der Waldgrenze überwiegend unbewirtschafteter Wald (ausser Moore, Sumpf, Gewässer etc.) und oberhalb der Waldgrenze überwiegend unproduktive Vegetation (alpines Grasland, Zwergsträucher etc.) oder vegetationslose Flächen. Zur Berechnungsweise siehe Hürdler et al. (2015) und Prasuhn (2016).

Da es sich um die natürlichen Einträge von N und P handelt, sollten diese im Vergleich zu früheren MODIFFUS-Berechnungen eigentlich unverändert bleiben. Prasuhn (2016) hat aber für die natürliche Hintergrundlast der N-Einträge umfangreiche Abklärungen getroffen. Für die natürliche Hintergrundlast wurde in MODIFFUS 2010 eine Auswaschungsmenge von 10'500 t N berechnet, was bei einer natürlichen Waldfläche von rund 3'075'000 ha etwa 3.5 kg N/ha/Jahr entspricht (Hürdler et al., 2015). Nach Abklärungen mit Experten und Studium der Literatur wurde dieser Wert als zu hoch eingestuft. Es wurde daher neu ein flächenspezifischer Wert von 1.5 kg N/ha/Jahr für die Auswaschung in Waldflächen verwendet. Die gesamte natürliche Hintergrundlast wurde entsprechend von Prasuhn (2016) neu berechnet. Sie betrug gemäss Neuberechnung nur noch rund 9'000 t N statt rund 18'000 t N. Dieser Wert wurde für MODIFFUS 2020 unverändert übernommen (s. Kap. 3.3.5 & 3.3.6).

Für P gab es keine neuen Erkenntnisse. Entsprechend wurde in MODIFFUS 2020 die berechnete natürliche Hintergrundlast von MODIFFUS 2010 aus Hürdler et al. (2015) unverändert übernommen.

Die diffus anthropogenen N- und P-Einträge errechnen sich aus der Summe an Einträgen aus diffusen Quellen abzüglich der gesamten natürlichen Hintergrundlast. Diese Berechnungen wurden nur für die gesamten Stofffrachten der Schweiz durchgeführt und nicht auf Hektarrasterebene.

2.2.3.7 Landwirtschaftsbedingte diffuse Einträge

Die landwirtschaftsbedingten diffusen Stoffeinträge errechnen sich aus den diffusen Einträgen aus allen landwirtschaftlich genutzten Flächen (inklusive alpwirtschaftlich genutzten Flächen) abzüglich der natürlichen Hintergrundlast dieser Flächen. Für die natürliche Hintergrundlast wurde bei Stickstoff ein flächenspezifischer Verlust von 1.5 kg N/ha eingesetzt (s. Kap. 2.2.3.6). Dazu kommt noch der Anteil an den N-Verlusten unter anderen Flächen (Wald, unproduktive Vegetation, Fels, Gletscher, Gewässer), der aus landwirtschaftsbedingten NH₃-Emissionen resultiert. Nach Achermann et al. (2016) wurde angenommen, dass 71 % der diffus anthropogenen N-Einträge dieser Flächen aus NH₃-Emissionen aus der Landwirtschaft stammen, also landwirtschaftsbedingt sind, und 29 % aus Verkehr, Industrie und Haushalten stammen (s. Prasuhn, 2016).

Bei Phosphor wurden als natürliche Hintergrundlast der landwirtschaftlich genutzten Flächen die Werte der flächenspezifischen P-Einträge in Waldflächen von 0.48 kg/ha für Gesamt-P und 0.08 kg/ha für gelösten P gemäss MODIFFUS 2010 verwendet. Da der Wert für Gesamt-P auch die sonstige Erosion beinhaltet und die sonstige Erosion teilweise auch anthropogenen Ursprungs sein kann, wurde beim Gesamt-P noch ein Abzug von 25 % vorgenommen. Dieser korrigierte flächenspezifische Wert wurde dann auf die landwirtschaftlich genutzte Fläche übertragen.

Diese Berechnungen wurden nur für die gesamten Stofffrachten der Schweiz durchgeführt und nicht auf Hektarrasterebene.

3 Resultate und Diskussion

3.1 Wasserbilanz

Der mittlere jährliche Niederschlag über den Zeitraum von 1991 bis 2020 (= für MODIFFUS 2020 verwendete Zeitspanne bzw. Normperiode von MeteoSchweiz, Kap. 2.1.2) beträgt 1'355 mm (= 55'928 Mio. m³ für die gesamte Schweiz). Dieser Wert fällt um 3.5 % geringer aus im Vergleich zu 1999-2009 (s. Tab. 45). Gleichzeitig hat die mittlere Verdunstung um 2.9 % zugenommen, sodass der potentielle Abfluss nun bei 880 mm liegt (-6.6 % im Vergleich zu MODIFFUS 2010).

Tabelle 45: Wasserbilanz der Schweiz für die beiden Zeitperioden, die in MODIFFUS die Jahre 2010 und 2020 repräsentieren.

Wasserbilanz	Mio.m ³			mm			%
	2010	2020	Differenz	2010	2020	Differenz	
Niederschlag	57'983	55'928	-2'055	1'404	1'355	-50	-3.5
Verdunstung	19'007	19'580	572	462	475	13	2.9
potentieller Abfluss	38'900	36'245	-2'656	942	880	-62	-6.6

Geographisch sind die Unterschiede zwischen den alpinen und nicht alpinen Regionen der Schweiz sehr klar zu erkennen: in alpinen Regionen ist der mittlere Niederschlag deutlich höher (Abb. 22), die Verdunstung tiefer (Abb. 24) und somit der potentielle Abfluss höher (Abb. 26). Die Veränderung der Niederschläge in den beiden Normperioden MODIFFUS 2010 (1999-2009) und MODIFFUS 2020 (1991-2020) ist regional sehr unterschiedlich (Abb. 23). Dabei gibt es sowohl Zunahmen von über 150 mm, als auch Abnahmen von über 250 mm. Vor allem im alpinen und voralpinen Bereich sind die Veränderungen besonders gross. Die Veränderungen der Verdunstung sind ebenfalls regional sehr unterschiedlich und bewegen sich zwischen Zunahmen über 30 mm und Abnahmen von über 15 mm (Abb. 25). Da die Niederschläge gesamtschweizerisch abgenommen und die Verdunstung zugenommen haben, sind die Veränderungen und regionalen Unterschiede zwischen den beiden Zeitperioden beim potentiellen Abfluss noch grösser als beim Niederschlag und bei der Verdunstung. Sie reichen von einer Zunahme über 100 mm bzw. 5 % bis zu einer Abnahme von über 300 mm bzw. 20 % (Abb. 27 und 28).

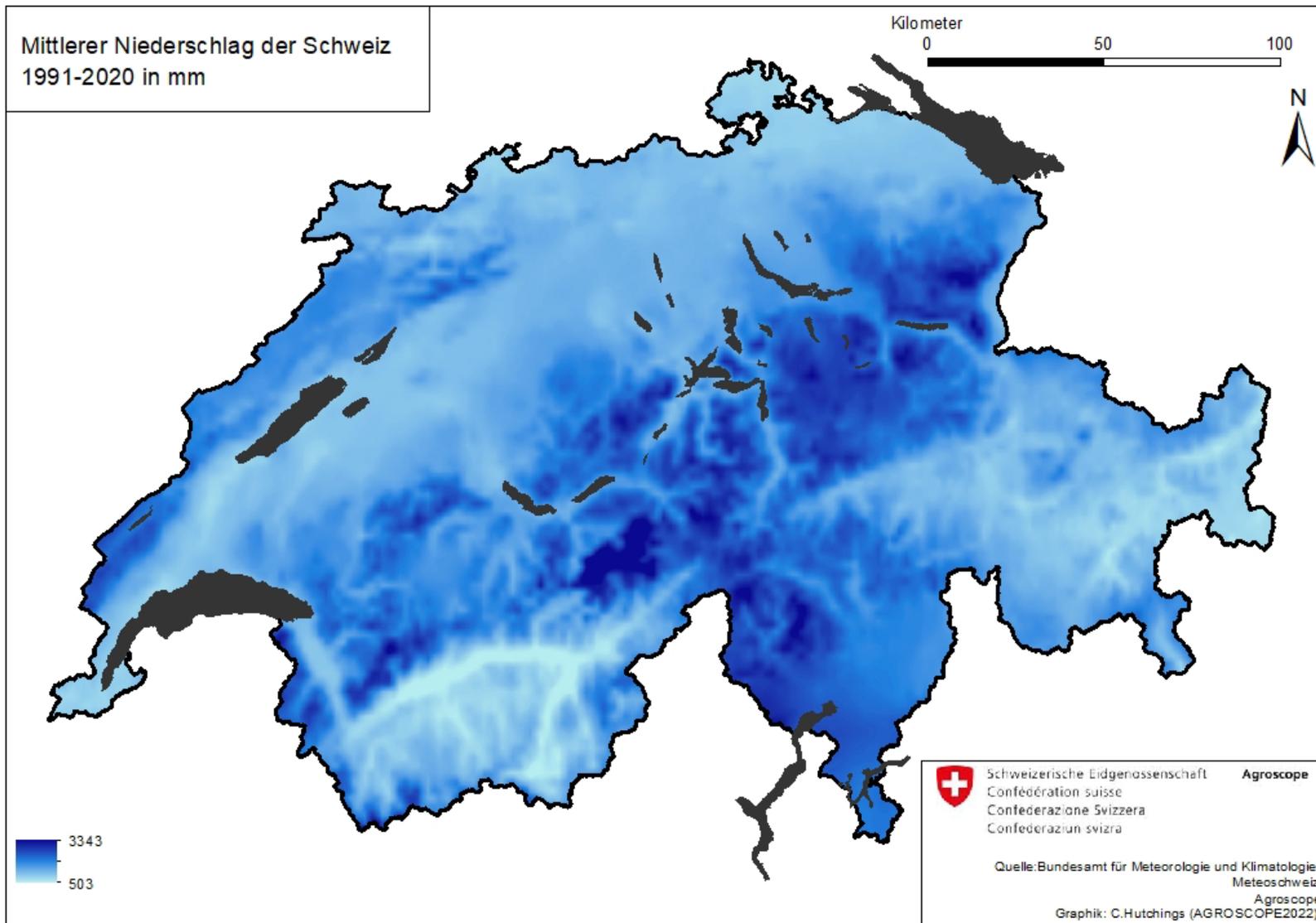


Abbildung 22: Mittlerer Niederschlag der Schweiz 1991 bis 2020 in mm.

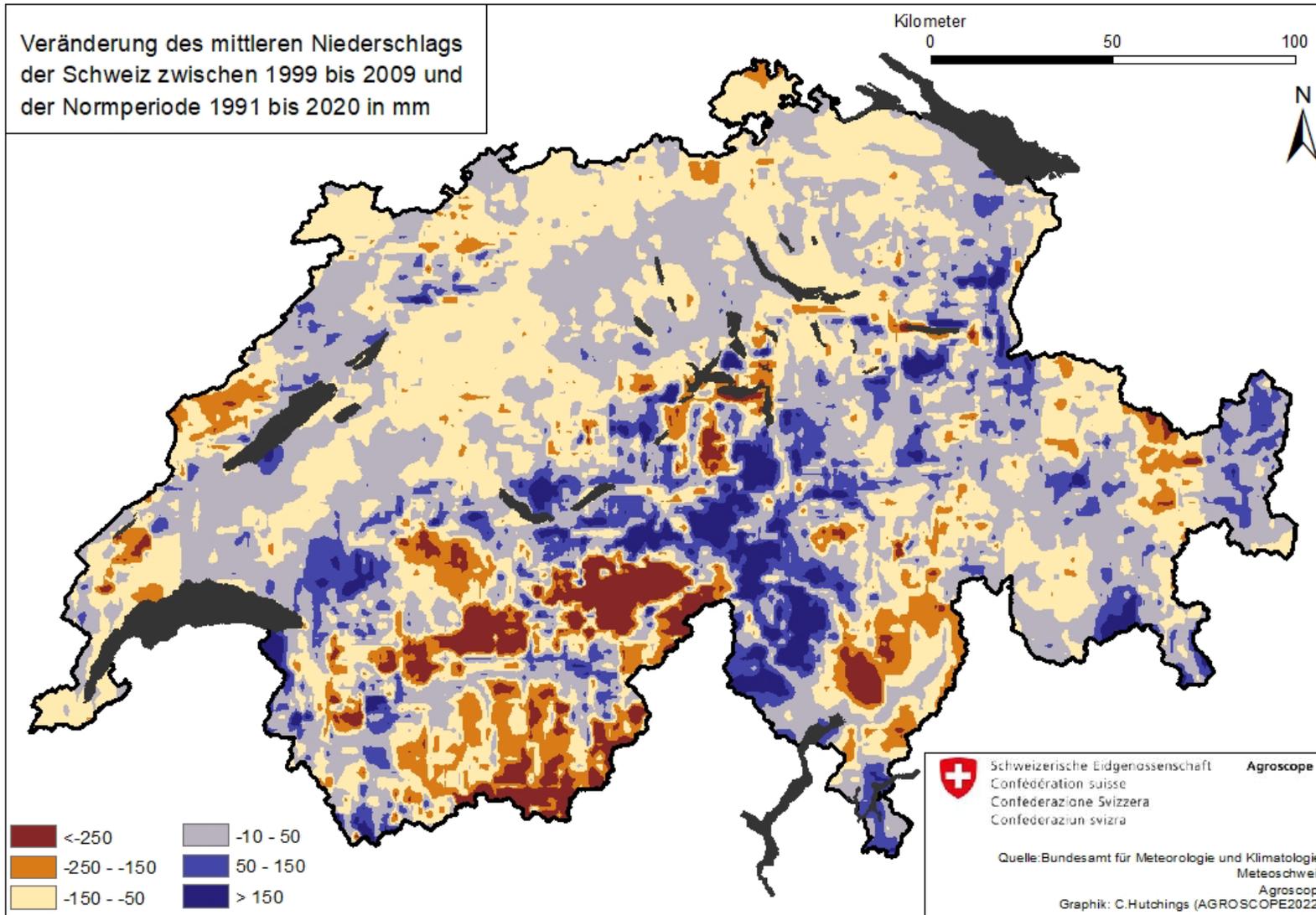


Abbildung 23: Veränderung des mittleren Niederschlags der Schweiz zwischen der Periode 1999 bis 2009 und der Normperiode 1991 bis 2020 in mm.

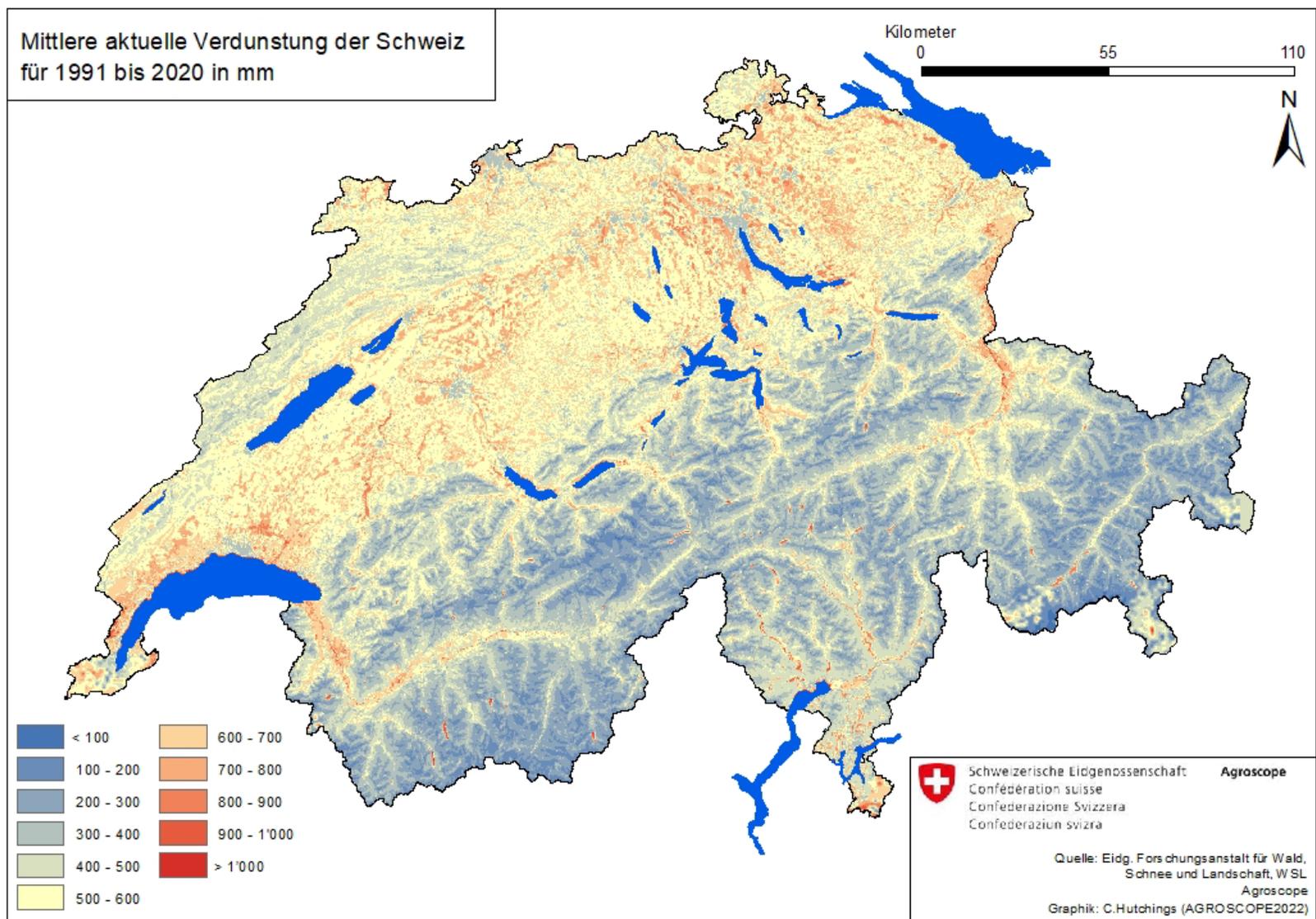


Abbildung 24: Mittlere aktuelle Verdunstung der Schweiz für 1991 bis 2020 in mm.

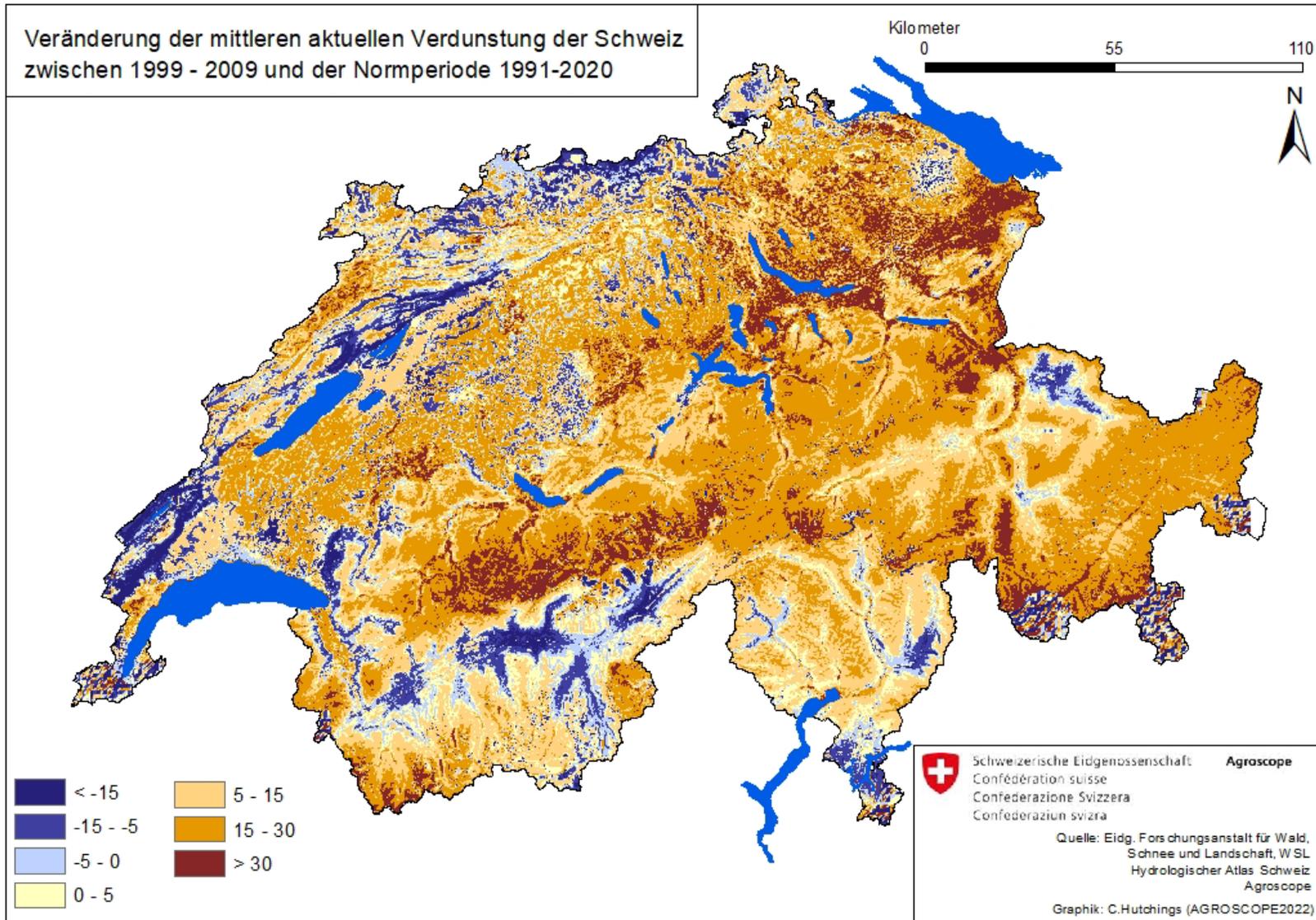


Abbildung 25: Veränderung der mittleren Verdunstung der Schweiz zwischen der Periode 1999 bis 2009 und der Normperiode 1991 bis 2020 in mm.

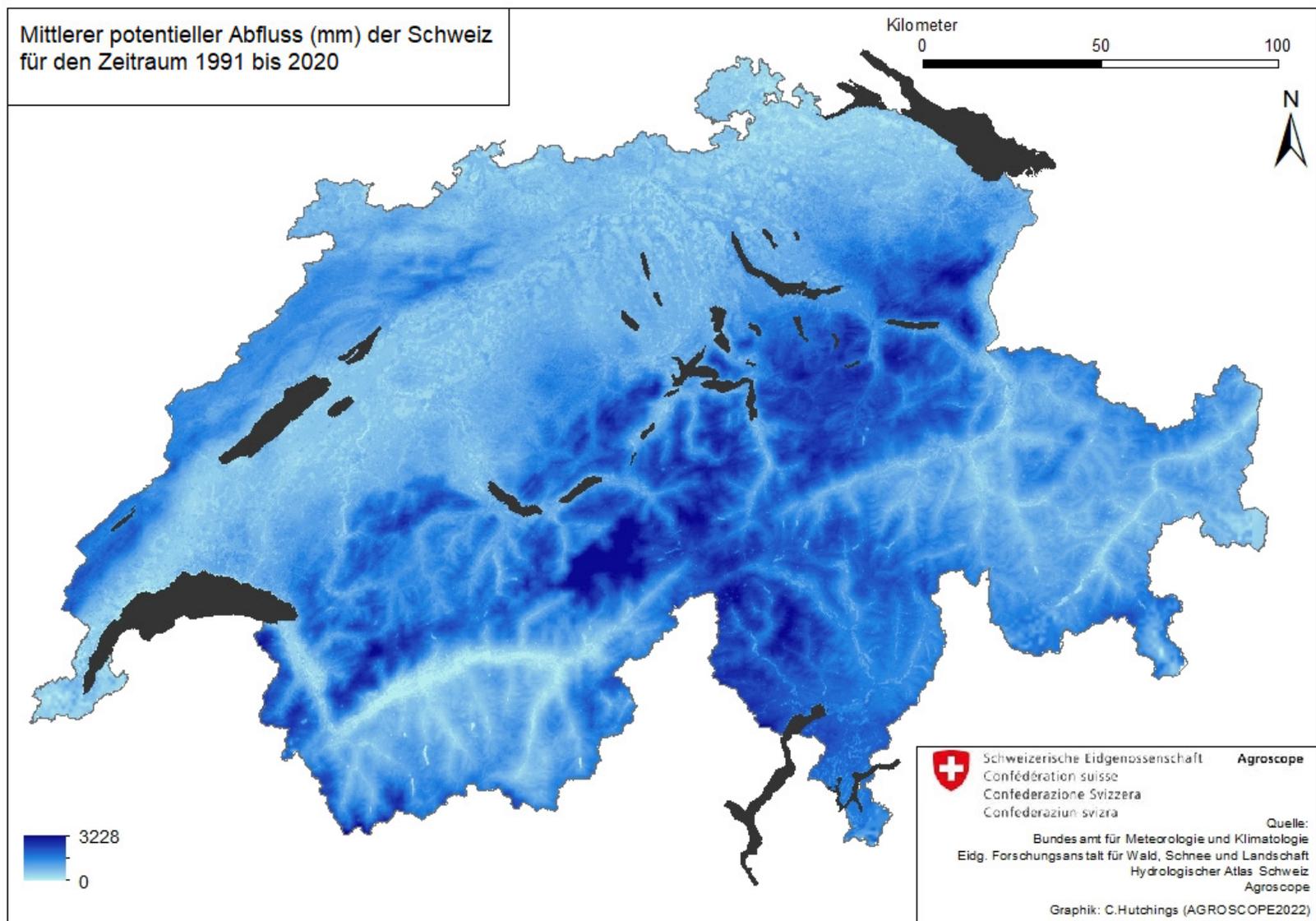


Abbildung 26: Mittlerer potentieller Abfluss der Schweiz für den Zeitraum 1991 bis 2020 in mm.

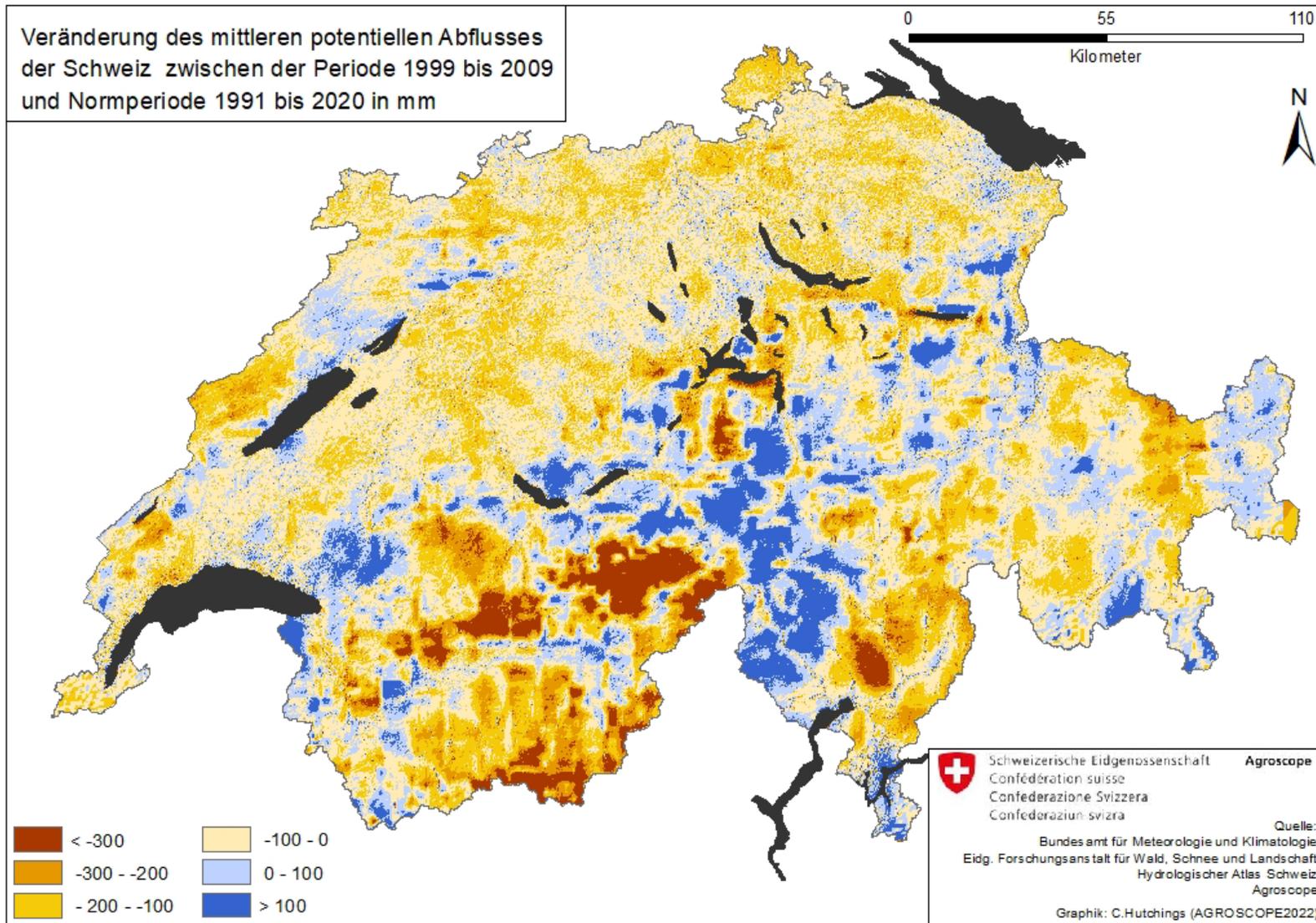


Abbildung 27: Veränderung des mittleren potentiellen Abflusses der Schweiz zwischen der Periode 1999 bis 2009 und der Normperiode 1991 bis 2020 in mm.

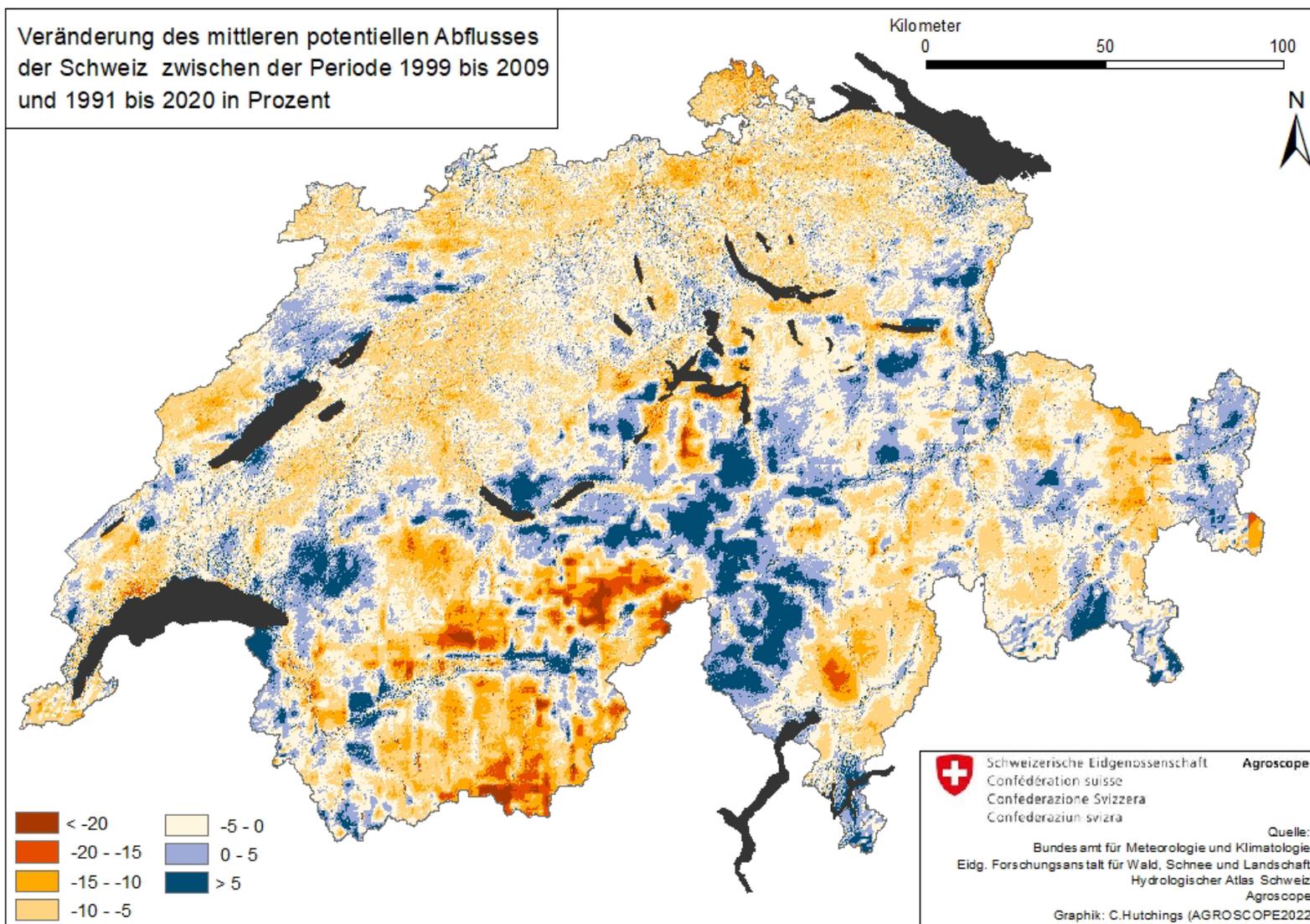


Abbildung 28: Veränderung des mittleren potentiellen Abflusses der Schweiz der Periode 1999 bis 2009 und der Normperiode 1991 bis 2020 in Prozent.

Diese für MODIFFUS 2020 modellierten Werte liegen in der gleichen Grössenordnung wie jene von der WSL, welche den Abfluss im Auftrag des BAFU modelliert hat (WSL, 2020b). Für den Zeitraum 2010 bis 2020 lag gemäss WSL der mittlere Abfluss bei 958 mm und somit um 8 % niedriger. Die Berechnung der Wasserbilanz seitens WSL wurde mittels dem Modell PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration HRU Model) vorgenommen, welches auch die Zu- oder Abnahmen von Speicherung in Gletschern, Schneedecken und im Boden sowie auch grössere Eingriffe in den natürlichen Wasserhaushalt beispielsweise durch Wasserkraftnutzung berücksichtigt (Zappa et al., 2017). In MODIFFUS handelt es sich jedoch um den potentiellen Abfluss ohne Berücksichtigung der Speicherung, da der Fokus auf den Emissionen von N und P liegt. Weiterhin stimmen die in MODIFFUS modellierten Werte mit jenen des Hydrologischen Atlas der Schweiz (Hades) überein: der mittlere jährliche potentielle Abfluss für 1961-1990 und die ganze Schweiz liegt gemäss Schädler & Hubacher (2002) bei 1019 mm, für den Zeitraum 1997-2007 für die Summe der grossen Einzugsgebiete der Schweiz bei 954 mm (Hubacher & Schädler, 2010) (s. Tab. 46).

Tabelle 46: Wasserbilanz gemäss Hydrologischem Atlas im Vergleich zu MODIFFUS.

Wasserbilanz	Hades		MODIFFUS	
	Tafel 6.3 1961-1990	Tafel 6.6* 1997-2007	2010	2020
Niederschlag	1482	1488	1'404	1355
Verdunstung	463	534	461	475
Abfluss (ohne Zu- und Abflüsse Ausland)	1017	975	-	-
potentieller Abfluss	1019	954	942	880

*Wasserhaushalt grosser Einzugsgebiete im 20. Jahrhundert: Rhein – Domat/Ems; Thur – Andelfingen; Töss – Neftenbach; Ergolz – Liestal; Birs – Münchenstein; Aare – Bern; Aare – Bern bis Brugg; Aare – Brugg bis Brugg; Reuss – Mellingen; Limmat – Zürich; Rhône – Porte du Scex; Ticino – Bellinzona; Tresa – Ponte Tresa; Poschiavino – Le Prese; Inn/En – Martina

3.1.1 Vergleich der Wasserbilanzen und mögliche Einflüsse klimatischer Änderungen

Da Änderungen bei der Wasserbilanz einen grossen Einfluss auf die Höhe der diffusen Stoffeinträge haben, wird im Folgenden aufgezeigt, warum in MODIFFUS 2020 eine längere Zeitperiode als in MODIFFUS 2010 gewählt wurde, welchen Einfluss bisherige und zukünftige klimatische Änderungen haben können und wie gross der Anteil der methodisch bedingten Veränderung im Vergleich zu den realen klimatischen Änderungen ist.

Im Vergleich zur Wasserbilanz in MODIFFUS 2010 hat der Niederschlag in MODIFFUS 2020 um 3.5 % abgenommen, die Verdunstung um 2.9 % zugenommen und der potentielle Abfluss somit um 6.6 % abgenommen (Tab. 47). Beim Vergleich der zwei Normperioden (1981-2010; 1991-2020) hat der Niederschlag um 1.9 % abgenommen, die Verdunstung um 5.0 % zugenommen und somit der Abfluss um 5.3 % abgenommen. Beim Vergleich der zwei 11-Jahres-Mittelwerte (1999-2009; 2010-2020) liegen die Differenzen dagegen deutlich höher, insbesondere beim Niederschlag. Hier fällt die jährliche Variabilität besonders hoch aus (Abb. 29). Der mittlere Jahresniederschlag in Abbildung 29 wurde aus Messdaten von 12 Meteostationen (verteilt über die ganze Schweiz) gebildet. Dies entspricht nicht den detaillierten Raster-Daten, verdeutlicht aber gut die jährliche Variabilität. In der Periode 1999-2009 gab es nur ein extremes Trockenjahr (2003), in der Periode 2010-2020 dagegen vier (2011, 2015, 2018, 2020) (Scherrer et al., 2022). Gemäss BAFU (2012; 2021a) sind aber klare Aussagen über vergangene Niederschlagsänderungen aufgrund der starken natürlichen Variabilität nur schwer möglich. Allfällige beobachtete Trends sind abhängig vom gewählten Zeitfenster und können geographisch unterschiedlich ausfallen. Es zeigt sich jedoch, dass sich der mittlere Jahresniederschlag der Schweiz seit Messbeginn kaum verändert hat (BAFU, 2021a). Auch in Zukunft werden keine Veränderungen erwartet, einzig beim Szenario ohne Klimaschutz wird für den Zeitraum 2070–2099 mit einer leichten Abnahme des mittleren Jahresniederschlages gerechnet. «*Stark ändern wird jedoch die saisonale Verteilung der Niederschläge mit einer Abnahme der Niederschläge im Sommer und einem Anstieg im Winter*» (BAFU, 2021a). Dies kann jedoch in MODIFFUS bisher nicht abgebildet werden.

Tabelle 47: Vergleich der Wasserbilanzen der unterschiedlichen Zeiträume.

	11-Jahresmittelwert				alte Norm	neue Norm	Differenz zwischen alter und neuer Norm		Differenz 1999-2009 zur neuen Norm	
	1999-2009	2010-2020	Differenz				1981-2010	1991-2020		
	mm	mm	mm	%	mm	mm	mm	%	mm	%
Niederschlag	1'404	1'320	-84	-6.0	1381	1'355	-27	-1.9	-50	-3.5
Verdunstung	462	507	45	9.8	453	475	23	5.0	13	2.9
potentieller Abfluss	942	813	-129	-13.7	928	880	-49	-5.3	-62	-6.6

Jahres-Niederschlag – Schweiz – 1864–2021
Verhältnis zum Durchschnitt 1961–1990

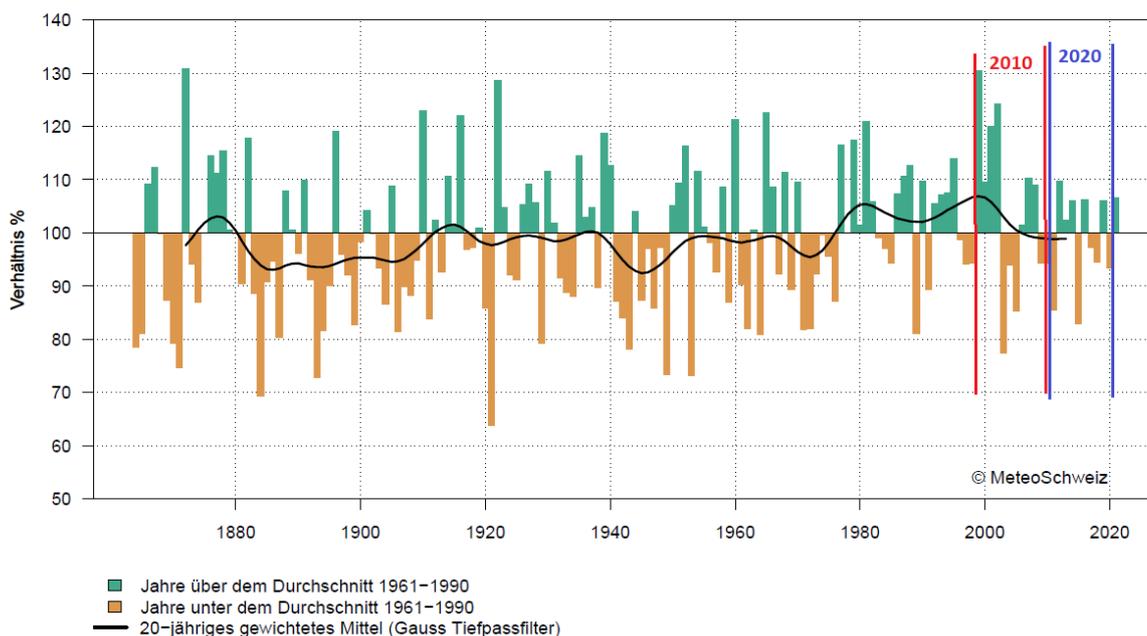


Abbildung 29: Jahresniederschlag Schweiz 1864 bis 2021 (Quelle: Meteoschweiz, 2022c, verändert).

Das Projekt Hydro-CH2018 (BAFU, 2021a) hat die Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässer und den Wasserhaushalt in der Schweiz untersucht. Der Bericht kommt unter anderem zu folgenden Ergebnissen:

Verdunstung:

Die längste Messreihe der Verdunstung in der Schweiz beginnt 1976 und stammt vom Rietholzbach-Lysimeter der ETH Zürich im Toggenburg (Seneviratne et al., 2012). In den letzten 40 Jahren konnte über diesem mit Gras bewachsenen Lysimeter kein signifikanter Trend bei der Verdunstung beobachtet werden. Die Verdunstung wurde aber meist als meteorologischer Parameter berechnet und nicht direkt gemessen. Die hydrologischen Szenarien zeigen bis Ende des Jahrhunderts eine Zunahme der mittleren Verdunstung in der Schweiz um 5 % mit konsequentem Klimaschutz und 10 % ohne Klimaschutz. Künftige Landnutzungsänderungen, durch die die Verdunstung sowohl zu- als auch abnehmen kann, werden von den Klimaszenarien bisher nicht oder nur teilweise berücksichtigt.

Abfluss

Die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse hat sich in den letzten Jahrzehnten bereits verändert. Die Abflüsse haben im Sommer ab- und im Winter zugenommen. Die Jahresabflussmengen in den Schweizer Fließgewässern variieren zwar zwischen einzelnen Jahren stark, ihr langjähriges Mittel hat sich aber seit Beginn der Abflussmessungen anfangs des 20. Jahrhunderts kaum verändert. Nur bei einem Zukunfts-Szenario ohne Klimaschutz wird es gegen Ende des Jahrhunderts zu einer leichten Abnahme der mittleren Jahresabflüsse kommen, im Mittel der Schweiz um rund 9 %.

Oberflächenabfluss

Bei ausgetrockneten Böden können wasserabweisende Effekte an der Bodenoberfläche auftreten, weshalb bei Starkniederschlagsereignissen während Trockenperioden weniger Wasser infiltrieren kann und mehr Wasser oberflächlich abfließt. Die prognostizierte Zunahme der Winterniederschläge (insbesondere in Form von Regen), sowie zu erwartende Zunahmen der Niederschlagsintensitäten dürften in Zukunft zu einer Zunahme von Oberflächenabfluss und Erosion führen.

Grundwasser

Im NAQUA ist über die gesamte Messperiode von derzeit rund 20 Jahren bisher kein genereller Trend bezüglich Quantität ersichtlich (BAFU, 2021a). Die Grundwasserneubildung variiert räumlich und zeitlich stark und beträgt über die gesamte Schweiz gemittelt etwa ein Drittel des Jahresniederschlags. Für drei Standorte im Mittelland wurde berechnet, wie sich die Neubildung aus Niederschlag bis Ende des Jahrhunderts verändern wird. Bei einem Szenario ohne Klimaschutz wird sie im Winter und Frühjahr leicht zu-, im Sommer abnehmen – bei einer negativen Jahresbilanz.

Auch nach Hunkeler et al. (2021) wird der Klimawandel die Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von der Höhenlage unterschiedlich stark beeinflussen: *«Unter pluvialen Bedingungen (unter 1000 m ü. M.) wird die saisonale Verteilung unregelmässiger, mit längeren Perioden mit geringer oder keiner Neubildung im Sommer und Herbst, die teilweise durch eine höhere Neubildung im Winter kompensiert wird. Bei pluvio-nivalen Verhältnissen (bis ~2500 m ü. M.) wird die Neubildung im Winter aufgrund der winterlichen Schmelzereignisse zunehmen und im Sommer ähnlich wie bei pluvialen Verhältnissen abnehmen. Bei nivo-glazialen Bedingungen (> 2500 m ü. M.) wird der Zeitraum mit geringer Neubildung im Winter kürzer werden, während die Neubildung im Sommer aufgrund der früheren Schneeschmelze und der höheren Evapotranspiration abnehmen wird.»*

Nach Hirschi et al. (2020) prognostizieren die CH2018-Szenarien in der Schweiz bis zum Ende des Jahrhunderts für den Sommer eine starke Erwärmung und eine Reduktion der Anzahl Regentage und eine damit verbundenen Tendenz für längere Trockenperioden. Die mit der Erwärmung verbundene erhöhte Verdunstung wird dabei zu einer verstärkten Austrocknung der Böden führen.

Gemäss den Ergebnissen eines im Projekt AgriAdapt (Holzkämper et al., 2020) eingesetzten kombinierten hydrologischen-hydraulischen Modells im Berner Seeland werden die abnehmenden Sommerniederschläge und zunehmenden Winterniederschläge auch zu einer saisonalen Verschiebung der Grundwasserneubildung führen. Insbesondere bei gleichzeitiger Zunahme der Wasserentnahmen für landwirtschaftliche Bewässerung kann dies zu starken saisonalen Grundwasserschwankungen führen, die noch zu untersuchende Implikationen auf Grundwasserqualität mit sich bringen können.

Nach Modellberechnungen von Zarrineh et al. (2020) im Einzugsgebiet der Broye würde die prognostizierte Verringerung der Sommerniederschläge die Nitratauswaschungsfracht um 25 % reduzieren; die Nitratkonzentrationen würden jedoch aufgrund der geringeren Verdünnung um 14 % ansteigen. Der Anstieg der Winterniederschläge würde die Nitratauswaschung um 44 % erhöhen, was zu einem Anstieg der Nitratkonzentration um 11 % führen würde, obwohl Abfluss und Verdünnung zunehmen würden.

Scherrer et al. (2022) haben Daten zum Bodenwassergehalt und zur Evapotranspiration aus Reanalysen, klimatische Wasserbilanzbeobachtungen an Messstationen sowie Temperatur- und Niederschlagsdaten aus regionalen Klimamodellen genutzt, um Trends und Ursachen der Sommertrockenheit in der Schweiz in den letzten 40 Jahren (1981-2020) zu bewerten. Die beobachtete klimatische Wasserbilanz und der Bodenwassergehalt aus Reanalysen zeigen eine klare Tendenz zur Austrocknung mit abnehmendem Trend in den meisten Monaten vom Frühling bis zum Herbst (klimatische Wasserbilanz: -39 mm pro Dekade, 0-1 m integrierte Bodenwassermenge: -5 bis -7 mm pro Dekade). Zunehmende Evapotranspiration (potentielle Evapotranspiration: +21 mm pro Dekade; reale Evapotranspiration: +8 bis +15 mm pro Dekade) und ein nicht signifikanter Rückgang der Niederschläge (-17 mm pro Dekade) wurden als wichtigste und ungefähr gleichwertige Triebkräfte identifiziert.

Für die Beurteilung der Resultate der MODIFFUS-Berechnungen wurde angenommen dass die Differenz der zwei Normperioden die reale klimatische Veränderung abbildet. Somit schätzen wir, dass bei der beobachteten Abnahme des potentiellen Abflusses um 6.6 % zwischen MODIFFUS 2010 und 2020 rund ein Viertel methodisch bedingt ist und drei Viertel auf realen klimatischen Veränderungen beruhen.

3.2 Wasserflüsse

Die Wasserflüsse (Oberflächenabfluss, Drainageabfluss, Sickerwasser) wurden aus der potentiellen Abflussmenge abgeleitet. Änderungen gegenüber den in MODIFFUS 2010 berechneten Wasserflüssen resultieren daher vor allem aus der veränderten potentiellen Abflussmenge (s. Kap. 3.1). Weitere Einflussfaktoren auf die Höhe der Wasserflüsse sind die Veränderungen bei der Landnutzung, der drainierten Fläche und bei den Faktoren zur Berechnung der verschiedenen Wasserflüsse (z. B. prozentualer Anteil Oberflächenabfluss an der potentiellen Abflussmenge, Gewässeranschluss, Abschwemmungsrisiko Böden etc.; s. Kap. 2.2.2).

Schweizweit fällt im Mittel mit 70.6 % der grösste Teil der potentiellen Abflussmenge auf das Sickerwasser in Richtung Grundwasser (Tab. 48). 27.0 % der potentiellen Abflussmenge entfallen auf Oberflächenabfluss und 2.4 % auf Drainageabfluss; beides Wasserflüsse in Richtung Oberflächengewässer.

Bei der regionalen Verteilung gibt es sehr grosse Unterschiede. Gut zu erkennen sind in Abbildung 30 weisse Bereiche, in denen es keinen Oberflächenabfluss gibt. Hierbei handelt es sich um Waldbestände unter 1200 m 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, für die bei der MODIFFUS-Berechnung meistens (ausser bei Karst, Bergschutt etc.) ein sehr hoher Anteil des potentiellen Abflusses als Oberflächenabfluss angenommen wurde.

Gegenüber den berechneten Oberflächenabflüssen in MODIFFUS 2010 hat der Oberflächenabfluss in MODIFFUS 2020 im Mittel um 22 mm bzw. 8.4 % abgenommen (Tab. 48). Es gibt jedoch grosse regionale Unterschiede mit Zunahmen von bis zu mehr als 50 mm und Abnahmen von bis zu mehr als 100 mm (Abb. 31).

Beim Sickerwasser stellen die weissen Bereiche in Abbildung 32 den Gegensatz zu den in Abbildung 30 dunkelblauen Bereichen dar. Da auf vegetationslosen Flächen 100 % des potentiellen 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. 32). Deutlich heben sich die voralpinen und alpinen Gebiete ab, sowie das Tessin. Das ist auf die hohen Niederschlagswerte zurückzuführen.

Gegenüber den in MODIFFUS 2010 berechneten Sickerwassermengen hat der Sickerwasserabfluss in MODIFFUS 2020 im Mittel um 40 mm bzw. 6.2 % abgenommen (Tab. 48). Es gibt jedoch auch hier grosse regionale Unterschiede mit Zunahmen von bis zu mehr als 100 mm und Abnahmen von bis zu mehr als 150 mm (Abb. 33).

In Gebieten mit landwirtschaftlicher Nutzung (Ackerland, Grasland) tritt zusätzlich Abfluss unter drainierten Flächen auf. Die Abflussmenge aus Drainagen hat in MODIFFUS 2020 um 1 mm bzw. 4.3 % gegenüber MODIFFUS 2010 abgenommen (Tab. 48; nicht als Karte dargestellt).

Tabelle 48: Aufteilung des potentiellen Abflusses auf die Wasserflüsse der beiden Zeitperioden, die in MODIFFUS die Jahre 2010 und 2020 repräsentieren.

Wasserflüsse	Mio.m ³			mm				% Anteil an potentielltem Abfluss		
	2010	2020	Differenz	2010	2020	Differenz	(%)	2010	2020	
	Mio. m ³			mm				(%)	2010	2020
Oberflächenabfluss	10'716	9'811	-905	260	238	-22	-8.4	27.5	27.0	
Drainageabfluss	894	856	-37	22	21	-1	-4.3	2.3	2.4	
Sickerwasserabfluss	27'305	25'609	-1'696	661	621	-40	-6.2	70.2	70.6	

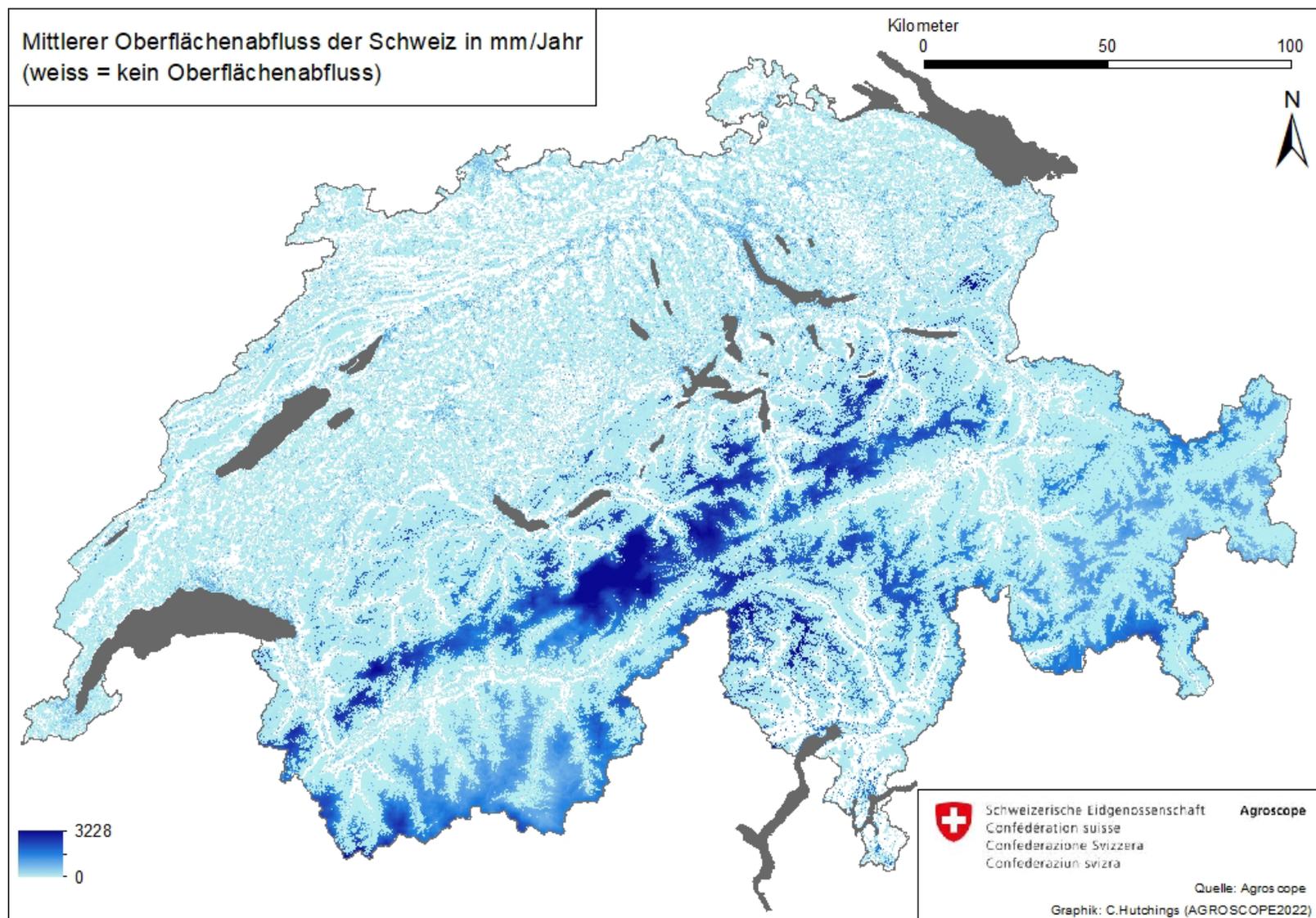


Abbildung 30: Mittlerer Oberflächenabfluss der Schweiz in mm pro Jahr.

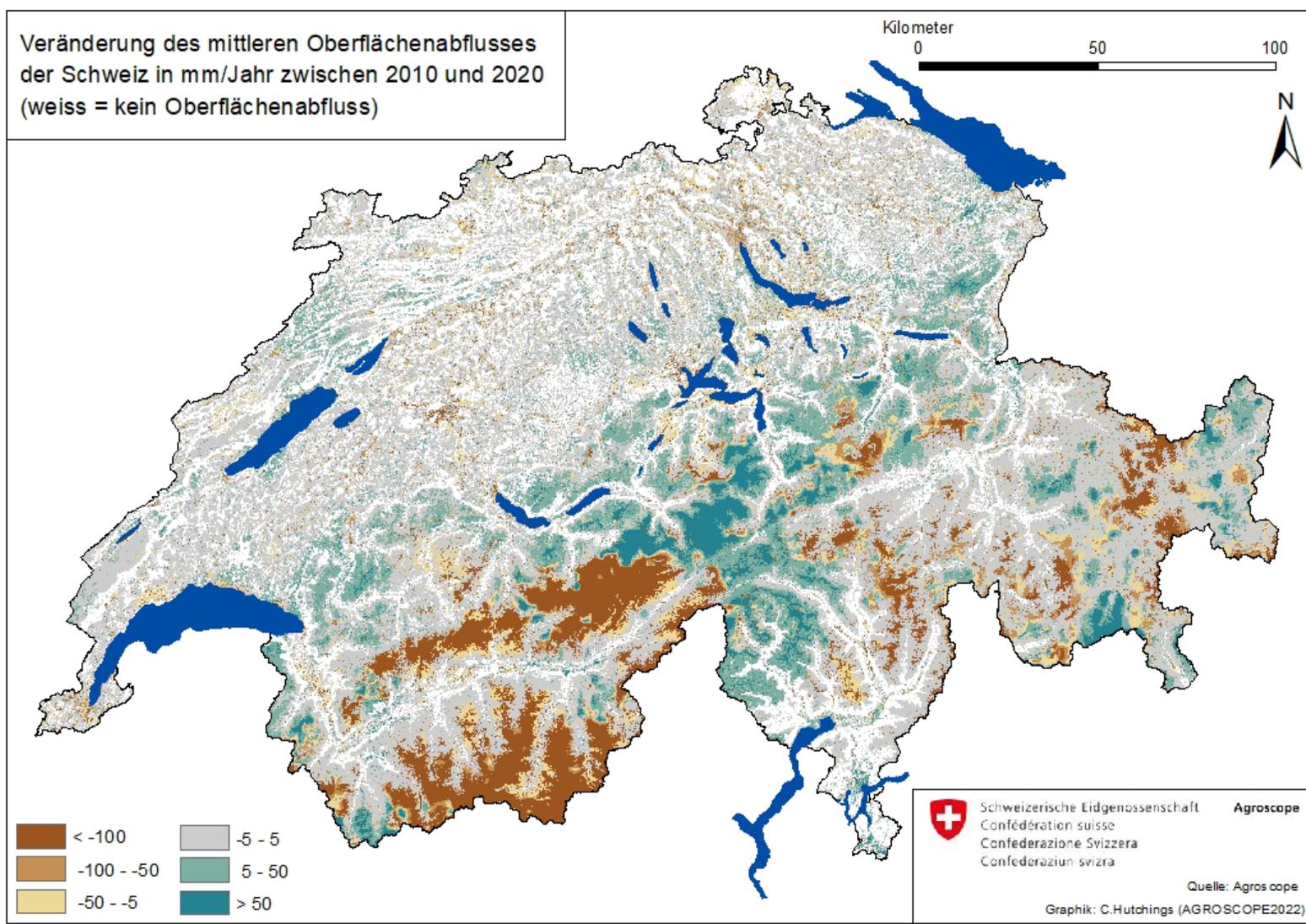


Abbildung 31: Veränderung des mittleren Oberflächenabflusses der Schweiz in mm pro Jahr zwischen 2010 und 2020.

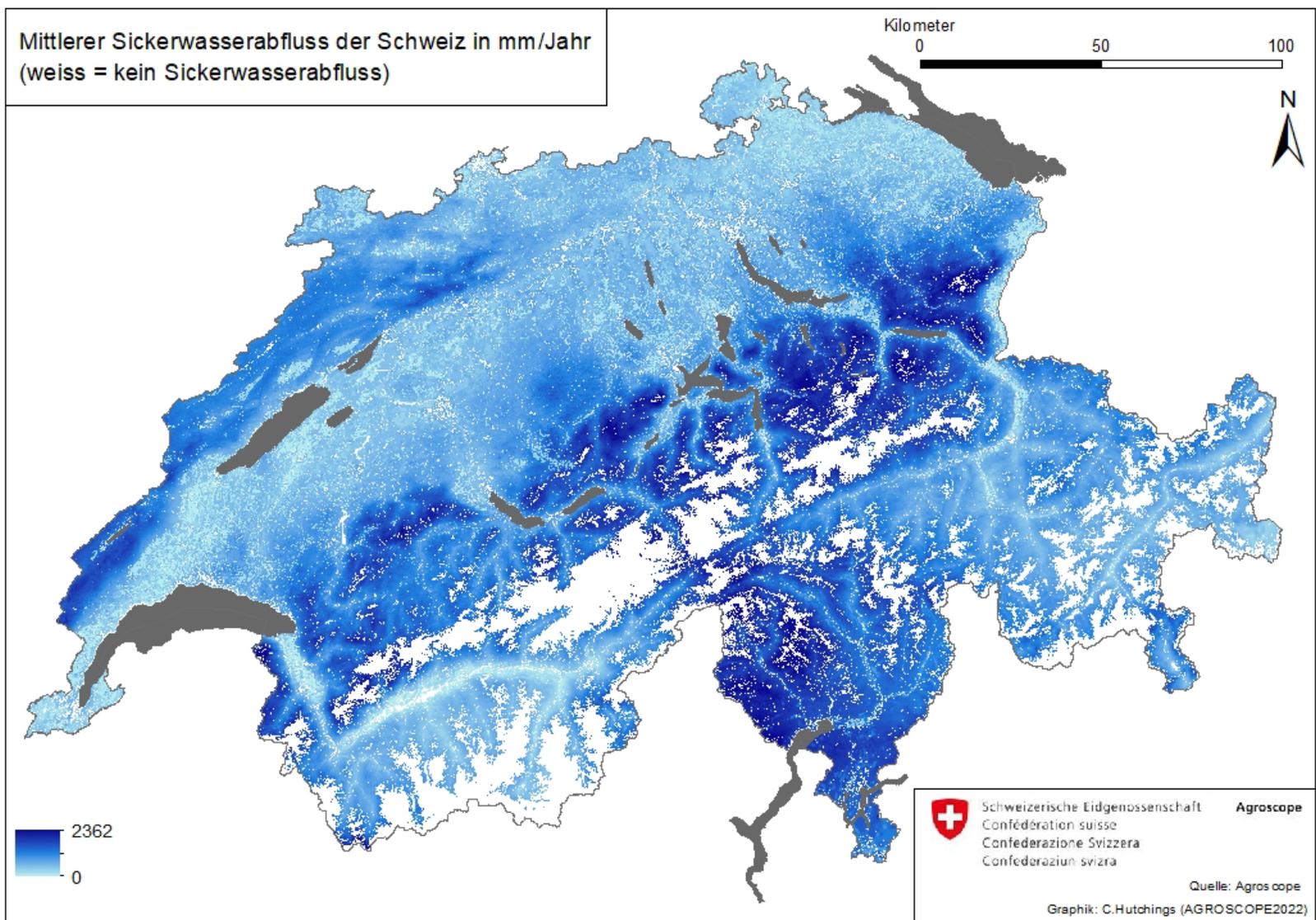


Abbildung 32: Mittlerer Sickerwasserabfluss der Schweiz in mm pro Jahr.

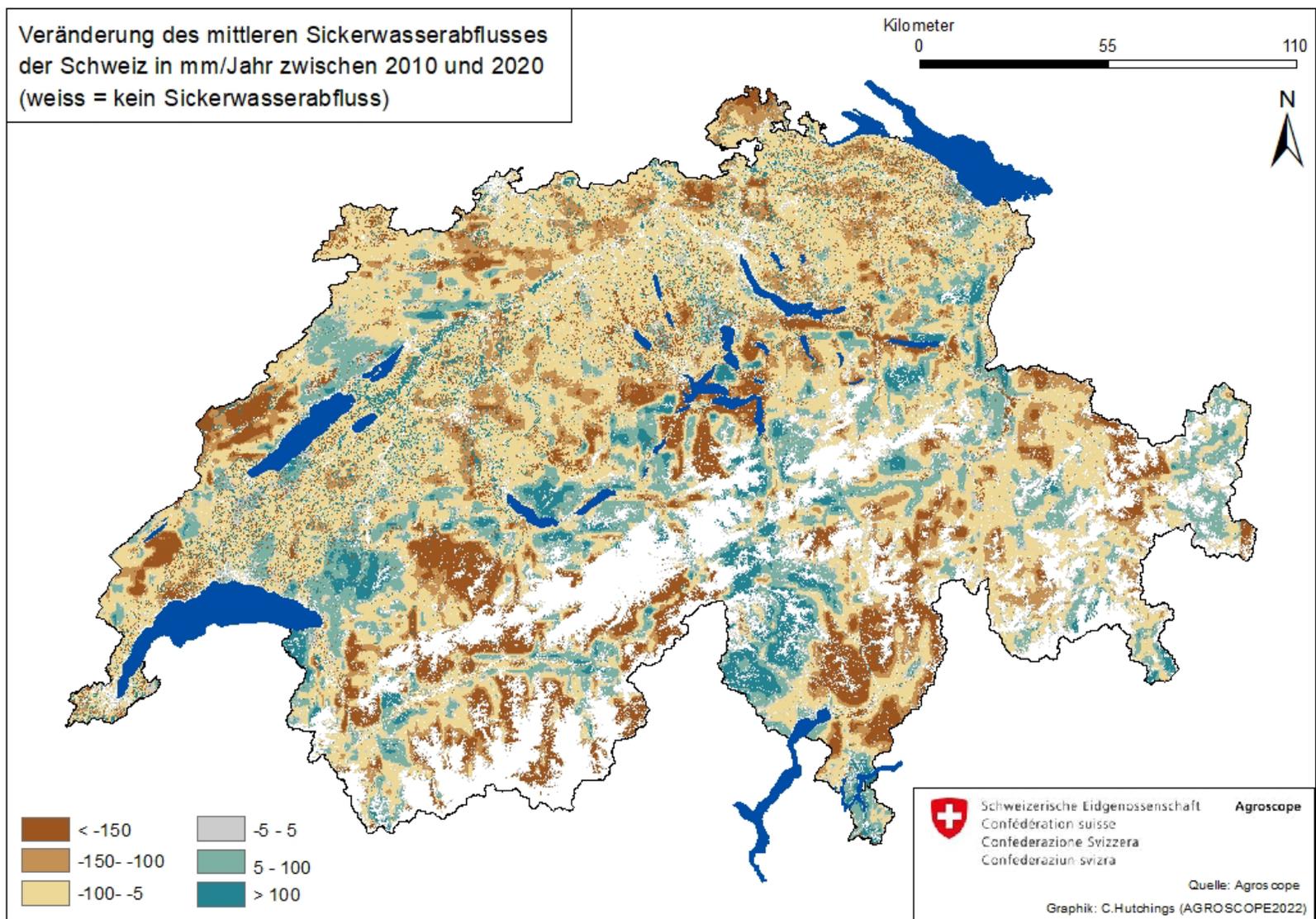


Abbildung 33: Veränderung des mittleren Sickerwasserabflusses der Schweiz in mm pro Jahr zwischen 2010 und 2020.

3.3 Gesamt-Stickstoff- und Phosphoreinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer der Schweiz

Zunächst wird ein Überblick über die wichtigsten Ergebnisse der Berechnungen mit MODIFFUS für das Jahr 2020 in grafischer und tabellarischer Form gegeben. Diese Zusammenstellung soll insbesondere auch einen direkten Vergleich der Gesamt-N-, Gesamt-P- und gelösten P-Einträge ermöglichen. Im Detail werde dann in den Kapiteln 3.3.2 bis 3.3.4 die Gesamt-N-, Gesamt-P- und gelösten P-Einträge separat dargestellt und diskutiert. Weiterhin wird in Kapitel 3.3.1 ein erster Überblick über die wichtigsten Veränderungen der Ergebnisse und der Berechnungsweisen mit MODIFFUS 3.1 (2020) gegenüber MODIFFUS 3.0 (2010) gegeben.

3.3.1 Übersicht über die Nährstoffeinträge 2020 und den Veränderungen zu 2010

Beim Gesamt-Stickstoff wurden gemäss unseren Berechnungen und den gelieferten Daten zu den Punktquellen (22'189 t aus ARA, 630 t aus Mischwasserentlastungen) insgesamt rund 70'000 t in die Gewässer der Schweiz eingetragen (Abb. 34). Die diffusen Einträge machen mit rund 47'500 t N mehr als zwei Drittel (68 %) aus (Tab. 49). Knapp die Hälfte (46 %) der totalen N-Einträge sind landwirtschaftsbedingt. Betrachtet man nur die diffusen N-Einträge, sind mit rund 38'700 t N 81 % diffus anthropogene Einträge, 19 % sind natürliche Hintergrundlast. Mit rund 32'500 t N sind 68 % der diffusen Einträge landwirtschaftsbedingt und 32 % stammen aus anderen diffusen Quellen.

Beim Gesamt-Phosphor wurden gemäss unseren Berechnungen und den gelieferten Daten zu den Punktquellen (580 t aus ARA, 82 t aus Mischwasserentlastungen) insgesamt rund 4'000 t in die Gewässer eingetragen (Abb. 34). Die diffusen Einträge dominieren mit rund 3'400 t P bzw. 84 %. Die Gesamt-P-Einträge werden durch die natürliche Hintergrundlast aus der sonstigen Erosion im alpinen Raum dominiert. Nur 13 % der totalen Gesamt-P-Einträge sind landwirtschaftsbedingt. Betrachtet man nur die diffusen Gesamt-P-Einträge, sind mit rund 900 t P 27 % diffus anthropogene Einträge, 73 % sind natürliche Hintergrundlast (Tab. 49). Mit rund 530 t P sind 16 % der diffusen Einträge landwirtschaftsbedingt und 84 % stammen aus anderen diffusen Quellen.

Beim gelösten P wurden gemäss unseren Berechnungen und den gelieferten Daten zu den Punktquellen (580 t aus ARA, 82 t aus Mischwasserentlastungen) insgesamt rund 1'400 t in die Gewässer eingetragen (Abb. 34). Die diffusen Einträge überwiegen mit rund 740 t P bzw. 53 % knapp. Nur 27 % der totalen gelösten P-Einträge sind landwirtschaftsbedingt. Betrachtet man nur die diffusen gelösten P-Einträge, sind rund 440 t bzw. 60 % diffus anthropogene Einträge, 40 % sind natürliche Hintergrundlast. Rund 380 t P bzw. 51 % der diffusen Einträge sind landwirtschaftsbedingt und 49 % stammen aus anderen diffusen Quellen (Tab. 49).

Tab. 49: Diffuse, diffus anthropogene und landwirtschaftsbedingte diffuse Stoffeinträge in die Gewässer der Schweiz 2020.

	Gesamt-N	Gesamt-P	Gelöster P
Diffuse Quellen	47'515	3'380	744
Diffus anthropogene Quellen	38'684	914	443
Landwirtschaftsbedingte diffuse Einträge	32'433	531	382

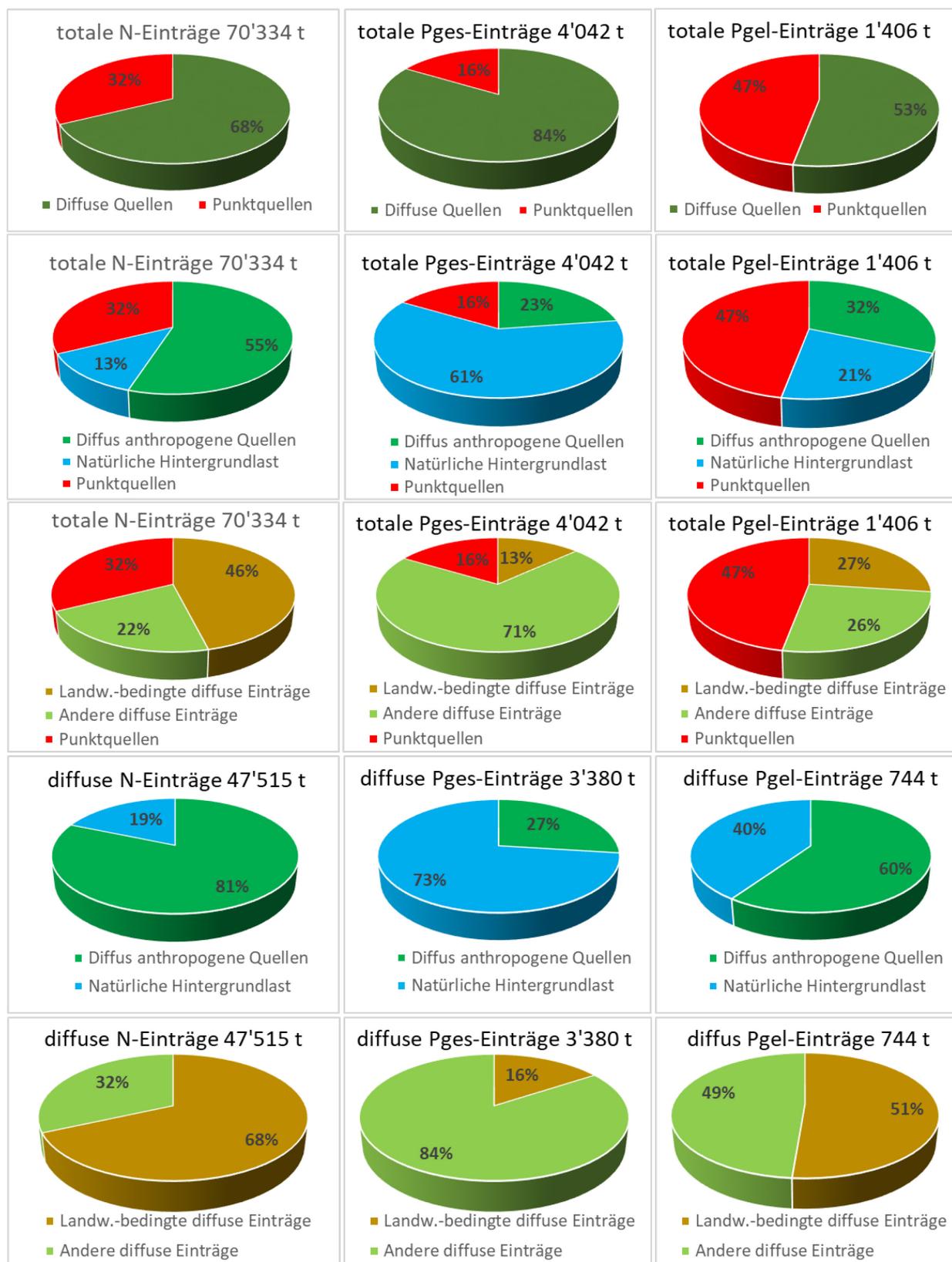


Abbildung 34: Überblick über die totalen und diffusen Gesamt-N-, Gesamt-P- und gelösten P-Einträge in die Gewässer der Schweiz 2020 mit den prozentualen Anteilen verschiedener Quellen.

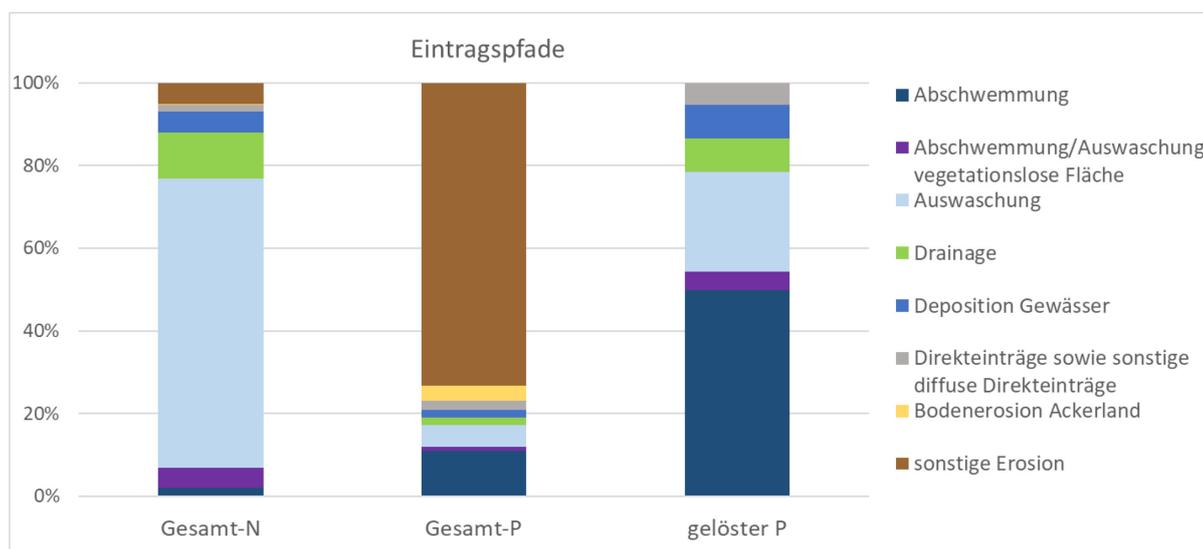
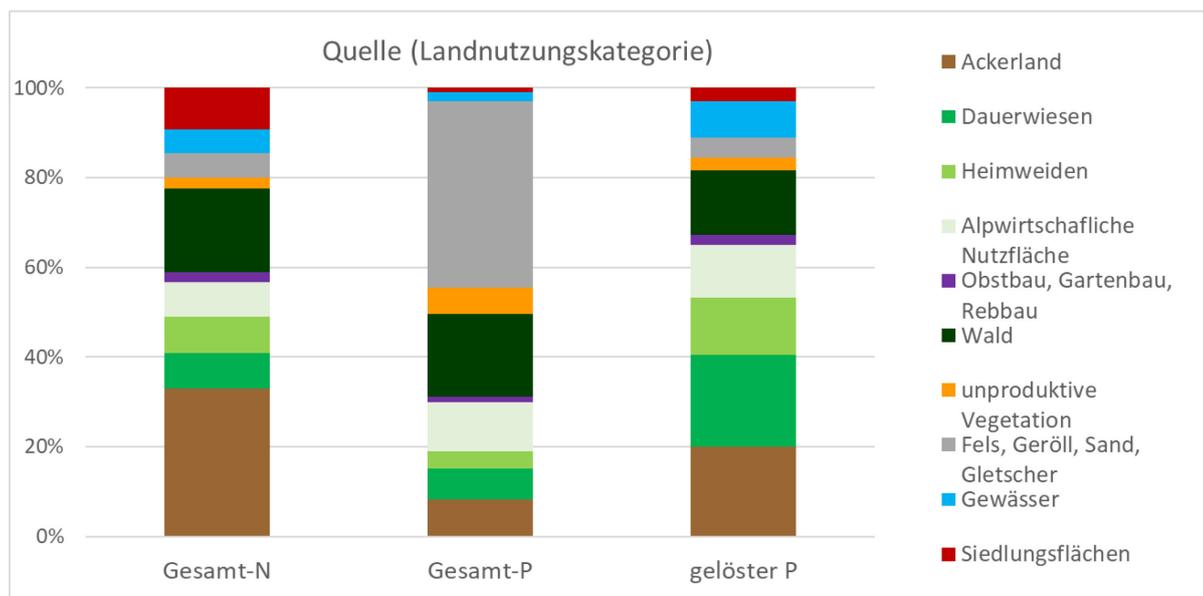


Abbildung 35: Überblick über die prozentuale Aufteilung der diffusen Stoffeinträge in die Gewässer der Schweiz nach: a) Quellen (Landnutzungskategorie); b) Eintragspfade.

Bei den diffusen Gesamt-N-Einträgen ist die wichtigste Eintragsquelle das Ackerland (33 %) gefolgt vom Wald (19 %) (Abb. 35). Aus der landwirtschaftlich genutzten Fläche stammen 59 % der diffusen N-Einträge. Beim diffusen Gesamt-P dominieren die Einträge aus Fels, Geröll und Gletschern mit 42 %. Aus der landwirtschaftlich genutzten Fläche stammen nur 31 % der diffusen Gesamt-P-Einträge. Beim diffusen gelösten P sind die wichtigste Eintragsquelle das Ackerland und die Dauerwiesen mit jeweils 20 %. Aus der landwirtschaftlich genutzten Fläche stammen mit 67 % mehr als zwei Drittel der diffusen gelösten P-Einträge.

Bei den diffusen Eintragspfaden dominieren je nach Stoff unterschiedliche Pfade: Beim Gesamt-N mit 70 % die Auswaschung, beim Gesamt-P mit 73 % die sonstige Erosion und beim gelösten P mit 50 % die Abschwemmung (Abb. 35).

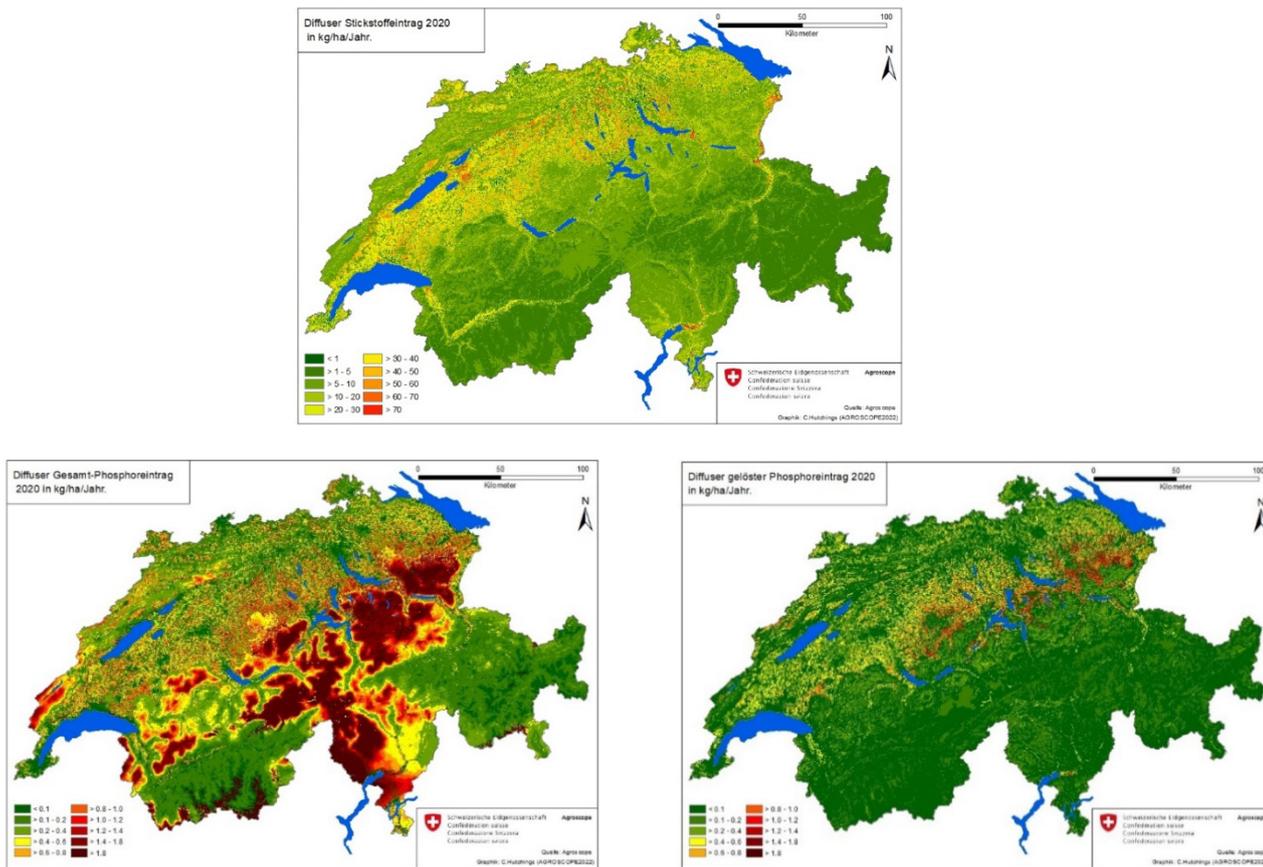


Abbildung 36: Diffuse Gesamt-N-, Gesamt-P- und gelöste P-Einträge in die Gewässer der Schweiz 2020 (grössere Karten siehe Abbildungen 37, 40, 43).

Bei der räumlichen Verteilung der verschiedenen Stoffeinträge gibt es grosse regionale Unterschiede (Abb. 36). Die höchsten diffusen N-Einträge erfolgen im Mittelland, die höchsten Gesamt-P-Einträge in den Alpen und die höchsten gelösten P-Einträge in den Voralpen.

In Tabelle 50 werden die Resultate der Berechnungen mit MODIFFUS 3.1 für 2020 den Resultaten von MODIFFUS 3.0 für 2010 gegenübergestellt. Dabei wurden bei den Veränderungen beurteilt, zu welchem Anteil sie methodisch bedingt sind und zu welchem Anteil sie auf reale Veränderungen z. B. durch Änderungen in der landwirtschaftlichen Nutzung und Bewirtschaftung beruhen. Detailliertere Ausführungen finden sich dazu in Kapitel 3.3.2 sowie in den entsprechenden Methodenkapiteln.

Tabelle 50: Übersicht der schweizweiten N- und P-Einträge der Jahre 2010 und 2020, sowie Abschätzung des Anteils der realen oder methodisch bedingten Veränderungen mit Auflistung der Hauptgründe.

	Fracht (t)		Veränderung 2010 zu 2020				Hauptgründe reale Veränderungen	Hauptgründe methodisch bedingte Veränderungen
	2010	2020	t	%	Real	Methodisch		
Gesamt-Stickstoff	51'492	47'515	-3'977	-7.7	3/4	1/4	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme landwirtschaftlich genutzte Fläche um 2 % (Haupteintragsquelle bei N ist Ackerland, Flächenabnahme 4.6 %) Abnahme Sickerwasser Abnahme Stickstoffdeposition (15 %) 	<ul style="list-style-type: none"> Neu Berücksichtigung Stickstoffdeposition in Wald: + 27 % N-Auswaschung Wald Hofdüngereffektor -> Abnahme Anpassung der Ausgangswerte für N-Auswaschung unter Ackerland
Gesamt-Phosphor	3'489	3'380	-109	-3.1	1/6	5/6		
gelöster Phosphor	909	744	-165	-18.1	1/4	3/4	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme landwirtschaftlich genutzte Fläche um 2 % Abnahme Intensität der Bewirtschaftung (Acker/Kunstwiese, Wiese, Weide) Abnahme Oberflächenabfluss sowie Sickerwasser 	<ul style="list-style-type: none"> P-Gehalt Boden → Abnahme um 10 % Hofdüngereffektor → Abnahme Drainage → leichte Zunahme
partikulärer Phosphor	2'580	2'636	+56	+ 2.2	1/3	2/3	<ul style="list-style-type: none"> Zunahme Starkniederschläge Abnahme Niederschläge um 2 % Abnahme Gletscherflächen um 10 % 	<ul style="list-style-type: none"> Neue Erosionsrisikokarte und andere Aggregationsmethode auf ha → Abnahme 20-25 % P-Gehalt Boden -> Abnahme um 10 % sonstige Einträge + 50 %, da in 2010 zu 100 % gelöst angerechnet

3.3.2 Gesamt-Stickstoff

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 oder aus Laub- und Streueintrag) mit 7 % der Gesamt-N-Einträge relativ gering. Im Folgenden werden also immer Gesamt-N-Einträge dargestellt.

Der Gesamt-Stickstoffeintrag aus diffusen Quellen für 2020 beläuft sich auf 47'515 t (Tab. 51). Das entspricht einem flächenspezifischen diffusen Eintrag von durchschnittlich 11.5 kg N/ha/Jahr. Ackerland hat mit 15'647 t N den höchsten Anteil (33 %) an den gesamten N-Einträgen, gefolgt von Wald (< und > 1200 m ü. M.) mit 19 % und Siedlungsgrünflächen mit 8 %. Aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen stammen insgesamt 59 % aller diffusen N-Einträge (s. auch Abb. 35).

Die flächenspezifischen N-Einträge sind mit 40.6 kg/ha beim Gartenbau am höchsten, gefolgt von Ackerland (40.3 kg/ha), Rebbau (31.8 kg/ha) und Siedlungsgrünflächen (23.0 kg/ha). Die niedrigsten flächenspezifischen N-Einträge ergeben sich unter unproduktiver Vegetation mit 4.0 kg/ha (Tab. 51).

Gegenüber den Berechnungen für 2010 ergibt sich insgesamt eine Abnahme der diffusen N-Einträge von 3978 t bzw. 8 %. Die grösste absolute Veränderung ergibt sich beim Ackerland mit einer Abnahme von 3802 t. Hauptursache dafür ist die Abnahmen der Ackerfläche und die Abnahme der Sickerwassermenge unter Ackerland (s. Tab. 51). Beim Wald gab es dagegen eine Zunahme von 1508 t N. Diese ist aber überwiegend methodisch bedingt, da neu die N-Deposition im Wald stärker berücksichtigt wurde. Auch bei der Landnutzungskategorie Fels, Geröll, Sand gab es mit -1157 t N eine grössere Veränderung. Diese ist teils real (Abnahme N-Deposition), teils methodisch bedingt. Begründungen zu den Veränderungen der anderen Landnutzungskategorien siehe Tabelle 54.

Tabelle 51: Gesamt-Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer der Schweiz – nach absoluter Höhe der Einträge 2020 sortiert. Grün hinterlegt = Zunahmen gegenüber 2010; blau hinterlegt = Abnahmen gegenüber 2010.

	2010		2020		Anteil an Gesamt-N (%)		Differenz 2010 zu 2020	
	kg N/ha	t N	kg N/ha	t N	2010	2020	t N	%
Ackerland	47.8	19'449	40.3	15'647	37.8	32.9	-3802	-20
Wald = <1200 m	6.1	4765	7.9	6219	9.3	13.1	1453	31
Siedlungsgrün	23.0	3680	23.0	3986	7.1	8.4	306	8
Heimweiden	21.8	3664	21.6	3849	7.1	8.1	184	5
Dauerwiesen	11.8	4044	11.2	3734	7.9	7.9	-310	-8
Alpwirtschaftliche Nutzfläche	7.7	3964	7.4	3698	7.7	7.8	-267	-7
Wald > 1200 m	5.1	2590	5.0	2646	5.0	5.6	55	2
stehende Gewässer	14.5	2072	13.7	1959	4.0	4.1	-113	-6
Fels, Geröll, Sand	6.7	3101	4.2	1944	6.0	4.1	-1157	-37
unproduktive Vegetation	4.1	1221	4.0	1215	2.4	2.6	-6	-1
Gletscher	7.7	882	6.6	681	1.7	1.4	-201	-23
Rebbau	32.8	516	31.8	493	1.0	1.0	-22	-4
Strassen ausserorts	12.7	392	11.5	462	0.8	1.0	70	18
fließende Gewässer	18.0	581	14.0	459	1.1	1.0	-122	-21
Obstbau	12.5	383	12.1	337	0.7	0.7	-45	-12
Gartenbau	41.8	189	40.6	188	0.4	0.4	-1	-1
Siedlung überbaut	0.0	0	0.0	0	0.0	0.0	0	0
Strassen innerorts	0.0	0	0.0	0	0.0	0.0	0	0
Total	12.5	51'493	11.5	47'515	100	100	-3978	-7.7

Tabelle 52: Diffuse Gesamt-Stickstoffeinträge 2010 und 2020, aufgeschlüsselt nach Eintragspfaden.

Pfade	N t		Anteil an Gesamt-N		Veränderung 2010 zu 2020		Abschätzung der Gründe der Veränderung (%)	
	2010	2020	2010	2020	t	%	Real	Methodisch
Abschwemmung	4'816	3'239	9.4	6.8	-1'577	-32.7	3/4	1/4
Auswaschung + Drainage	40'708	38'595	79.1	81.2	-2'113	-5.2	1/2	1/2
Deposition Gewässer	2'635	2'400	5.1	5.0	-236	-8.9	5/6	1/6
Landwirtschaftliche Direkteinträge sowie sonstige diffuse Direkteinträge	720	729	1.4	1.5	9	1.2	1	0
Bodenerosion Ackerland	182	142	0.4	0.3	-40	-21.9	1/4	3/4
sonstige Erosion	2'431	2'411	4.7	5.1	-21	-0.8	1/2	1/2
TOTAL	51'493	47'515	100	100	-3978	-7.7	3/4	1/4

Betrachtet man die diffusen N-Einträge hinsichtlich der Eintragspfade, überwiegen die Einträge über Auswaschung/Drainage mit 38'595 t bzw. 81 % eindeutig (Tab. 53, Abb. 35). N-Einträge über Abschwemmung erreichen 8 %, sonstige Erosion und Deposition auf Gewässer jeweils 5 %. Die grösste absolute Veränderung gegenüber den Berechnungen von 2010 ergibt sich bei Auswaschung/Drainage mit einer Abnahme von 2113 t N bzw. 5 %. Diese

Abnahme ist zur Hälfte methodisch, zur Hälfte real bedingt (s. dazu Tab. 54). Mit 1577 t N bzw. 33 % gab es auch bei der Abschwemmung eine grosse Abnahme, welche zu zwei Dritteln real bedingt ist.

Tabelle 53: Diffuser Gesamt-N-Eintrag über Auswaschung sowie Drainage für 2020 pro Landnutzungskategorie.

	Landnutzung	Flächenanteil pro Landnutzungskategorie (%)	kg N/ha	Summe t N	Anteil (%) an gesamt t pro Pfad	
Drainage	Ackerland	33	34.2	4'343	81.7	
	Alpwirtschaftliche Nutzfläche	1	7.2	30	0.6	
	Gartenbau	19	36.1	32	0.6	
	Heimweiden	12	19.0	407	7.7	
	Obstbau	11	10.1	31	0.6	
	Rebbau	6	25.6	23	0.4	
	Dauerwiesen	14	9.4	447	8.4	
	Total Drainage	5	25.9	5'313	100.0	
Sickerwasser	Drainierte Flächen	Ackerland	33	8.8	1'111	3.3
		Alpwirtschaftliche Nutzfläche	1	2.9	12	0.0
		Gartenbau	19	9.1	8	0.0
		Heimweiden	12	5.1	110	0.3
		Obstbau	11	2.5	8	0.0
		Rebbau	6	5.5	5	0.0
		Dauerwiesen	14	2.9	136	0.4
	Nicht Drainierte Fläche	Ackerland	67	37.5	9'791	29.4
		Alpwirtschaftliche Nutzfläche	99	6.0	2'983	9.0
		Gartenbau	81	38.3	143	0.4
		Heimweiden	88	19.9	3'105	9.3
		Obstbau	89	11.2	277	0.8
		Rebbau	94	30.0	439	1.3
		Dauerwiesen	86	9.7	2'796	8.4
		Siedlungsgrün	100	23.0	3'986	12.0
		Strassen ausserorts	100	7.4	295	0.9
		unproduktive Vegetation	100	2.8	850	2.6
		Wald = <1200	100	6.9	5'404	16.2
		Wald > 1200	100	3.5	1'823	5.5
		Total	100	8.1	33'281	100.0

Da Auswaschung/Drainage der dominante Eintragspfad bei den diffusen N-Einträgen ist, wurde diese in Tabelle 53 noch getrennt nach Auswaschung und Drainage und für die verschiedenen Landnutzungen dargestellt. Über Drainagen gehen 5313 t N bzw. 14 % der Auswaschung/Drainage-Einträge in die Oberflächengewässer, 86 % über das Sickerwasser ins Grundwasser. Ein Drittel der gesamten Auswaschungsverluste und 82 % der Drainageverluste stammen aus dem Ackerland.

In Tabelle 54 wurde versucht, die Veränderungen zwischen den Berechnungen von 2010 und 2020 zu erklären. Dazu wurde abgeschätzt, wie gross der Anteil methodisch bedingter Veränderungen ist und wie gross der Anteil ist, der auf realen Veränderungen von Landnutzung, Klima, Bewirtschaftung etc. zurückzuführen ist. Unterschiedliche Punkte sind dabei verschieden zu gewichten, da sie die Berechnung der N-Einträge in die Gewässer unterschiedlich

stark beeinflussen. Daher können die angegebenen Prozentzahlen nicht zusammengerechnet werden. Die Anteile der methodisch bedingten bzw. realen Veränderungen konnte aus folgenden Gründen nicht eindeutig quantifiziert, sondern nur grob abgeschätzt werden:

- Zusammenspiel von diversen unterschiedlichen realen Veränderungen und methodischen Anpassungen, welche teils zu einer Zunahme, teils zu einer Abnahme der N-Frachten führten
- unterschiedlich starke Gewichtung bezüglich des Einflusses auf die Berechnung der N-Einträge
- Faktoren oder andere Veränderungen (real/methodisch) beziehen sich nur auf gewisse Landnutzungen. Sie sind daher auch nicht gleich zu gewichten wie Veränderungen, die die ganze Schweiz betreffen. Aber da gewisse Landnutzungen bzw. Pfade mehr zum gesamten N-Eintrag als andere beitragen, sind diese wiederum stärker zu gewichten.

Im Methodenkapitel (Kap. 2) sind die Berechnungsweisen ausführlich beschrieben.

Abbildung 37 zeigt die räumliche Verteilung der diffusen N-Einträge in die Gewässer der Schweiz im Hektarraster. Hohe Einträge erfolgen vor allem im Mittelland. Gebiete mit den höchsten Einträgen sind z. B. das Berner Seeland, das Rhonetal zwischen Monthey und Villeneuve, die Ebene bei Oensingen, das Rheintal zwischen Bad Ragaz und Diepoldsau, die Linthebene vor dem Zürichsee oder die Magadinoebene. In Abbildung 38 sind die absoluten, in Abbildung 39 die prozentualen Veränderungen gegenüber den Ergebnissen von 2010 dargestellt. Grosse Veränderungen gab es vor allem im Mittelland. Hier besteht aber ein buntes Mosaik zwischen Zu- und Abnahmen. Tendenziell überwiegen im westlichen Mittelland die Abnahmen, im Bereich der Luzerner Mittellandseen die Zunahmen.

Tabelle 54: Übersicht der relevanten realen und methodisch bedingten Veränderungen inklusive Abschätzungen des jeweiligen Anteils pro Eintragspfad.

Abschwemmung		
3/4	Real	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme der Stickstoffdeposition (t N) um 15 % (Abnahme Konzentration geringer, da Niederschlag abgenommen hat) Abnahme des mittleren Niederschlags um 1.9 % (Vergleich der zwei Normwerte für MODIFFUS 2010 und 2020 Abnahme der Abschwemmung gesamthaft um 3.5 %)
	Real und methodisch	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme Oberflächenabfluss um 8.5 %: <ul style="list-style-type: none"> Abnahme des potentiellen Abfluss $\frac{1}{4}$ methodisch und $\frac{3}{4}$ real (weniger Oberflächenabfluss) reale Veränderung Landnutzung (-/+ Oberflächenabfluss) Erhöhung des prozentualen Anteils des Oberflächenabflusses am potentiellen Abfluss um 10 % aufgrund der Zunahme der Starkniederschläge (methodisch sowie real bedingt; mehr Oberflächenabfluss).
1/4	Methodisch	<ul style="list-style-type: none"> Verrechnung der Ausgangswerte für Heimweiden und Dauerwiesen mit dem Dauerwiesen- und Weideintensitätsfaktor führt zu einer Abnahme der Ausgangswerte (\emptyset 3 %); Anpassung des Ausgangswerts für alpwirtschaftliche Nutzfläche (-3 %) Abnahme des mittleren Niederschlags um -1.6 % auf Grund der Umstellung auf Normwerte (gesamthafte Abnahme 3.5%, real ist 1.9 %) Einführung eines Hofdüngerfaktors. Dies hat jedoch kaum Auswirkungen auf das schweizweite Resultat, da der Faktor um 4 % höher liegt bei Heimweiden, 0.5 % bei Ackerland und bei allen anderen Nutzungen tiefer (9-0.5 %) und somit im Schnitt etwa bei 1 liegt.
Drainage + Auswaschung		
1/2	Real	<ul style="list-style-type: none"> Gegensätzliche Veränderungen: Abnahme des N-Eintrags von Ackerland um 20 % (3/4 real, 1/4 methodisch) und Zunahme des N-Eintrags von Wald um 27 % (fast 100 % methodisch bedingt). Anteil des N-Eintrags am gesamten Eintrag: Wald 19 %, Acker 40 %. Bei den anderen Landnutzungen kommt es insgesamt netto kaum zu einer Veränderung und der Anteil methodisch bedingt und real ist gleich gross.
1/2	Methodisch	
Ackerland		
2/3	Real	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme Ausgangswert um 1 % auf Grund der Kulturartenzusammensetzung Abnahme der Fläche um 4.7 % Abnahme Sickerwassermenge um 13 % (1/5 davon jedoch methodisch bedingt auf Grund der Umstellung bei der Norm für Niederschlag und Verdunstung sowie Umstellung der Berechnung mit Konzentrationen anstelle Frachten) Abnahme des Ausgangswert um 1-2 % auf Grund der bodenschonenden Bearbeitung (dies wurde zwar in der Methodik neu berücksichtigt, aber der Anteil bodenschonender Bearbeitung hat auch real zugenommen)
1/3	Methodisch	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme Ausgangswert Ackerland um 4 % auf Grund der Anpassung Ausgangswerte pro Kultur Abnahme des Hofdüngerfaktors um 2.5 % N-Eintrag auf drainierten Flächen um 10% tiefer, da der Drainagefaktor anders angewendet wurde
Wald		
	Real	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme des Sickerwasserfaktors um 0.5 % Zunahme der Waldfläche um 1.5 %
fast 100 %	Methodisch	<ul style="list-style-type: none"> Einführung des N-Depositionsfaktor für Wald
Alle anderen relevanten Flächen		

1/4	Real	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme des Sickerwassers (Abnahme Faktor knapp 1 %) Fläche der anderen relevanten Landnutzungen nahm teils zu, teils ab (total jedoch kaum Veränderung)
3/4	Methodisch	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme Hofdüngerfaktor (2.5 %)
Deposition Gewässer		
5/6	Real	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme der Stickstoffdeposition (kg/ha) um 16 % (Abnahme Konzentration geringer, da der Niederschlag abgenommen hat) Abnahme des mittleren Niederschlags um 1.9 % (Vergleich der zwei Normwerte, Vergleich MODIFFUS 2010/2020 Abnahme gesamt um 3.5 %)
1/6	Methodisch	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme des mittleren Niederschlags um -1.6 % auf Grund von der Umstellung auf Normwerte (gesamthafte Abnahme 3.5 %, real ist 1.9 %)
landwirtschaftliche Direkteinträge sowie sonstige diffuse Direkteinträge		
100%	Real	<ul style="list-style-type: none"> Zunahme der relevanten Fläche um 0.9 %. Die Waldfläche, für welche die höchsten N-Ausgangswerten (Laubfall) verwendet werden, hat um 1.6 % zugenommen
0 %	Methodisch	<ul style="list-style-type: none"> Keine methodischen Anpassungen
Bodenerosion Ackerland		
1/4	Real	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme der Flächensumme Acker + Gartenbau + Reben um insgesamt 4 % Abnahme des C-Faktors für Ackerland um 1 %
3/4	Methodisch	<ul style="list-style-type: none"> neue Erosionsrisikokarte sowie Aggregationsmethode: Abnahme des potentiellen Bodenabtrages um etwa 20 % Abnahme des C-Faktor für Reben um 40 % (Abnahme aktuelles Erosionsrisiko) Zunahme des P-Faktors um 14 % (Zunahme aktuelles Erosionsrisiko)
sonstige Erosion		
1/2	Real	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme der Gletscherflächen um 10 % (der Anteil Erosionsmaterial von Gletschern am schweizweiten Wert ist 50 %) Abnahme des mittleren Niederschlags um 1.9 % (Vergleich der zwei Normwerte)
	Real und methodisch	<ul style="list-style-type: none"> Bei der Abschätzung sonstige Erosion in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge wurde der Wert zur Umrechnung um 5 % erhöht wegen der Zunahme der Starkniederschläge: Starkniederschläge haben nicht nur in den letzten 10 Jahren zugenommen, sondern über einen viel längeren Zeitraum, diese Zunahme wurde für MODIFFUS 2010 noch nicht berücksichtigt.
1/2	Methodisch	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme des mittleren Niederschlags um -1.6 % auf Grund von der Umstellung auf Normwerte (gesamthafte Abnahme 3.5 %, real ist 1.9 %) Schweizweiter Mittelwert des Ausgangswertes des Nährstoffgehalts des erodierten Bodenmaterials hat um 6 % abgenommen, da die biogeografischen Regionen angepasst wurden (N-Ausgangswerte sind nach biogeografischer Region unterteilt, die Fläche des Mittellands mit den höchsten Ausgangswerten ist im Vergleich zu 2010 kleiner geworden)

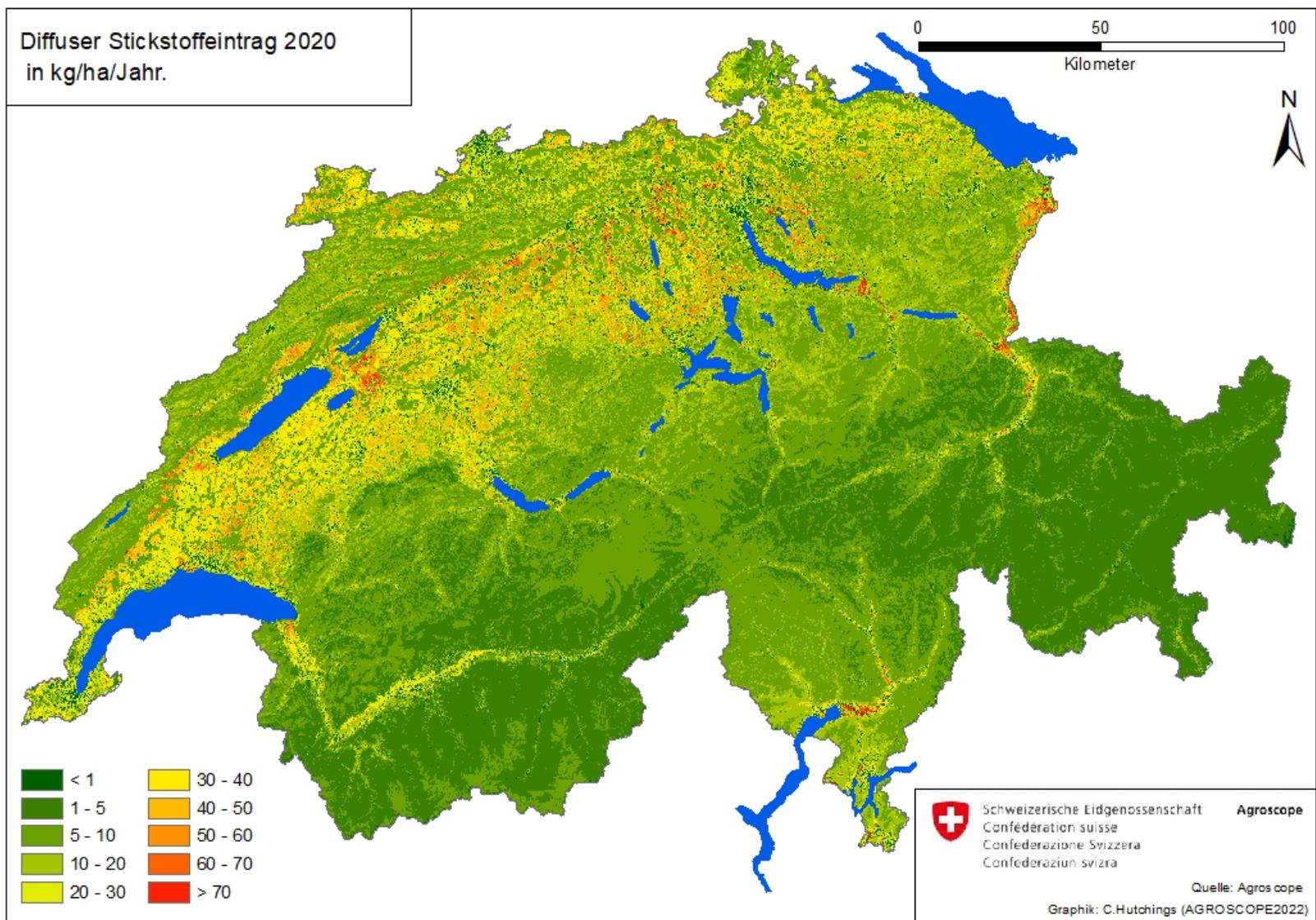


Abbildung 37: Diffuser Gesamt-Stickstoffeintrag 2020 (in kg/ha/Jahr).

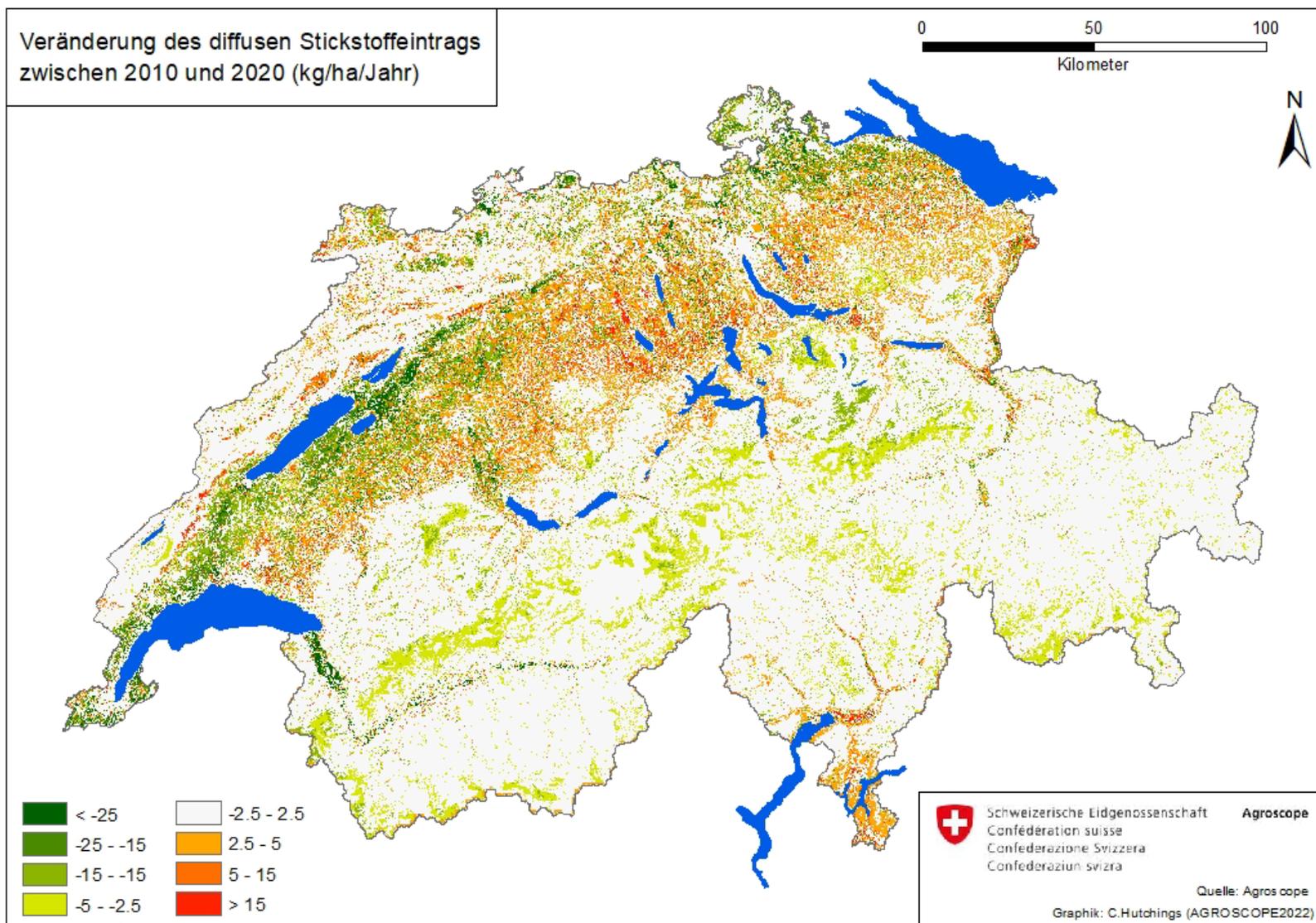


Abbildung 38: Veränderung des diffusen Gesamt-Stickstoffeintrags zwischen 2010 und 2020 in kg/ha/Jahr.

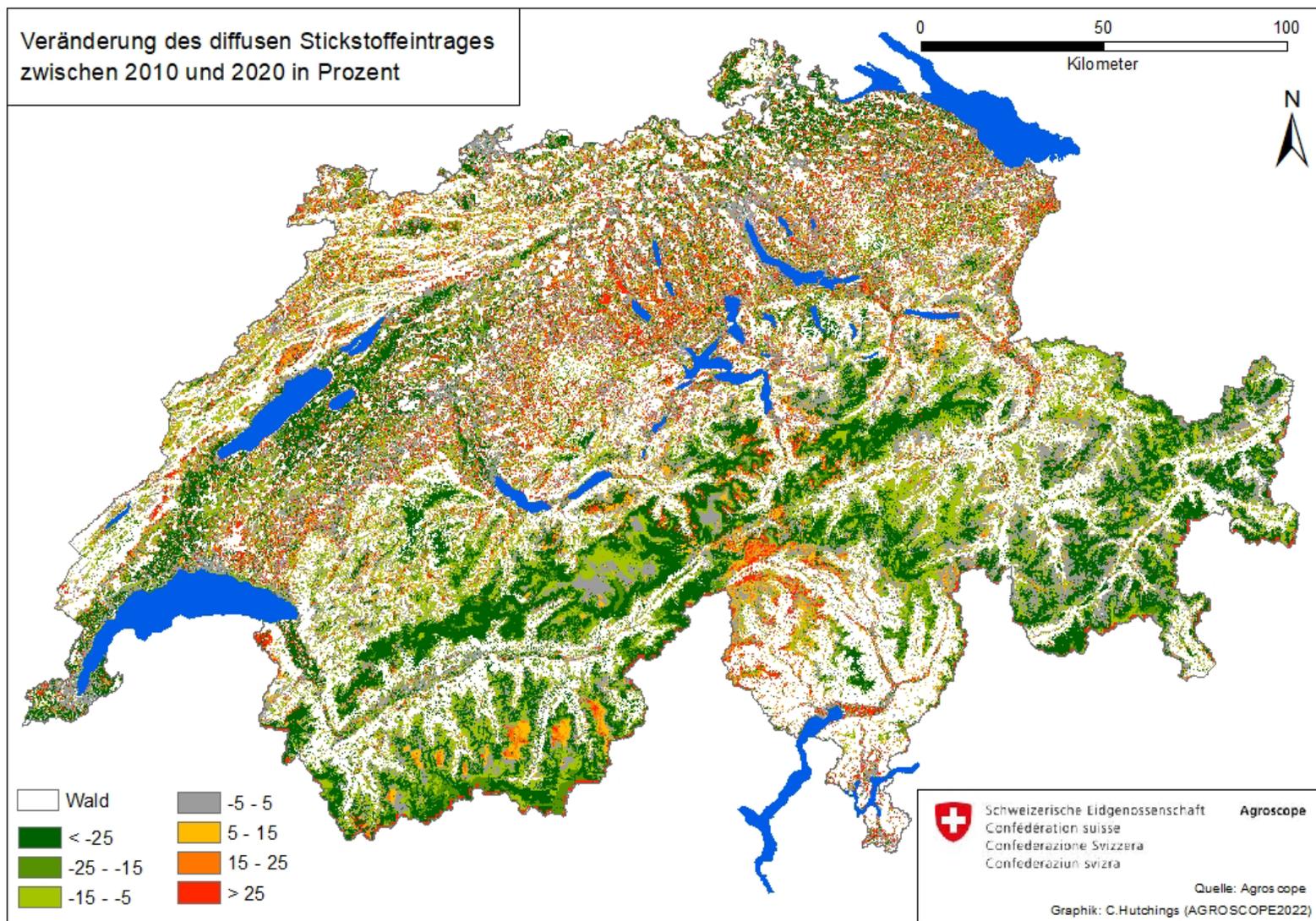


Abbildung 39: Veränderung des diffusen Gesamt-Stickstoffeintrages zwischen 2010 und 2020 in Prozent. Waldflächen sind weiss abgebildet, da hier die Einführung des N-Depositionsfaktors zu grossen Veränderungen geführt hat und sonst andere Veränderungen nicht mehr ersichtlich wären.

3.3.3 Gesamt-Phosphor

Der Gesamt-Phosphoreintrag aus diffusen Quellen für 2020 beläuft sich auf 3380 t (Tab. 55). Das entspricht einem flächenspezifischen diffusen Eintrag von durchschnittlich 0.82 kg P/ha/Jahr. Von Gletschern stammt mit 1074 t P der deutlich höchste Anteil (32 %) an den gesamten P-Einträgen, gefolgt von Wald (beide Waldkategorien) mit 19 %, alpwirtschaftlichen Nutzflächen (11 %) und Fels, Geröll und Sand (10 %). Aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen stammen insgesamt nur 31 % aller diffusen P-Einträge (s. auch Abb. 35). Es sei an dieser Stelle aber nochmals darauf hingewiesen, dass bei der Abschätzung der P-Einträge aus dem alpinen Raum sehr grosse Unsicherheiten bestehen.

Die flächenspezifischen P-Einträge sind mit 10.4 kg/ha bei den Gletschern mit Abstand am höchsten, gefolgt von Rebbau (1.36 kg/ha), alpwirtschaftlichen Nutzflächen (0.74 kg/ha), Heimweiden (0.73 kg/ha) und Ackerland (0.72 kg/ha). Die niedrigsten flächenspezifischen P-Einträge ergeben sich unter Siedlungsgrünflächen mit 0.08 kg/ha (Tab. 55).

Tabelle 55: Gesamt-Phosphoreinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer der Schweiz – nach absoluter Höhe der Einträge pro Landnutzung 2020 sortiert. Grün hinterlegt = Zunahmen gegenüber 2010; blau hinterlegt = Abnahmen gegenüber 2010.

	2010		2020		Anteil an Gesamt-P (%)		Differenz 2010 zu 2020	
	kg P/ha	t P	kg P/ha	t P	2010	2020	t P	%
Gletscher	9.93	1135	10.42	1074	32.5	31.8	-62	-5
Alpwirtschaftliche Nutzfläche	0.69	355	0.74	373	10.2	11.0	18	5
Fels, Geröll, Sand	0.67	312	0.71	331	8.9	9.8	18	6
Wald über 1200m	0.58	297	0.63	329	8.5	9.7	32	11
Wald unter 1200m	0.37	290	0.38	298	8.3	8.8	8	3
Ackerland	0.90	364	0.72	278	10.4	8.2	-86	-24
Dauerwiesen	0.75	255	0.69	232	7.3	6.9	-22	-9
unproduktive Vegetation	0.60	177	0.66	198	5.1	5.8	20	11
Heimweiden	0.85	142	0.73	130	4.1	3.8	-12	-9
Stehende Gewässer	0.40	56	0.34	49	1.6	1.5	-7	-13
fließende Gewässer	0.69	23	0.67	22	0.6	0.6	-1	-3
Rebbau	2.52	40	1.36	21	1.1	0.6	-18	-47
Strassen ausserorts	0.42	13	0.41	16	0.4	0.5	3	26
Siedlungsgrün	0.09	14	0.08	13	0.4	0.4	-1	-6
Obstbau	0.43	13	0.46	13	0.4	0.4	0	-2
Gartenbau	0.44	2	0.57	3	0.1	0.1	1	33
Siedlung überbaut	0.00	0	0.00	0	0.0	0.0	0	0
Strassen innerorts	0.00	0	0.00	0	0.0	0.0	0	0
Total	0.85	3489	0.82	3380	100	100	-109	-3

Gegenüber den Berechnungen für 2010 ergibt sich insgesamt eine Abnahme der diffusen P-Einträge von 109 t bzw. 3.1 %, wobei der partikuläre Eintrag um 2 % zugenommen, der gelöste Eintrag um 18 % abgenommen hat (Tab. 56). Die grösste absolute Veränderung ergibt sich beim Ackerland mit einer Abnahme von 86 t. Hauptursache dafür sind methodisch Anpassungen bei der Berechnung der Bodenerosion sowie die Abnahmen der Ackerfläche (s. Tab. 57). Es gibt aber auch verschiedene Landnutzungen mit einer Zunahme der P-Einträge. Begründungen zu den Veränderungen bei den anderen Landnutzungskategorien siehe Tabelle 57.

Betrachtet man die diffusen P-Einträge hinsichtlich der Eintragspfade, dominieren die Einträge aus der sonstigen Erosion mit 2475 t bzw. 73 % (Tab. 56, Abb. 35). P-Einträge über Abschwemmung erreichen 12 %, Auswaschung/Drainage 7 % und Bodenerosion von Ackerland rund 4 %. Die grösste absolute Veränderung gegenüber den Berechnungen von 2010 ergibt sich bei der sonstigen Erosion mit einer Zunahme von 81 t P (= 4%), welche zur Hälfte methodisch, zur Hälfte real bedingt ist (Tab. 57). Mit 65 t P bzw. 35 % gab es bei der Bodenerosion von Ackerland eine grosse Abnahme, welche überwiegend methodisch bedingt ist. Bei der Abschwemmung gab es mit 63 t P bzw. 18 % ebenfalls eine grosse Abnahme, die zu einem Drittel als real eingestuft wurde.

Tabelle 56: Diffuse Gesamt-Phosphoreinträge 2010 und 2020, aufgeschlüsselt nach Eintragspfaden.

Pfade	t P		Anteil an Gesamt-P		Veränderung 2010 zu 2020		Abschätzung der Gründe der Veränderung (%)	
	2010	2020	2010	2020	t	%	Real	Methodisch
Abschwemmung	468	405	13.4	12.0	-63	-13.5	1/3	2/3
Auswaschung + Drainage	292	239	8.4	7.1	-53	-18.2	1/6	5/6
Deposition Gewässer	69	60	2.0	1.8	-9	-12.8	5/6	1/6
Landwirtschaftliche Direkteinträge sowie sonstige diffuse Direkteinträge	79	80	2.3	2.4	1	0.9	1 ^a	0 ^a
Bodenerosion Ackerland	185	121	5.3	3.6	-65	-35.0	1/6	5/6
sonstige Erosion	2395	2475	68.6	73.2	81	3.4	1/2	1/2
partikulär	2580	2636	74.0	78.0	56	2.2	1/3	2/3
gelöst	909	744	26.0	22.0	-165	-18.1	1/4	3/4
TOTAL	3489	3380	100	100	-109	-3.1	1/6	5/6

a: Zuteilung gelöst/partikulär neu 50 %/50 %

In Tabelle 57 wurde analog wie beim Stickstoff in Tabelle 54 versucht, die Veränderungen zwischen den Berechnungen von 2010 und 2020 zu erklären. Es gelten dieselben Einschränkungen, wie sie zu Tabelle 54 gemacht wurden.

Tabelle 57: Übersicht der relevantesten realen und methodisch bedingten Veränderungen inklusive Abschätzungen des jeweiligen Anteils pro Eintragspfad.

Abschwemmung		
1/3	Real	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme der landwirtschaftlich genutzten Fläche um 2 % (jedoch Zunahme der Fläche der Heimweiden um knapp 6 %), flächenspezifischer Phosphoreintrag ist bei den Heimweiden am höchsten aller Landnutzungen Abnahme des Anteils intensive Weiden/Wiesen am gesamten Dauergrünland sowie Abnahme des Anteils Kunstwiesen im Vergleich zum offenen Ackerland (Tab. 6) → Ausgangswerte im Schnitt für diese Landnutzungen um etwa 7% tiefer Abnahme P Deposition um 10 %: Einfluss auf die Ausgangswerte der wenig intensiven Landnutzungen
	Real und methodisch	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme des Oberflächenabflusses um 8.5 % (siehe Tab. 54 Auflistung methodisch/reale Gründe); bei Landnutzungen mit den höchsten P Einträgen (Grasland und Ackerland) hat der Oberflächenabfluss jedoch weniger stark abgenommen im Vergleich zum Schweizer Schnitt von 8.5 % bzw. sogar teilweise zugenommen (-2 % bis + 4 %)
2/3	Methodisch	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme des P-Testzahlfaktor im Schnitt um etwa 5 % Abnahmen Hofdüngerfaktor 2 bis 3 %
Drainage + Auswaschung		
1/6	Real	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme der landwirtschaftlich genutzten Fläche um 2 % Abnahme der Sickerwassermenge: <ul style="list-style-type: none"> Sickerwasserfaktor Abnahme 0.5 % Abnahme Sickerwassermenge Ackerland um 13 % (1/5 davon jedoch methodisch bedingt auf Grund der Umstellung bei der Norm für Niederschlag und Verdunstung sowie Umstellung Berechnung mit mg/l anstelle kg/ha)
5/6	Methodisch	<ul style="list-style-type: none"> Abnahmen Hofdüngerfaktor etwa 5 % Abnahme des P-Testzahlfaktor im Durschnitt um etwa gut 10 %, betrifft alle Landnutzungen Zunahme Drainagefaktor auf LN im Durschnitt etwa 2 %
Deposition Gewässer		
5/6	Real	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme der P-Deposition um 10 %: Reduktion Staub Landwirtschaft (Zunahme Flächen mit Bodenschonender Bearbeitung), sowie Abnahmen in der Industrie etc. Abnahme des mittleren Niederschlags um 1.9 % (Vergleich der zwei Normwerte, Vergleich MODIFFUS 2010/2020 Abnahme gesamt um 3.5 %)
1/6	Methodisch	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme des mittleren Niederschlags um -1.6 % auf Grund von der Umstellung auf Normwerte (gesamthafte Abnahme 3.5 %, real ist 1.9 %)
landwirtschaftliche Direkteinträge sowie sonstige diffuse Direkteinträge		
100 %	Real	<ul style="list-style-type: none"> Zunahme der relevanten Fläche um 0.9 %. Die Waldfläche, für welche die höchsten P-Ausgangswerten (Laubfall) verwendet werden, hat um 1.6 % zugenommen
0 %	Methodisch	<ul style="list-style-type: none"> Keine methodischen Anpassungen zu Berechnung Differenzierung gelöst/partikulär wurde angepasst. Bei MODIFFUS 2010 wurde dieser Pfad zu 100 % als gelöst angerechnet, im 2020 nur zu 50 %, somit ist bei gelöst P die Veränderung bei diesem Pfad fast 100 % methodisch bedingt.
Bodenerosion Ackerland		
1/6	Real	<ul style="list-style-type: none"> Abnahme der Flächensumme Acker + Gartenbau + Reben um insgesamt um 4 % Abnahme C-Faktor Acker um 1 %
5/6	Methodisch	<ul style="list-style-type: none"> ERK2 sowie Aggregationsmethode: Abnahme des potentiellen Bodenabtrages um etwa 20 % Abnahme des C-Faktor Reben um 40 % (Abnahme aktuelle Erosionsrisiko) Zunahme P-Faktor um 14 % (Zunahme aktuelle Erosionsrisiko) Abnahme P-Testzahlfaktor: 12 % bei Acker und Garbenbau, Reben 3 %
sonstige Erosion		

1/2	Real	<ul style="list-style-type: none"> • Abnahme der Gletscherflächen um 10 % (der Anteil Erosionsmaterial von Gletscher am schweizerweiten Wert ist 50 %) • Abnahme des mittleren Niederschlags um 1.9 % (Vergleich der zwei Normwerte)
	Real und methodisch	<ul style="list-style-type: none"> • Bei der Abschätzung der sonstigen Erosion in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge, wurde der Wert zur Umrechnung um 5 % erhöht auf Grund der Zunahme der Starkniederschläge: Starkniederschläge haben nicht nur in den letzten 10 Jahren zugenommen, sondern über einen viel längeren Zeitraum, diese Zunahme wurde für MODIFFUS 2010 noch nicht berücksichtigt.
1/2	Methodisch	<ul style="list-style-type: none"> • Abnahme des mittleren Niederschlags um -1.6 % auf Grund von der Umstellung auf Normwerte (gesamthafte Abnahme 3.5 %, real ist 1.9 %)

Abbildung 40 zeigt die räumliche Verteilung der diffusen Gesamt-P-Einträge in die Gewässer der Schweiz im Hektarraster. Sehr hohe Einträge erfolgen vor allem in der alpinen und voralpinen Region. Besonders die vergletscherten Gebiete weisen teilweise P-Einträge von über 1.8 kg P/ha auf. Diese Gebiete haben gemäss Berechnungen grosse Mengen an Sedimentabtrag durch sonstige Erosion, was durch gemessene Sedimentfrachten bestätigt werden kann. Dies lässt je nach Geologie auf einen hohen partikulär gebundenen P-Austrag schliessen. Die 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 alpine und voralpine Regionen keine speziellen Untersuchungen bzw. Messresultate vorliegen, sind die Berechnungen für diese Gebiete mit grossen Unsicherheiten behaftet. Darüber hinaus sind die partikulär gebundenen P-Einträge hauptsächlich als natürliche Hintergrundlast zu betrachten und liegen nicht als bioverfügbarer P vor. In grossen Teilen des Wallis und von Graubünden sind die partikulären P-Einträge dagegen vergleichsweise gering infolge der geringen Niederschläge. In Abbildung 41 sind die absoluten, in Abbildung 42 die prozentualen Veränderungen gegenüber den Ergebnissen von 2010 dargestellt. Es zeigt sich ein buntes Mosaik zwischen Zu- und Abnahmen. Bemerkenswert sind allenfalls die Zunahmen im Bereich der Luzerner Mittellandseen und in der Ostschweiz (Thurgau).

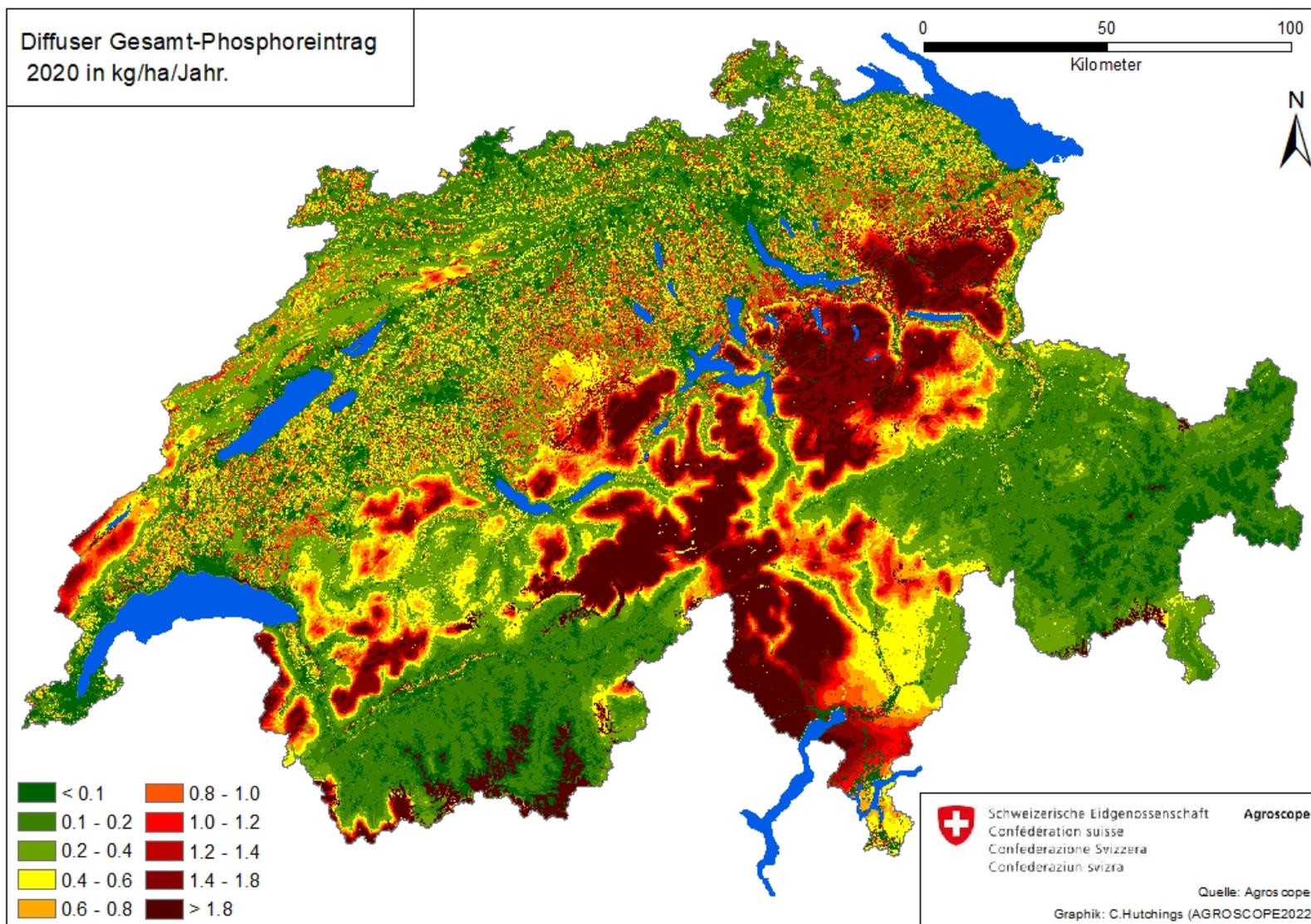


Abbildung 40: Diffuser Gesamt-Phosphoreintrag 2020 in kg/ha/Jahr.

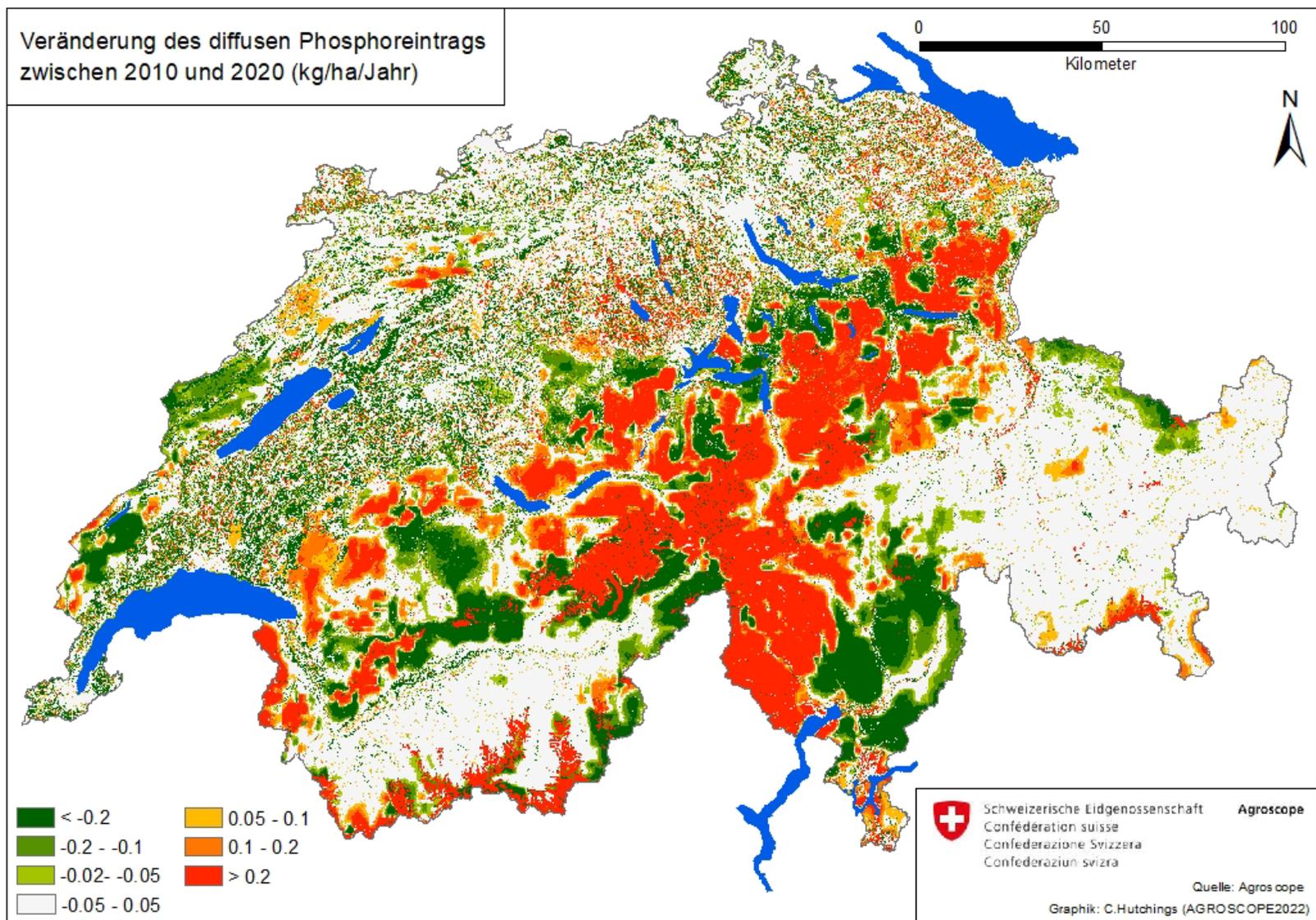


Abbildung 41: Veränderung des diffusen Gesamt-Phosphoreintrags zwischen 2010 und 2020 in kg/ha/Jahr.

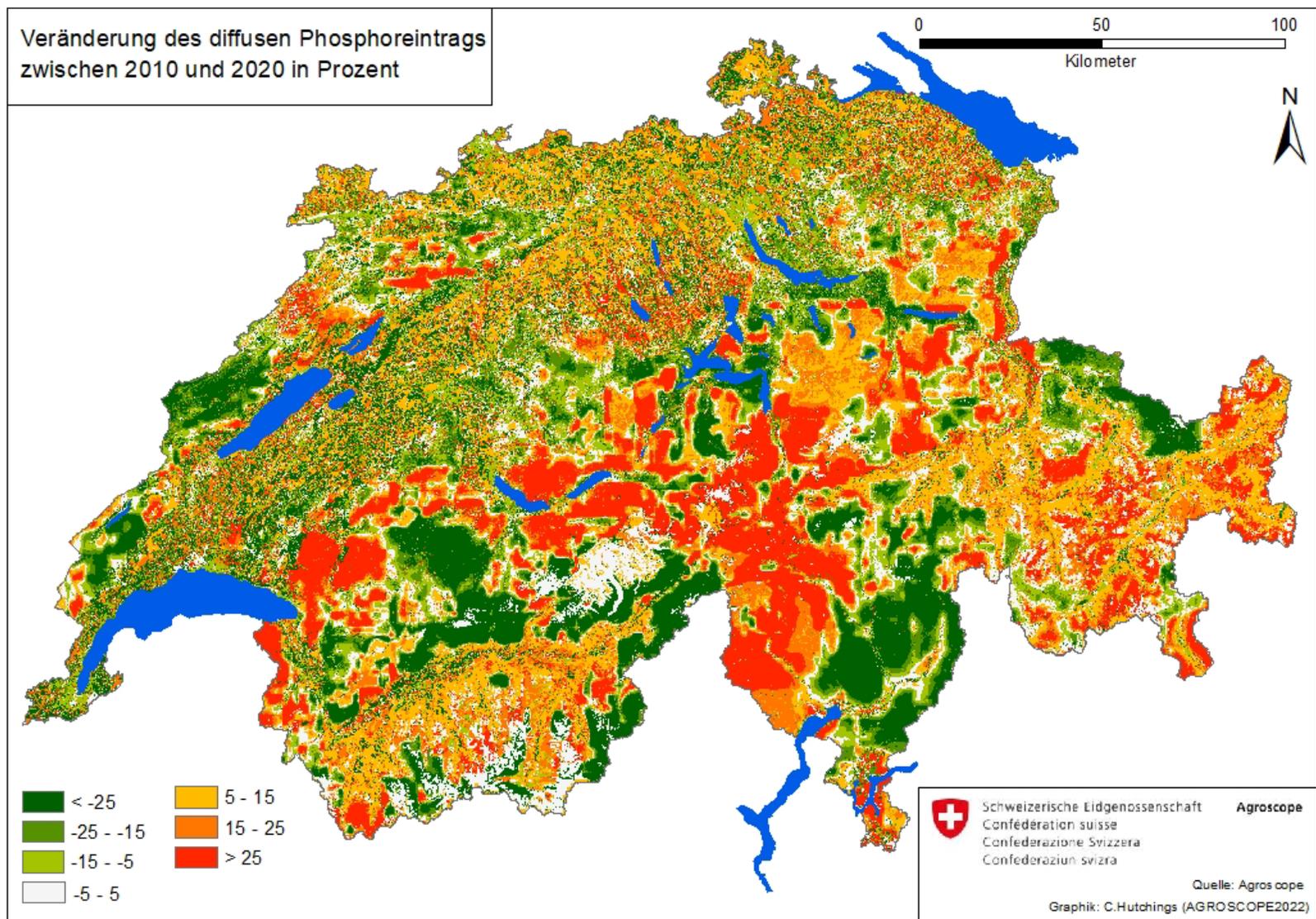


Abbildung 42: Veränderung des diffusen Gesamt-Phosphoreintrags zwischen 2010 und 2020 in Prozent.

3.3.4 Gelöster Phosphor

Der gelöste P-Eintrag aus diffusen Quellen für 2020 beläuft sich auf 744 t (Tab. 58). Das entspricht einem flächenspezifischen diffusen Eintrag von durchschnittlich 0.18 kg P/ha/Jahr. Dauerwiesen haben mit 151 t P den höchsten Anteil (20 %) an den gesamten gelösten P-Einträgen, dicht gefolgt von Ackerland 149 t bzw. 20 %. Aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen stammen insgesamt 500 t bzw. 67 % aller diffusen P-Einträge (s. auch Abb. 35).

Die flächenspezifischen P-Einträge sind mit 0.54 kg/ha bei den Heimweiden am höchsten, gefolgt von Dauerwiesen (0.45 kg/ha) und Ackerland (0.38 kg/ha). Die niedrigsten flächenspezifischen P-Einträge ergeben sich bei Fels, Geröll und Sand mit 0.06 kg/ha (Tab. 58).

Gegenüber den Berechnungen für 2010 ergibt sich insgesamt eine Abnahme der diffusen P-Einträge von 165 t bzw. 18.1 % (Tab. 58). Die grösste absolute Veränderung ergibt sich beim Ackerland mit einer Abnahme von 49 t bzw. 25 %. Auch beim Wald gab es insgesamt eine Abnahme von 41 t P. Es gibt nur wenige unbedeutende Landnutzungen mit einer Zunahme der P-Einträge. Begründungen zu den Veränderungen der verschiedenen Landnutzungskategorien siehe Tabelle 57.

Tabelle 58: Gelöste Phosphoreinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer der Schweiz – nach absoluter Höhe der Einträge 2020 sortiert. Grün hinterlegt = Zunahmen gegenüber 2010; blau hinterlegt = Abnahmen gegenüber 2010.

	2010		2020		Anteil an Gesamt-P (%)		Differenz 2010 zu 2020	
	kg P/ha	t P	kg P/ha	t P	2010	2020	t P	%
Dauerwiesen	0.52	176	0.45	151	19.4	20.3	-25	-14
Ackerland	0.49	198	0.38	149	21.8	20.1	-49	-25
Heimweiden	0.67	112	0.54	96	12.3	12.9	-16	-15
Alpwirtschaftliche Nutzfläche	0.20	102	0.18	88	11.2	11.8	-14	-14
Wald unter 1200 m stehende Gewässer	0.11	85	0.08	59	9.3	8.0	-26	-30
Wald über 1200 m	0.12	63	0.09	48	6.2	6.6	-7	-13
Fels, Geröll, Sand	0.07	31	0.06	26	6.9	6.4	-15	-24
unproduktive Vegetation	0.09	26	0.07	22	3.4	3.5	-4	-14
Siedlungsgrün	0.09	14	0.08	13	2.8	3.0	-4	-14
fließende Gewässer	0.09	14	0.08	13	1.6	1.8	-1	-6
Obstbau	0.09	14	0.08	13	1.4	1.4	-2	-14
Strassen ausserorts	0.36	11	0.38	10	1.2	1.4	-1	-7
Gletscher	0.24	8	0.21	9	0.8	1.2	1	14
Rebbau	0.08	9	0.07	7	1.0	0.9	-2	-24
Gartenbau	0.25	4	0.26	4	0.4	0.5	0	5
Siedlung überbaut	0.24	1	0.27	1	0.1	0.2	0	15
Strassen innerorts	0.00	0	0.00	0	0.0	0.0	0	0
Total	0.22	909	0.18	744	100	100	-165	-18.1

Betrachtet man die diffusen gelösten P-Einträge hinsichtlich der Eintragspfade, dominieren die Einträge aus Abschwemmung mit 405 t bzw. 54 % (Tab. 59, Abb. 35). P-Einträge über Auswaschung/Drainage erreichen 32 %. Die grösste absolute Veränderung gegenüber den Berechnungen von 2010 ergibt sich bei der Abschwemmung mit einer Abnahme von 63 t P. Diese Zunahme ist teils methodisch, teils real bedingt (s. dazu Tab. 57). Mit 53 t P bzw. 18 % gab es bei Auswaschung/Drainage ebenfalls eine grosse Abnahme, welche überwiegend methodisch bedingt ist.

Die grosse Abnahme der diffusen Direkteinträge ist methodisch bedingt, da dieser Pfad 2010 vollständig als gelöster P, 2020 aber nur zu Hälfte als gelöster P und zur Hälfte als partikulärer P angerechnet wurde.

Da die Abschwemmung der dominante Eintragspfad bei den gelösten P-Einträgen ist, wurde dieser Pfad in Tabelle 60 noch getrennt für die verschiedenen Landnutzungen dargestellt. Mit 120 t weisen die Dauerwiesen den grössten Anteil (30 %) auf. Ackerland mit 89 t (22 %) und die Heimweiden mit 80 t (20 %) tragen weiterhin substantiell zur P-Abschwemmung bei.

Tabelle 59: Diffuse gelöste P-Einträge 2010 und 2020, aufgeschlüsselt nach Eintragspfaden.

Pfade	t P		Anteil an Gesamt-P		Veränderung 2010 zu 2020	
	2010	2020	2010	2020	t	%
Abschwemmung	468	405	51.5	54.4	-63	-13.5
Drainage + Auswaschung	292	239	32.2	32.1	-53	-18.2
Deposition Gewässer	69	60	7.6	8.1	-9	-12.8
Landwirtschaftliche Direkteinträge sowie sonstige diffuse Direkteinträge	79	40	8.7	5.4	-39	-49.5
Total	909	744	100	100	-165	-18.1

Abbildung 43 zeigt die räumliche Verteilung der diffusen gelösten P-Einträge in die Gewässer der Schweiz im Hektarraster. Sehr hohe Einträge erfolgen vor allem in der voralpinen Region. Der voralpine Bereich ist durch erhöhte Niederschläge (Staulagen) gekennzeichnet, mit einer Zunahme in Richtung Osten. Dies führt zu erhöhter Abschwemmung. In Kombination mit einer intensiven Graslandbewirtschaftung (inkl. Beweidung) kommt es zu erhöhten Einträgen von gelöstem P. In Abbildung 44 sind die absoluten, in Abbildung 45 die prozentualen Veränderungen gegenüber den Ergebnissen von 2010 dargestellt. Es zeigt sich auch hier ein buntes Mosaik zwischen Zu- und Abnahmen. Auffallend sind die Zunahmen im Bereich der Luzerner Mittellandseen und in der Ostschweiz (Thurgau).

Tabelle 60: P-Abschwemmung pro Landnutzung.

	P kg/ha				Summe t				Prozent an gesamt t	
	2010	2020	Diffe- renz	%	2010	2020	Diffe- renz	%	2010	2020
Ackerland	0.28	0.23	-0.05	-18	113.7	88.7	-25.0	-22	24.3	21.9
Alpwirtschaftliche Nutzfläche	0.11	0.10	-0.01	-9	58.3	52.2	-6.2	-11	12.5	12.9
Gartenbau	0.16	0.16	-0.01	-4.	0.7	0.7	0.0	-2	0.2	0.2
Heimweiden	0.58	0.45	-0.13	-22	97.2	80.1	-17.1	-18	20.7	19.8
Obstbau	0.29	0.29	0.00	1	8.9	8.1	-0.8	-9	1.9	2.0
Rebbau	0.16	0.17	0.01	6	2.6	2.7	0.1	4	0.6	0.7
Dauerwiesen	0.39	0.36	-0.03	-8	132.9	119.6	-13.3	-10	28.4	29.5
Siedlungsgrün	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
Siedlung überbaut	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
Strassen ausserorts	0.18	0.17	-0.01	-7	5.5	6.7	1.2	21	1.2	1.7
Strassen innerorts	0.00	0.00	0.00	-	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
unproduktive Vegetation	0.03	0.02	0.00	-12	8.0	7.1	-0.9	-12	1.7	1.7
Stehende Gewässer	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
fliessende Gewässer	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
Fels, Geröll, Sand	0.01	0.06	0.05	-	30.5	26.2	-4.3	-14	6.5	6.5
Gletscher	0.01	0.07	0.06	-	3.1	7.1	4.0	-	0.7	1.7
Wald = <1200	0.00	0.00	0.00	-	0.7	0.0	-0.7	-	0.2	0.0
Wald > 1200	0.01	0.01	0.00	-9	6.1	5.7	-0.3	-6	1.3	1.4
Total	2.21	2.09	-0.12	-5.5	468.3	404.9	-63.3	-13.5	100.0	100.0

- Nicht vergleichbar, methodisch bedingte sehr grosse prozentuale Veränderungen

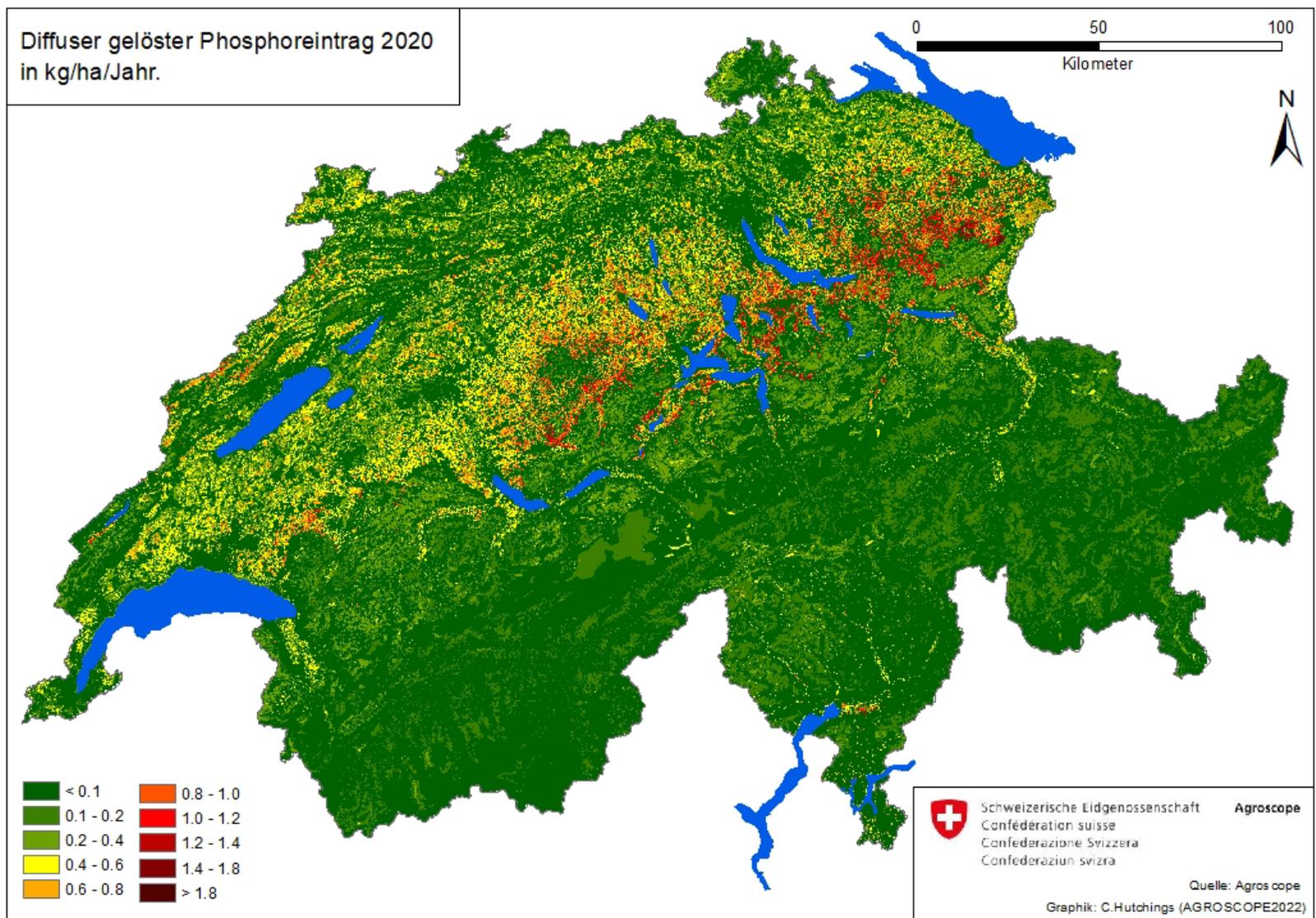


Abbildung 43: Diffuser gelöster Phosphoreintrag 2020 in kg/ha/Jahr.

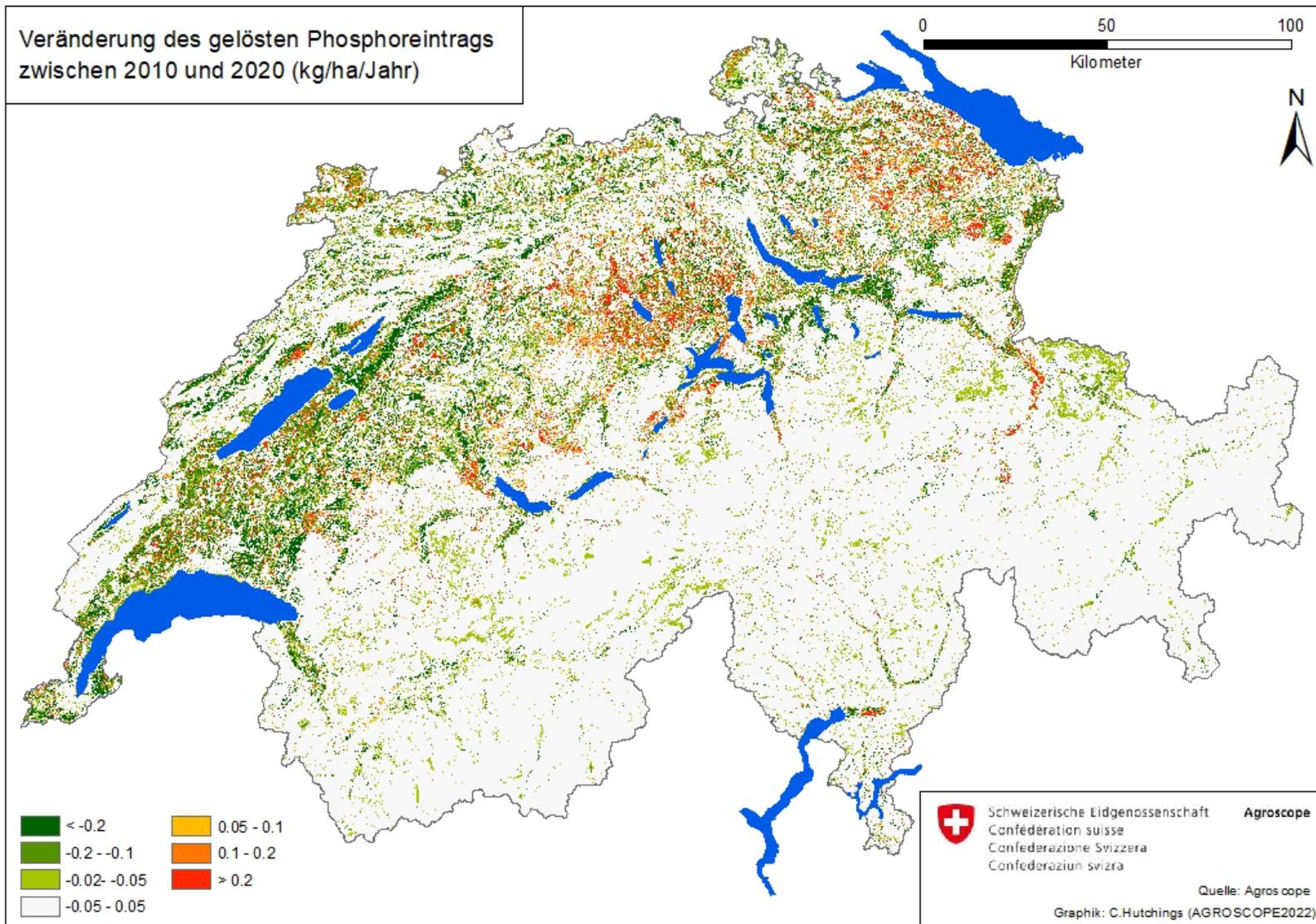


Abbildung 44: Veränderung des diffusen Eintrags von gelöstem Phosphor zwischen 2010 und 2020 (in kg/ha/Jahr).

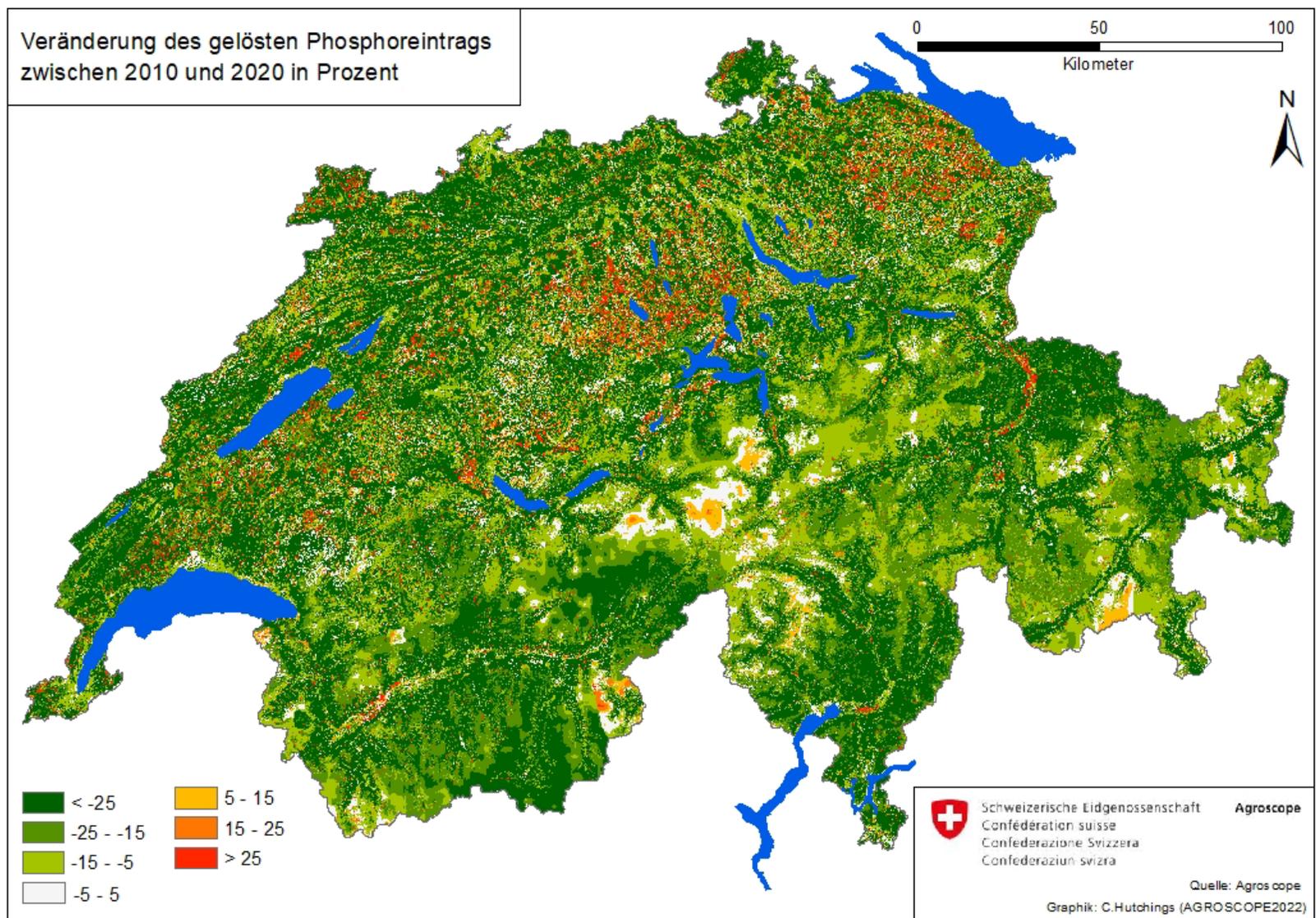


Abbildung 45: Veränderung des gelösten diffusen Phosphoreintrags zwischen 2010 und 2020 in Prozent.

3.3.5 Natürliche Hintergrundlast und diffus anthropogene Belastung

Die Aufteilung der diffusen Einträge in natürliche Hintergrundlast und diffus anthropogene Belastung kann Hinweise auf die Wirksamkeit möglicher geplanter Reduktionsmassnahmen geben, da eine Reduzierung von Einträgen aus der natürlichen Hintergrundlast (z. B. natürliche Erosion von hochalpinen Bereichen) nicht möglich ist.

Beim Gesamt-N stammen nur 19 % der diffusen Einträge aus der natürlichen Hintergrundlast. Die anthropogen verursachten N-Einträge betragen mit 38'684 t 81 %. Beim Gesamt-P dagegen dominiert die natürliche Hintergrundlast (Tab. 61). Die partikulären P-Einträge über natürliche Erosion, vor allem in alpinen Gebieten, führen zu dem sehr hohen Anteil an natürlicher Hintergrundlast. Mit 914 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 anthropogenen Einträgen. Mit 443 t sind zwei Drittel des diffusen gelösten P anthropogenen Ursprungs. Da sich die totalen N- und P-Einträge 2020 gegenüber 2010 leicht verringert haben, hat der prozentuale Anteil der natürlichen Hintergrundlast im Vergleich zu 2010 leicht zugenommen; die Zunahme beträgt bei Gesamt-P 2 %, bei gelöstem P 7 % und bei Gesamt-N 1 %.

Tabelle 61: Aufteilung der diffusen N- und P-Einträge in die Gewässer in natürliche Hintergrundlast und diffus anthropogene Belastung.

	diffus total	natürliche Hintergrundbelastung	diffus anthropogene Belastung
gesamt N in t	47'515	8'831	38'684
% Anteil Gesamt-N		19	81
gesamt P in t	3'380	2'466	914
% Anteil Gesamt-P		73	27
gelöst P in t	744	301	443
% Anteil gelöster P		40	60

3.3.6 Landwirtschaftsbedingte diffuse Stoffeinträge in die Gewässer

Beim Stickstoff betragen die landwirtschaftsbedingten diffusen Einträge an den gesamten diffusen Einträgen 68 %, die anderen diffusen Einträge machen 32 % aus (Tab. 62, Abb. 34). Beim Gesamt-P dominieren die anderen diffusen Einträge mit 84 % gegenüber den landwirtschaftsbedingten Einträgen mit 16 %. Ursache dafür sind die hohen P-Einträge aus der sonstigen (natürlichen) Erosion alpiner und voralpiner Flächen. Beim gelösten P wiederum sind die landwirtschaftsbedingten Einträge mit 51 % praktisch gleich hoch wie die anderen diffusen Einträge mit 49 %.

Tabelle 62: Landwirtschaftsbedingte diffuse Einträge.

	Gesamt-N	Gesamt-P	gelöster P
	t	t	t
Diffuse Einträge von landwirtschaftlich genutzten Flächen	27'945	1'050	500
natürliche Hintergrundlast landwirtschaftlich genutzter Flächen	2'179	519	118
Einträge von anderen Flächen in die Gewässer durch landwirtschaftsbedingte NH ₃ -Emissionen	6'667		
Landwirtschaftsbedingte diffuse Einträge	32'433	531	382
Andere diffuse Einträge	15'082	2'850	363
Diffuse Einträge total	47'515	3'380	744

Im Bericht „Umweltziele Landwirtschaft“ (BAFU & BLW, 2008) lautet beim Stickstoff Ziel 2: „Reduktion der landwirtschaftsbedingten Stickstoffeinträge in die Gewässer um 50 % gegenüber 1985“. Nach Berechnungen von Prasuhn

(2016) betragen die landwirtschaftsbedingten N-Einträge für 1985 49'000 t N und wurden als Ausgangswert für die Beurteilung der Zielerreichung vorgeschlagen. Die Berechnung für 2020 ergab eine Fracht von 32'433 t N. Die landwirtschaftsbedingten N-Einträge haben demnach seit 1985 um 34 % abgenommen. Das Ziel einer 50-prozentigen Reduzierung wurde daher klar verfehlt. Es verbleibt eine Ziellücke von knapp 8'000 t N (32'433 - 25'000 t N).

Die gesamten diffusen N-Einträge haben seit 1985 um 30 % abgenommen, die landwirtschaftsbedingten N-Einträge mit 34 % nur leicht stärker. Der Anteil der landwirtschaftsbedingten N-Einträge an den gesamten diffusen N-Einträgen betrug 1985 72 % und 2020 68 %. Die Ursache für die geringe Veränderung ist vor allem in der Abnahme der landwirtschaftlich genutzten Fläche von rund 115'000 ha zu sehen. Der flächenspezifische N-Eintrag (landwirtschaftsbedingte N-Einträge bezogen auf die landwirtschaftlich genutzte Fläche) hat sich mit 31.3 kg/ha im Jahr 1985 um 29 % gegenüber 2020 reduziert (22.3 kg/ha) und damit weniger als die absoluten Werte (34 % Reduktion). Ein grosser Teil der 2020 nicht mehr landwirtschaftlich genutzten Fläche wurde in Siedlungsflächen umgewandelt und trägt somit nicht mehr zu den landwirtschaftsbedingten N-Einträgen bei.

Die Auswaschungs- und Abschwemmungsverluste in die Gewässer im Jahr 1985 von 11'500 t N, welche durch die Deposition von landwirtschaftsbedingten NH₃-Emissionen auf nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen verursacht wurden, haben sich bis 2020 um knapp 5'000 t N auf 6'667 t N reduziert (= 42 % Reduktion). Die N-Einträge in die Gewässer aus landwirtschaftlich genutzten Flächen sind im gleichen Zeitraum um rund 12'000 t N bzw. 30 % zurückgegangen. Die Reduktion der NH₃-Verluste in der Landwirtschaft hat also zu einem wesentlichen Teil zur Verringerung der landwirtschaftsbedingten N-Einträge in die Gewässer beigetragen.

3.4 Ergebnisse für alle Kantone

Die Tabellen 63 und 64 zeigen die diffusen, punktuellen und totalen N- und P-Einträge in die Gewässer der Schweiz für die verschiedenen Kantone. Punktquellen wurden dabei vollständig zu jenem Kanton gerechnet, in dem der punktuelle Eintrag gemäss Koordinaten erfolgte, obwohl nicht immer das gesamte Abwasser auch aus diesem Kanton stammte. Abweichungen zu den in Hürdler et al. (2015) publizierten Werten für 2010 ergeben sich aus den in Kapitel 3.3.2 & 3.3.3 bereits diskutierten realen und methodischen Veränderungen. Je nach Standortbedingungen (Landnutzung, Klima, Boden etc.) der verschiedenen Kantone können die Abweichungen unterschiedlich gross sein und die Anteile an methodisch bedingten oder realen Veränderungen variieren.

Insgesamt 17 Kantone haben überdurchschnittlich hohe flächenspezifische diffuse N-Einträge, neun Kantone unterdurchschnittliche (Tab. 63). Die flächenspezifisch grössten diffusen N-Einträge stammen aus den stark landwirtschaftlich geprägten Kantonen AG (19.9 kg/ha), ZH (18.5 kg/ha), TG (18.5 kg/ha) und FR (17.8 kg/ha). Die niedrigsten Einträge haben die eher alpin geprägten Kantone GR (4.4 kg/ha), VS (5.1 kg/ha), UR (6.9 kg/ha) und GL (8.8 kg/ha). Die Kantone BE und VD tragen mit 17 % bzw. 11 % am meisten zu den gesamtschweizerischen diffusen N-Einträgen bei. Bei den punktuellen Einträgen stammen die meisten Einträge aus den Kantonen ZH, VD, BE und AG. Neun Kantone tragen insgesamt zu mehr als 5 % bzw. insgesamt zu 70 % zu den totalen N-Einträgen in die Gewässer der Schweiz bei. Die Kantone BE (15 %), VD (11 %), ZH (9 %) und AG (7 %) haben dabei die höchsten Anteile.

Beim Gesamt-P haben insgesamt zehn Kantone überdurchschnittliche diffuse Einträge pro Flächeneinheit und 16 Kantone unterdurchschnittliche (Tab. 64). Die höchsten flächenspezifischen diffusen Gesamt-P-Einträge stammen aus den Kantonen mit hohem Anteil an unproduktiven Flächen und hoher sonstiger Erosion wie UR (1.70 kg/ha), VS (1.58 kg/ha), GL (1.54 kg/ha) und SZ (1.44 kg/ha). Die niedrigsten Einträge stammen aus den städtisch geprägten Kantonen BS (0.10 kg/ha) und GE (0.19 kg/ha). Die grossen Kantone VS (24 %), BE (16 %) und TI (10 %) tragen mit insgesamt 51 % am meisten zu den diffusen Gesamt-P-Einträgen bei. Bei den gelösten diffusen flächenspezifischen P-Einträgen haben 17 Kantone überdurchschnittlich hohe Werte. Am höchsten sind die Einträge in AI (0.46 kg/ha), AR (0.43 kg/ha), ZG (0.38 kg/ha) und LU (0.36 kg/ha), am geringsten in BS (0.07 kg/ha) und VS (0.08 kg/ha). Die Kantone BE (17 %), VD (9 %) und GR (9 %) haben die grössten Anteile an den totalen diffusen P-Einträgen. Bei den punktuellen Einträgen stammt der grösste Teil aus den einwohnerstarken Kantonen ZH, GE, BE und AG. Sechs Kantone tragen insgesamt zu mehr als 5 % bzw. insgesamt zu 64 % zu den totalen P-Einträgen in die Gewässer der Schweiz bei. Die Kantone VS (22 %) und BE (15 %) haben dabei die höchsten Anteile.

Tabelle 63: Zusammenstellung der diffusen, punktuellen und totalen Stickstoffeinträge pro Kanton, alphabetisch sortiert. Rote Schrift = überdurchschnittliche flächenspezifische Einträge bzw. hoher prozentualer Anteil.

Kanton	Flächenanteil (%)	diffus (kg/ha)	diffus (t)	% Anteil diffus an CH total	punktuell ^a (t)	total (t)	% Anteil total an CH total
AG	3.4	19.9	2'790	6	1'807	4'598	7
AI	0.4	11.1	191	0	18	209	0
AR	0.6	11.2	272	1	70	342	0
BE	14.4	13.3	7'948	17	2'251	10'199	15
BL	1.3	14.6	754	2	421	1'175	2
BS	0.1	13.9	47	0	960	1'007	1
FR	4.1	17.8	2'967	6	1'116	4'083	6
GE	0.7	16.4	452	1	1'503	1'955	3
GL	1.7	8.8	601	1	115	716	1
GR	17.2	4.4	3'108	7	808	3'916	6
JU	2.0	16.3	1'355	3	253	1'608	2
LU	3.6	17.7	2'647	6	787	3'433	5
NE	1.9	13.1	1'045	2	477	1'522	2
NW	0.7	11.3	312	1	95	406	1
OW	1.2	9.4	463	1	55	518	1
SG	4.9	13.3	2'702	6	1'620	4'322	6
SH	0.7	14.3	426	1	389	815	1
SO	1.9	17.7	1'399	3	662	2'061	3
SZ	2.2	11.9	1'081	2	357	1'438	2
TG	2.4	18.5	1'840	4	693	2'533	4
TI	6.8	10.2	2'863	6	932	3'796	5
UR	2.6	6.9	741	2	80	821	1
VD	7.8	16.2	5'209	11	2'412	7'620	11
VS	12.7	5.1	2'686	6	1'463	4'149	6
ZG	0.6	17.4	416	1	292	708	1
ZH	4.2	18.5	3'196	7	3'157	6'353	9
CH	100	11.5	47'512^b	100	22'793	70'305^b	100

^a inklusive Mischwasserentlastungen^b geringe Abweichung zu den Werten in Tab. 51 und Tab. 66 resultieren aus 1-2 m Unterschied des Grenzverlaufs der Schweiz bei Gewässern

Tabelle 64: Zusammenstellung der diffusen, punktuellen und totalen Phosphoreinträge pro Kanton, alphabetisch sortiert. Rote Schrift = überdurchschnittliche flächenspezifische Einträge bzw. hoher prozentualer Anteil.

Kanton	Flächenanteil (%)	P-Gesamt diffus (kg/ha)	P-Gesamt diffus (t)	% Anteil diffus an CH total	P gelöst diffus (kg/ha)	P gelöst diffus (t)	% Anteil diffus gelöst an CH total	P punktuell ^a (t)	P-Gesamt total (t)	% Anteil P-Gesamt total an CH total
AG	3.4	0.36	51	2	0.22	30	4	50	101	3
AI	0.4	1.39	24	1	0.46	8	1	0	24	1
AR	0.6	1.00	24	1	0.43	10	1	2	26	1
BE	14.4	0.89	530	16	0.21	123	17	68	598	15
BL	1.3	0.26	13	0	0.17	9	1	17	30	1
BS	0.1	0.10	0.3	0	0.07	0.2	0	15	15	0
FR	4.1	0.49	81	2	0.23	39	5	17	99	2
GE	0.7	0.19	5	0	0.13	4	0	84	89	2
GL	1.7	1.54	105	3	0.16	11	1	3	108	3
GR	17.2	0.41	287	9	0.09	64	9	24	311	8
JU	2.0	0.35	29	1	0.21	17	2	6	36	1
LU	3.6	0.74	110	3	0.36	54	7	26	136	3
NE	1.9	0.38	31	1	0.23	18	2	12	42	1
NW	0.7	0.79	22	1	0.24	7	1	2	23	1
OW	1.2	1.22	60	2	0.21	10	1	4	64	2
SG	4.9	0.93	188	6	0.31	63	8	42	230	6
SH	0.7	0.30	9	0	0.15	4	1	15	24	1
SO	1.9	0.34	27	1	0.19	15	2	28	55	1
SZ	2.2	1.44	130	4	0.29	26	3	9	139	3
TG	2.4	0.36	36	1	0.28	28	4	18	54	1
TI	6.8	1.25	351	10	0.12	34	5	29	381	9
UR	2.6	1.70	183	5	0.12	13	2	4	187	5
VD	7.8	0.53	169	5	0.21	66	9	36	205	5
VS	12.7	1.58	825	24	0.08	40	5	48	873	22
ZG	0.6	0.66	16	0	0.38	9	1	6	21	1
ZH	4.2	0.38	65	2	0.24	42	6	95	160	4
CH	100	0.82	3374^b	100	0.18	744	100	660	4034^b	100

^a inklusive Mischwasserentlastungen^b geringe Abweichung zu den Werten in Tab. 51 und Tab. 66 resultieren aus 1-2m Unterschied des Grenzverlaufs der Schweiz bei Gewässern

3.5 Ergebnisse für das Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der grossen Seen (REZGUS) sowie das gesamte Rheineinzugsgebiet

Grundlage für die aktuelle Berechnung und Überarbeitung des Stoffflussmodells MODIFFUS ist unter anderem die Meldung der Nährstoffeintragsituation im Rheineinzugsgebiet der Schweiz an die Internationale Kommission zum Schutze des Rheins (IKSR). Mit MODIFFUS wird der Teil des Schweizer Rheineinzugsgebiets flussabwärts der grossen Seen (REZGUS) berechnet (Abb. 46), welcher eine Fläche von 943'504 ha aufweist. Eine exakte Aussage bzw. Abschätzung zu den Nährstofffrachten, welche oberhalb der grossen Seen eingetragen werden, ist nicht möglich, da die Seen als grosse Sedimentfallen fungieren. Je nach See (Grösse, Tiefe, Durchmischung etc.) und Nährstoff (Gesamt-N, Gesamt-P und gelösten P) ist mit unterschiedlichen Umwandlungsprozessen und Rückhalten zu rechnen (s. Kap. 4.2).

Bei den Berechnungen mit MODIFFUS für den gesamten Hochrhein fehlen also die Daten zu den Einträgen oberhalb der grossen Seen sowie aus dem deutschen Teil des Einzugsgebietes zwischen Stein am Rhein und Basel. Gemäss FGG Rhein (2020) hat der deutsche Teil am Hochrhein eine Fläche von rund 230'000 ha (Abb. 47). Es handelt sich überwiegend um die Einzugsgebiete von Wutach und Wiese (UVM, 2005). Beide Flüsse entspringen dem Schwarzwald und sind stark bewaldet (53 % Wald, 27 % Grasland, 13 % Ackerland). Fuchs et al. (2017) haben mit dem Stoffflussmodell MoRE die Stoffeinträge für den deutschen Teil des Hochrheins berechnet. Sie kommen für das Jahr 2010 auf Gesamteinträge (diffus und punktuell) von 3550 t N und 268 t P. Damit sind die Frachten deutlich grösser als diejenigen, die von Hürdler et al. (2015) abgeschätzt wurden. Für die Veränderung der Stoffeinträge bis zum Jahr 2020 wurden die Werte von Fuchs et al. (2017) in Anlehnung an die gemessenen mittleren Stofffrachten in Weil am Rhein (s. Abb. 48) beim Stickstoff nicht und beim Phosphor um -10 % korrigiert. Entsprechend wurden 3550 t N und 241 t P in Tabelle 65 für 2020 eingesetzt. Um die Nährstoffeinträge aus dem flussaufwärts gelegenen Teil des Einzugsgebiets zu berücksichtigen, wurden für MODIFFUS 2020 die von Prasuhn & Hurni (1999) geschätzten Nährstofffrachten für die Seenauslässe verwendet (25'815 t N, 442 t P). Diese wurden dann ebenfalls in Anlehnung an die gemessenen Frachten der vergangenen Jahre der NADUF-Messstelle in Weil am Rhein pauschal reduziert (N = -15 %; P = -35 %) (Abb. 48). Entsprechend ergeben sich für die Seenauslässe Frachten von 21'943 t N und 287 t P für 2020 (Tab. 65). Diese groben Abschätzungen der N- und P-Einträge aus den Seenauslässen und dem deutschen Teil des Hochrheins sind mit grossen Unsicherheiten behaftet und methodisch anders berechnet als in Hürdler et al. (2015).

Die gemessenen Stofffrachten in Weil am Rhein unterliegen starken jährlichen Schwankungen (Abb. 48), welche vor allem durch die unterschiedlichen Abflussmengen bestimmt werden. So sieht man z. B. deutlich, dass das nasse, abfluss- und erosionsreiche Jahr 2021 zu deutlich höheren N- und P-Frachten geführt hat als die Vorjahre. Wir haben daher die gleitenden Mittelwerte über zehn Jahre gebildet, um allfällige Trends sichtbar zu machen (Abb. 48). Bei N zeigt sich eine Abnahme zwischen 1995 und 2010; ab 2010 stagnieren die Jahresfrachten. Bei P gibt es eine deutliche Abnahme zwischen 1985 und 1995, dann eine etwas schwächere Abnahme bis 2012, und seit 2012 nur noch eine leichte Abnahme.

Der totale N-Eintrag im REZGUS hat 2020 gegenüber den Berechnungen für 2010 um 6 % abgenommen. Dies entspricht der Veränderung der mittleren N-Fracht, die in Weil am Rhein in diesen beiden Perioden gemessen wurde (-6 %). Die grösste Abnahme bei der berechneten Fracht gab es bei den Mischwasserentlastungen (methodisch bedingt) und bei der Auswaschung, analog zur Abnahme der diffusen N-Einträge in der gesamten Schweiz. Für das gesamte Einzugsgebiet oberhalb von Weil am Rhein (Schweiz, Deutschland, Österreich, Liechtenstein) wurde somit eine totale Fracht von 51'588 t N für 2020 berechnet. Die grob abgeschätzten N-Einträge aus den grossen Seen (40 %) und dem Einzugsgebiet Deutschland (7 %) sind anteilig relativ gross. Der Mittelwert 2010-2021 der gemessenen N-Frachten an der Pegelmessstation beträgt mit 47'126 t N rund 9 % weniger als die berechnete N-Fracht. Für den Pegelabgleich weiterer hydrologischer Einzugsgebiete siehe Kapitel 4.2.

Der totale P-Eintrag im REZGUS hat 2020 gegenüber den Berechnungen für 2010 um 14 % abgenommen. Die mittleren gemessenen P-Frachten in Weil am Rhein für diese beiden Perioden zeigen mit 20 % eine etwas grössere Abnahme. Die grösste Abnahme bei der berechneten Fracht gab es bei den punktuellen Einträgen (ARA und Mischwasserentlastungen, überwiegend methodisch bedingt) und bei der Bodenerosion von Ackerland (ebenfalls überwiegend methodisch bedingt). Für das gesamte Einzugsgebiet Weil am Rhein wurde für 2020 eine totale Fracht von 1351 t P berechnet. Die grob abgeschätzten P-Einträge aus den grossen Seen (25 %) und dem Einzugsgebiet

Deutschland (8 %) sind anteilig relativ gross. Der Mittelwert 2010-2021 der gemessenen P-Frachten an der Pegelmessstation beträgt mit 1088 t P rund 19 % weniger als die berechnete Fracht. Für den Pegelabgleich weiterer hydrologischer Einzugsgebiete siehe Kapitel 4.2.

Die Empfehlung "PARCOM recommendation 88/2 of 17 June 1988" on the reduction in inputs of nutrients to the Paris convention area" hat als Ziel für Stickstoff formuliert: „Reduktion der Stickstoffeinträge in die Gewässer um 50% gegenüber 1985“. Dieses Ziel wird auch im Bericht „Umweltziele Landwirtschaft“ (BAFU & BLW 2008) als „Allgemeines Umweltziel“ für Stickstoff aufgeführt und bezieht sich auf das Rheineinzugsgebiet der Schweiz (Zufluss zur Nordsee) (OSPAR, 2008). Dazu liegen Jahresfrachten aus Pegelmessdaten (Weil am Rhein) und Modellrechnungen für die Stickstoffeinträge in das REZGUS für 1985 vor (Prasuhn & Sieber 2005). Demnach betragen die gesamten N-Einträge 1985 für das Einzugsgebiet Weil am Rhein 74'249 t. Entsprechend kann auf der Basis der neuen MODIFFUS-Berechnungen für 2020 (51'588 t N) die Zielerreichung der PARCOM- Empfehlung bzw. des allgemeinen Umweltziels für Stickstoff – mit der Einschränkung, dass ein Teil dieses Einzugsgebietes im Ausland liegt – beurteilt werden. Danach konnte dieses Ziel mit einer Reduktion von rund 31 % nicht erreicht werden.

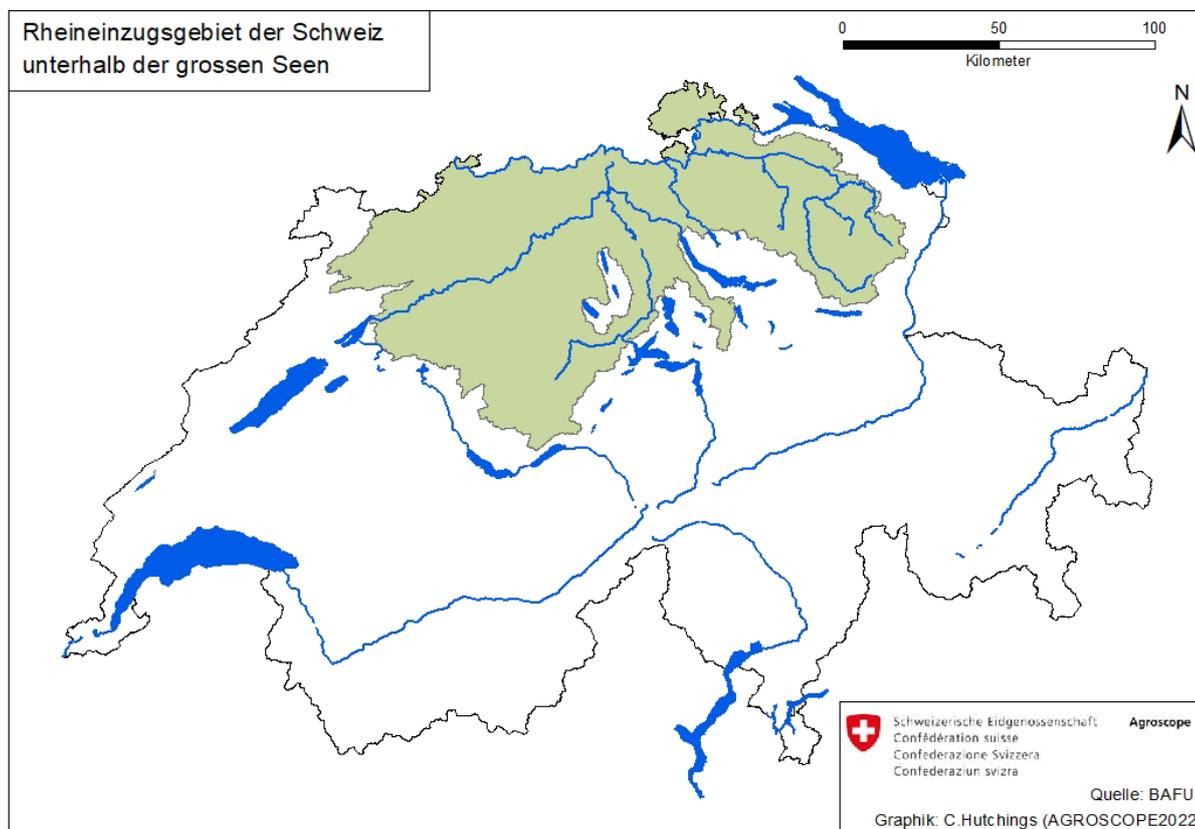


Abbildung 46: Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der grossen Seen.

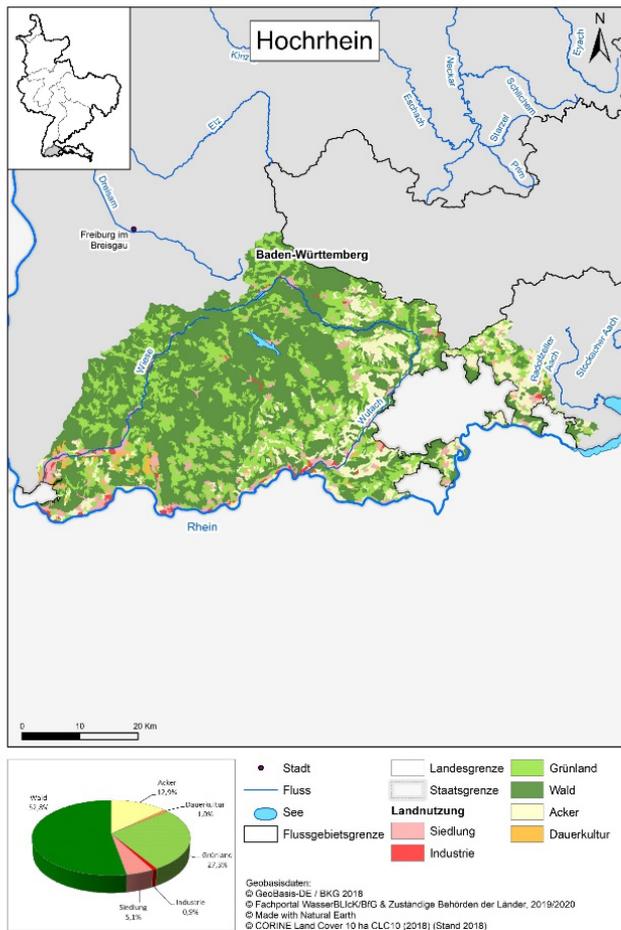


Abbildung 47: Landnutzung des deutschen Teils des Hochrheins (Quelle: FGG Rhein, 2020).

Tabelle 65: Zusammenstellung sämtlicher berechneter und abgeschätzter N- und P-Einträge aus punktuellen und diffusen Quellen für das REZGUS und das gesamte Einzugsgebiet Weil am Rhein sowie Vergleich mit den gemessenen Stofffrachten in Weil am Rhein für 2010 und 2020.

	N in Tonnen						P in Tonnen					
	2010	%-Anteil N	2020	%-Anteil N	Diff t	Diff %	2010	%-Anteil P	2020	%-Anteil P	Diff t	Diff %
Abwasserreinigungsanlagen	9'358	19	9'432	21	74	1	329	23	279	24	-49	-15
Mischwasserentlastungen	1'265	3	276	1	-989	-78	87	6	36	3	-51	-59
Abschwemmung	435	1	373	1	-61	-14	176	12	164	14	-12	-7
Auswaschung	15'809	32	15'180	33	-629	-4	88	6	72	6	-16	-18
Auswaschung & Abschwemmung von vegetationslosen Flächen	44	0	23	0	-21	-48	0.3	0	0.3	0	0	-14
Direkteinträge ^a	193	0	193	0	0	0	22	2	22	2	0	0
Erosion von landwirtschaftlicher Nutzfläche	79	0	64	0	-15	-18	82	6	56	5	-26	-32
Sonstige Erosion	427	1	378	1	-49	-12	171	12	190	17	19	11
Deposition auf Gewässer	207	0	176	0	-31	-15	4	0	3	0	-1	-17
REZGUS CH	27'816	56	26'095	53	-1'721	-6	958	68	822	72	-136	-14
Nährstoffaustrag aus grossen Seen	19'424	39	21'943	40	2518	13	346	25	287	21	-59	-17
Einzugsgebiet Deutschland (Basel - Bodensee)	3550 ^b	6	3'550	7	0	0	268 ^b	8	241	7	-27	-10
Gesamt Weil am Rhein MODIFFUS	50'791		51'588		797	2	1'573		1'351		-222	-14
Gesamt Weil am Rhein NADUF	49'994		47'126		-2'868	-6	1'357		1'088		-269	-20
Abweichung (%)	2		9				14		19		6	
Messjahre NADUF berücksichtigt	2005-2010		2010-2021				2005-2010		2010-2021			

^a = 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 Zwecke der Fischerei und Wassergeflügel)

^b Werte aus Fuchs et al. (2017)

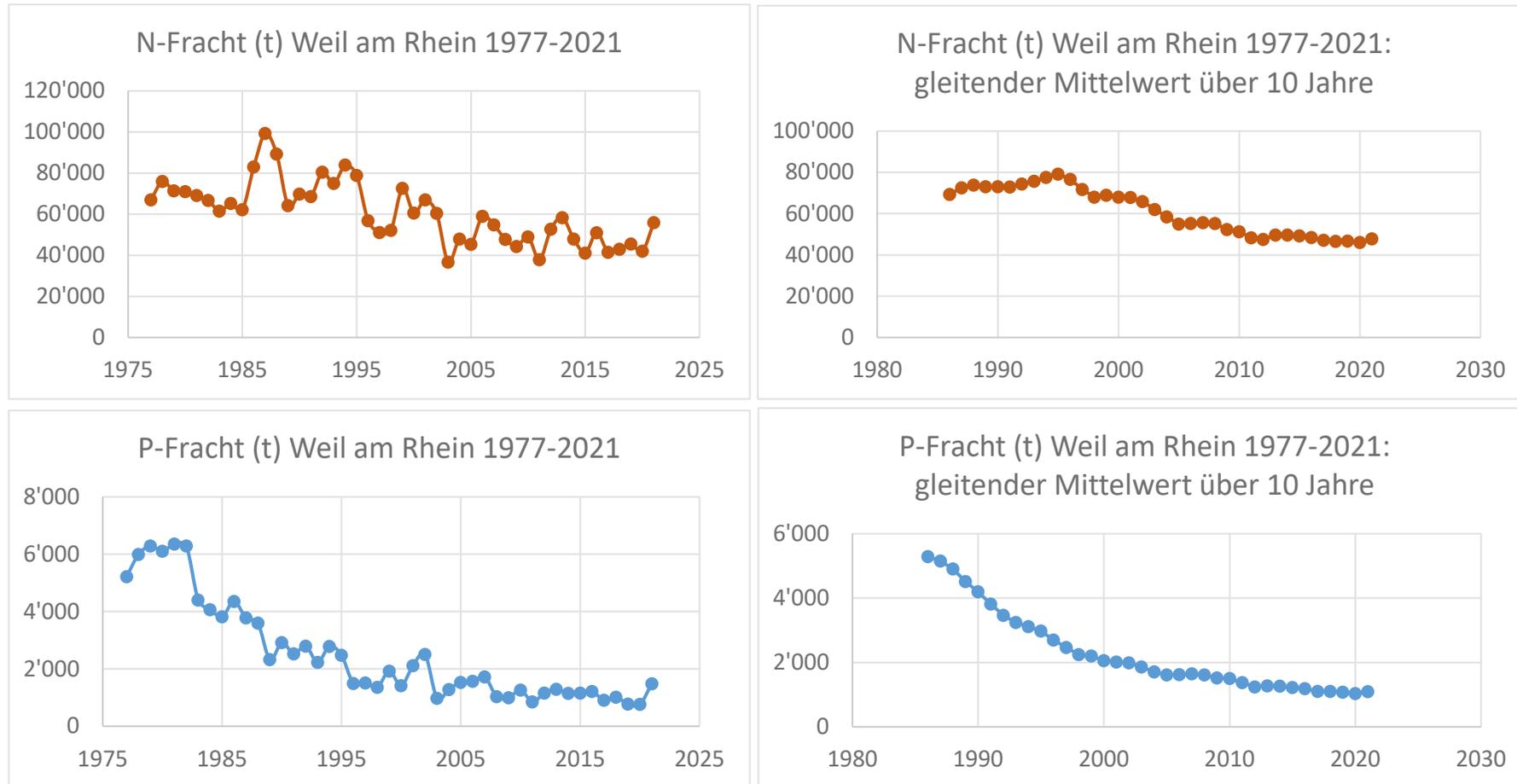


Abbildung 48: Gemessene N- und P-Frachten bei Weil am Rhein. Jährliche Fracht 1977-2021, sowie gleitender Mittelwert über 10 Jahre für den Zeitraum 1977-2021. Daten: NADUF Weil am Rhein (Quelle: BAFU, 2022b).

3.6 Ergebnisse für die Europäische Umweltagentur (River Basin Districts)

Für die Betrachtung auf hydrologischer Ebene wurde die Einzugsgebietseinteilung der European Environmental Agency (EEA) bzw. Europäische Umweltagentur (EUA) verwendet (EEA, 2022). Diese Daten benötigt das BAFU für die Berichterstattung an die EEA (s. Anhang D). Hierbei dienen die „River Basin Districts“ (RBD) als Grundlage der Ergebnisdarstellung (Abb. 49). Die Schweiz hat Flächenanteile an fünf RBD.

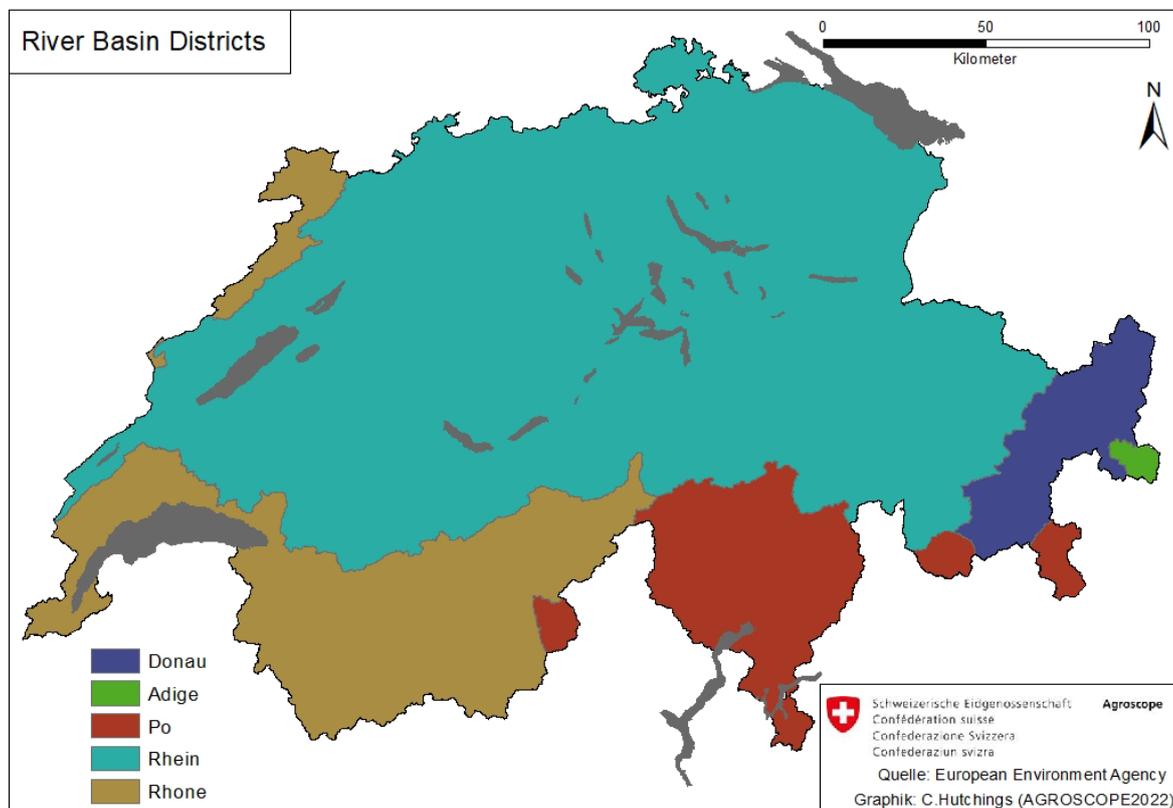


Abbildung 49: River Basin Districts gemäss European Environmental Agency.

Die flächenanteilmässig kleinsten RBD Adige und Donau haben einen niedrigen flächenspezifischen und diffusen N-Eintrag von 3 kg/ha und auch der absolute diffuse Eintrag und der Anteil von Punktquellen ist hier sehr klein (Tab. 66). Auf Grund des geringen Anteils an landwirtschaftlich genutzter Fläche und des hohen Anteils an alpinen Nutzungsformen und Wäldern tendiert der flächenspezifische N-Eintrag hier zu natürlichen Hintergrundbedingungen. Der RBD Rhein zeigt mit einem flächenspezifischen Eintrag von 13.3 kg/ha den höchsten diffusen N-Eintrag. In allen RBD überwiegen die Einträge aus diffusen Quellen gegenüber den Punktquellen. Auch beim Phosphor (Total, gesamt und gelöst) haben die RBD Adige und Donau die geringsten flächenspezifischen und absoluten diffusen P-Einträge (Tab. 67). Die flächenspezifischen Gesamt-P-Einträge sind im RBD Rhone an höchsten, die flächenspezifischen gelösten diffusen P-Einträge im RBD Rhein. Abweichungen zu den in Hürdler et al. (2015) publizierten Werten für 2010 ergeben sich aus den in Kapitel 3.3.2 und 3.3.3 bereits diskutierten realen und methodischen Veränderungen.

Tabelle 66: Stickstoffeinträge 2020 pro River Basin District (RBD).

RBD	Fläche (ha)	Gesamt-N (t)	Gesamt-N (kg/ha)	Gesamt-N punktuell ^a (t)	Gesamt-N punktuell ^a (kg/ha)	Gesamt-N diffus (t)	Gesamt-N diffus (kg/ha)
Rhein	2'787'444	53'750	19.3	16'661	6.0	37'090	13.3
Rhone	763'129	11'498	15.1	5'047	6.6	6'451	8.5
Donau	180'768	660	3.7	125	0.7	535	3.0
Po	383'967	4'378	11.4	987	2.6	3'391	8.9
Adige	12'979	39	3.0	0	0.0	39	3.0
CH	4'128'287	70'325^b	17.0	22'819^b	5.5	47'506^b	11.5

^a inklusive Mischwasserentlastungen

^b geringe Abweichung zu den Werten in Tab. 51 und Tab. 63 resultieren aus Verschneidungen von Rasterdaten mit verschiedenen Polygondaten im GIS

Tabelle 67: Phosphoreinträge 2020 pro River Basin District (RBD).

RBD	Fläche EZG (ha)	Gesamt-P (t)	Gesamt-P (kg/ha)	Gesamt-P punktuell ^a (t)	Gesamt-P punktuell ^a (kg/ha)	Gesamt-P diffus (t)	Gesamt-P diffus (kg/ha)	P gelöst diffus (t)	P gelöst diffus (kg/ha)
Rhein	2'787'290	2'425	0.87	459	0.16	1'965	0.71	596	0.21
Rhone	763'008	1'080	1.42	164	0.22	916	1.20	89	0.12
Donau	180'762	81	0.45	7	0.04	74	0.41	13	0.07
Po	383'898	447	1.16	31	0.08	415	1.09	44	0.11
Adige	12'983	2	0.13	0	0.00	2	0.13	1	0.08
CH	4'127'941	4'034	0.98	662^b	0.16	3'372^b	0.82	744	0.18

^a inklusive Mischwasserentlastungen

^b geringe Abweichung zu den Werten in Tab. 55 und Tab. 64 resultieren aus Verschneidungen von Rasterdaten mit verschiedenen Polygondaten im GIS

3.7 Ergebnisse für die OECD

Die OECD und Eurostat erheben regelmässig Daten zur Gewässerqualität für alle beteiligten Länder (OECD, 2017). Das BAFU liefert die entsprechenden Daten. Unter Punkt 3a wird der “Share of agriculture in total emissions of nitrate and phosphate in surface water (%)” von OECD und Eurostat gewünscht.

Im Anhang E werden basierend auf verschiedenen Berechnungen mit MODIFFUS Vorschläge für diese Daten für verschiedene Jahre gemacht.

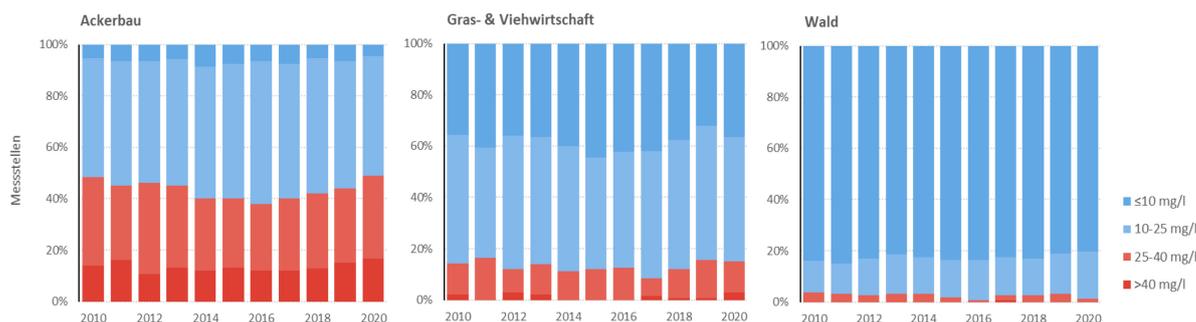
4 Plausibilisierung der Resultate

4.1 Vergleich mit gemessenen Nitrat-Konzentrationen im Grundwasser (NAQUA)

Um die mit MODIFFUS berechneten Stickstoffverluste durch Auswaschung zu überprüfen, wurden die berechneten N-Frachten für die Landnutzungskategorien Ackerland, Dauerwiesen und Heimweiden sowie Wald mit den berechneten Sickerwassermengen der jeweiligen Landnutzungskategorie verrechnet und zu Nitratkonzentrationen umgerechnet (Faktor 4.427). Diese Werte wurden mit den vom BAFU (2022c) gelieferten Daten (s. Kap. 2.1.10) zur mittleren Nitratkonzentration im Grundwasser verglichen. Müller et al. (2020) haben die mit MODIFFUS 2010 berechnete N-Auswaschung unter der landwirtschaftlich genutzten Fläche von 22 kg N/ha/Jahr mit einer angenommenen mittleren Grundwasserneubildung von 5000 m³/ha/Jahr verrechnet. Dies ergab eine mittlere Konzentration von 4.4 mg N/l (= 19.5 mg/l Nitrat) im Grundwasser und entsprach sehr gut den mittleren gemessenen N-Konzentrationen im Grundwasser von 42 ausgewählten NAQUA-Messstellen und Messungen aus 120 Grundwasserfassungen im Kt. Zürich.

Das BAFU erfasst im Rahmen der Nationalen Grundwasserbeobachtung (NAQUA) den Zustand und die Entwicklung der Grundwasserressourcen gemeinsam mit den kantonalen Fachstellen. An allen knapp 550 Messstellen der Module TREND und SPEZ werden jeweils ein- bis viermal pro Jahr Nitratanalysen durchgeführt (BAFU, 2019). Nitrat überschreitet gemäss BAFU an fast 15 % aller Messstellen den Grenzwert von 25 mg/l im Grundwasser landesweit. In überwiegend ackerbaulich geprägten Gebieten liegen die Konzentrationen bei 50 % der Messstellen über dem Grenzwert (Abb. 50).

Abbildung 50: Nitrat im Grundwasser (2010 bis 2020) in Relation zur Hauptbodennutzung. Grundlage: Maximalwert der Nitrat-



Konzentration pro NAQUA-Messstelle. Messstellen je Hauptbodennutzung. Die Hauptbodennutzung ist die Bodennutzung mit dem grössten Flächenanteil im Einzugsgebiet einer Messstelle (Quelle: BAFU 2022c).

Der Mittelwert der Nitratkonzentrationen im Grundwasser liegt an Messstellen, deren Einzugsgebiet zu mehr als 60 % ackerbaulich genutzt wird, bei 30.7 mg/l (Tab. 68). Die Streuung ist aber relativ hoch (Abb. 50). Ein Trend zwischen 2010 und 2020 ist nicht zu erkennen. Die mit MODIFFUS 2020 berechnete Nitratkonzentration im Sickerwasser unter Ackerland liegt mit durchschnittlich 33.5 mg/l deutlich höher (Tab. 69). Dies war zu erwarten, da in den untersuchten Grundwasserfassungen des BAFU auch andere Nutzungen wie Wald oder Grasland mit deutlich geringeren Nitratkonzentrationen vorkommen. Wald und Grasland haben zusätzlich meist auch höhere Sickerwassermengen als Ackerland (weniger Oberflächenabfluss, weniger Drainage, höher gelegene Einzugsgebietsteile mit höheren Niederschlagsmengen) und führen dadurch zu einer Verdünnung der Nitratkonzentrationen im Grundwasser. Weiterhin ist zu erwarten, dass ein Teil des Stickstoffs beim Transport bis zum Grundwasser je nach Standortbedingungen und Tiefe des Grundwasserleiters reduziert wird (z. B. durch Denitrifikation). In vielen Zuströmbereichen von flussnahen Grundwasserfassungen ist auch mit einer signifikanten Verdünnung durch infiltrierendes Flusswasser (vor allem bei Fassungen in den grossen Flusstälern von Rhone, Aare, Rhein, Ticino) oder seitwärts zuströmendes nitratarmes Grundwasser zu rechnen (vgl. auch Prasuhn et al., 2016). Eine Studie von Baillieux et al. (2014) in der Region Berner Seeland zeigt, wie direkte und indirekte Auswirkungen von Fliessgewässern die räumliche Verteilung der Nitratkonzentrationen in einem alluvialen Grundwasserleiter steuern können. Es wurden drei Hauptfaktoren ermittelt: (1) diffuse Verschmutzungsquellen aus der Landwirtschaft; (2) Verdünnungsprozesse infolge von Flusswasserinfiltrationen und (3) Denitrifikationsprozesse, die durch die räumliche Variabilität von Hochwasserablagerungen

(hydromorphe Böden) gesteuert wurden. Infolge von Verdünnung und Denitrifikation können die Nitratwerte trotz intensiver landwirtschaftlicher Nutzung im gesamten Einzugsgebiet relativ niedrig bleiben.

Tabelle 68: Nitrat im Grundwasser (2010 bis 2020). Grundlage: Maximalwert der Nitrat-Konzentration pro NAQUA-Messstelle 2010 bis 2020 für verschiedene Bodennutzungen mit einem Flächenanteil von >60 % im Einzugsgebiet einer Messstelle (Quelle: BAFU, 2022c).

	Ackerbau ≥60%	Futterbau ≥60%	Wald ≥60%
Jahr	Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert
	mg/l	mg/l	mg/l
2010	31.9	13.2	6.4
2011	32.1	12.9	6.1
2012	30.0	12.3	6.1
2013	30.8	12.3	6.3
2014	30.3	12.2	6.3
2015	30.3	11.6	6.1
2016	30.4	11.7	5.9
2017	29.0	12.2	6.7
2018	30.4	12.2	6.0
2019	30.7	13.4	6.3
2020	32.1	14.9	6.0
Mittel	30.7	12.6	6.2

Der Mittelwert der Nitrat-Konzentrationen im Grundwasser unter Messstellen, deren Einzugsgebiet überwiegend für Gras- und Viehwirtschaft genutzt wird, liegt im Mittel bei 12.6 mg/l. Die Streuung der Werte ist sehr hoch (Abb. 50). Ein Trend zwischen 2010 und 2020 ist nicht zu erkennen. Die mit MODIFFUS 2020 berechnete Nitratkonzentration im Sickerwasser unter Dauerwiesen und Heimweiden liegt mit 8.3 mg/l deutlich niedriger (Tab. 69). Die NAQUA-Messstellen, deren Einzugsgebiete überwiegend mit Grasland genutzt werden, liegen mehrheitlich in den Voralpen oder im Jura. In diesen Regionen ist zusätzlich sowohl mit Waldflächen mit niedrigeren N-Konzentrationen als auch mit Ackerflächen mit höheren N-Konzentrationen zu rechnen. Da die N-Konzentrationen unter Ackerland gemäss MODIFFUS um Faktor 4 höher liegen als unter Grasland, während die N-Konzentrationen in Waldflächen nur um Faktor 2.9 niedriger sind als bei Grasland, sind in gemischten Graslandgebieten im Mittel höhere N-Konzentrationen zu erwarten als unter reiner Graslandnutzung.

Der Mittelwert der Nitrat-Konzentrationen im Grundwasser von Messstellen, deren Einzugsgebiet zu mehr als 60 % mit Wald bedeckt ist, liegt bei 6.8 mg/l (Tab. 69). Die die Streuung der Werte ist sehr hoch (Abb. 50). Ein Trend zwischen 2010 und 2020 ist nicht zu erkennen. Die mit MODIFFUS 2020 berechnete Nitratkonzentration im Sickerwasser in Waldflächen liegt mit 2.9 mg/l deutlich niedriger (Tab. 69). Dies war zu erwarten, da in den Einzugsgebieten der NAQUA-Messstellen auch andere Nutzungen wie Ackerland oder Grasland mit deutlich höheren Nitratkonzentrationen vorkommen. Waldner et al. (2019) haben ebenfalls ihre modellierten N-Auswaschungsfrachten für Waldflächen mit gemessenen N-Konzentrationen ausgewählter Grundwassermessstellen des NAQUA verglichen bzw. validiert. Sie haben für 59 ausgewählte Probenahmestellen des NAQUA mit einem Waldanteil von über 50 % im Einzugsgebiet die unterirdische Einzugsgebietsfläche gutachterlich abgeschätzt. In den Einzugsgebieten mit tiefem Waldanteil unterschätzte ihr Modell die gemessene N-Konzentration oft. Sie folgern, dass andere (meist landwirtschaftliche) Bodennutzungen mit einem kleinen Flächenanteil im Einzugsgebiet der Messstellen die Nitrat-Konzentration im Grundwasser stark beeinflussen können. Allerdings gab es auch bei einigen Einzugsgebieten mit einem sehr hohen Waldanteil grössere Abweichungen.

Tabelle 69: Modellierter diffuse Stickstofffracht, Sickerwassermenge sowie Nitratkonzentration unter der jeweiligen Landnutzung gemäss Arealstatistik für die Jahre 2010 und 2020.

Landnutzung gemäss Arealstatistik	Fracht				Sickerwasser				Konzentration			
	kg/ha		Veränderung		mm/ha		Veränderung		NO ₃ mg/l		Veränderung	
	2010	2020	kg/ha	%	2010	2020	mm/ha	%	2010	2020	mg/l	%
Ackerland	42	38	-5	-11	573	495	-78	-14	32.7	33.5	1.9	2.6
Heimweiden + Dauerwiesen	14	13	-1	-4	775	709	-65	-8	7.9	8.3	0.8	4.7
Wald	4	6	1	25	877	831	-46	-5	2.2	2.9	1.6	31.8

Fazit: Der Vergleich zwischen gemessenen mittleren Nitratkonzentrationen im Grundwasser für drei verschiedene Hauptbodennutzungen gemäss NAQUA und den Berechnungen mit MODIFFUS für die N-Auswaschung unter denselben Hauptbodennutzungen ist nur bedingt möglich. Einerseits beeinflussen andere Nutzungen in den Einzugsgebieten der Grundwasserfassungen die Nitratkonzentrationen positiv oder negativ, andererseits sind die mit MODIFFUS berechneten Auswaschungsverluste aus dem Wurzelraum unter einer bestimmten Nutzung (= Emissionsbetrachtung) und die im Wasser einer Grundwasserfassung gemessenen Nitratkonzentrationen (= Immissionsbetrachtung) nicht direkt vergleichbar. Verdünnungs- und Abbauprozesse beim Transport ins Grundwasser, die grosse zeitliche Verzögerung zwischen der Auswaschung aus dem Wurzelraum und dem Eintritt ins Grundwasser und die Durchmischung im Grundwasserkörper können zu grossen Unterschieden führen. Die Grössenordnung der mit MODIFFUS berechneten mittleren Nitratkonzentrationen unter den drei betrachteten Bodennutzungen stimmt mit den entsprechenden im Grundwasser gemessenen Werten überein.

Die Nitratkonzentrationen im Grundwasser vieler NAQUA-Messstellen gingen von 2010 bis 2015/2016 leicht zurück, sind seitdem aber wieder angestiegen. 2020 liegen sie insgesamt auf ähnlichem Niveau wie 2010. Die Zunahme bei den mit MODIFFUS für die Zeiträume um das Jahr 2010 und um das Jahr 2020 berechneten Nitratkonzentrationen sind teilweise methodisch bedingt (vor allem beim Wald), teilweise aber auch real. Trotz Abnahme der N-Auswaschungsfrachten (s. Kap. 3.3.2) führt gemäss Modell die Abnahme der Sickerwassermenge um 6.2 % (s. Kap. 3.2) zu einer Erhöhung der Nitratkonzentration im Sickerwasser.

4.2 Vergleich mit gemessenen N- und P-Frachten in Oberflächengewässern (NADUF)

Beim Vergleich von gemessenen N- und P-Frachten in Fliessgewässern aus dem NADUF-Datensatz (s. Kap. 2.1.10) mit den berechneten Stoffeinträgen in diese Gewässer mit MODIFFUS ist in Anlehnung an Hürdler et al. (2015) auf folgende Punkte zu achten:

- 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. Gemäss Müller et al. (2021) sind Seen Hotspots für den Rückhalt von N. Die Rückhalteeffizienz ist aber sehr unterschiedlich: beim Baldeggersee zwei Drittel der N-Fracht, beim Sarnersee nur ein Drittel. Müller et al. (2022) konnten zeigen, dass Denitrifikation und Sedimentation von N in den Schweizer Seen zu einer erheblichen Reduktion der N-Frachten im Ausfluss der Seen führen. Denitrifikation ist dabei von grösserer Bedeutung als Sedimentation, wobei dies von See zu See und von Jahr zu Jahr

stark schwanken kann. Zwischen 14 und 88 % des N wurde in den 21 untersuchten Schweizer Seen zurückgehalten. Seen spielen demnach eine essentielle Rolle beim Transport von N, indem sie viel N zurückhalten. Müller et al. (2021) folgern, dass Seen somit zur Verminderung der Eutrophierung von Flüssen flussabwärts bzw. der Meere beitragen.

- 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 Probennahme stammen. Nur dann sind hochwasserbedingten Stofffrachten adäquat berücksichtigt. Mit einzelnen Tauchproben wird häufig die Stofffracht unterschätzt, 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 sind mit Unsicherheiten behaftet.

Die NADUF-Messstationen sind sowohl Abfluss- bzw. Pegelstationen als auch Qualitätsstationen zur Bestimmung von Konzentrationen bzw. Frachten von geogenen Elementen und Nährstoffen. Sie werden im Folgenden vereinfacht als Pegelstationen bezeichnet. Aus dem Datensatz des BAFU aller NADUF-Messstationen (s. Kap. 2.1.10) wurden acht Einzugsgebiete ausgewählt, die bezüglich Mindestgrösse ($> 50 \text{ km}^2$) und wenig oder keine Beeinflussung durch grosse Seen, geeignet erschienen. Es handelt sich um drei Einzugsgebiete im östlichen Mittelland (Glatt, Thur, Murg), zwei in den Voralpen (Sitter, Kleine Emme) und drei in den Alpen (Rhone, Inn, Ticino) (Abb. 51). Keine geeigneten Einzugsgebiete lagen aus dem westlichen Mittelland und dem Jura vor. Der Rhein wird in Kapitel 3.5 separat behandelt.

Beim Stickstoff konnte bei fünf von acht Einzugsgebieten (Thur, Murg, Sitter, Kleine Emme, Rhone) eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten mittleren jährlichen Stofffrachten erzielt werden (Tab. 70). Im Einzugsgebiet der Glatt befinden sich der Greifensee und der Pfäffikersee. Das Einzugsgebiet unterhalb dieser Seen beträgt nur 60 % der gesamten Einzugsgebietsfläche. Es ist davon auszugehen, dass in den beiden Seen ein Grossteil der N- und P-Frachten aus dem oberen Einzugsgebietsteil, der überwiegend landwirtschaftlich genutzt wird, zurückgehalten wird. Im unteren Einzugsgebietsteil ist zudem der Anteil an Siedlungsflächen sehr hoch, die Einträge aus Punktquellen sind entsprechend hoch. Daher ist es plausibel, dass mit MODIFFUS deutlich höhere N- und P-Einträge berechnet wurden, als an den Pegelstellen gemessen wurden. Der Inn durchfliesst im oberen Einzugsgebietsteil den Silsersee, den Silvaplanersee und den St. Moritzersee. Hier sind grosse Nährstoffrückhalte zu erwarten. Weiterhin werden im Einzugsgebiet grosse Wassermengen zur Energiegewinnung abgeleitet. Entsprechend war zu erwarten, dass die gemessenen Stofffrachten am Pegel geringer sind als die mit MODIFFUS berechneten diffusen Einträge. Der Ticino ist in weiten Teilen ein alpiner Fluss. Warum die am Pegel gemessenen N-Frachten höher als die mit MODIFFUS berechneten N-Einträge sind, entzieht sich unserer Kenntnis. Es lagen aber auch nur Daten von drei Messjahren (2013-2015) vor. In den Jahren 2005 und 2006 lagen die gemessenen N-Frachten mit 1'398 t N/Jahr in der gleichen Grössenordnung wie die mit MODIFFUS berechnete Fracht (vgl. Hürdler et al., 2015).

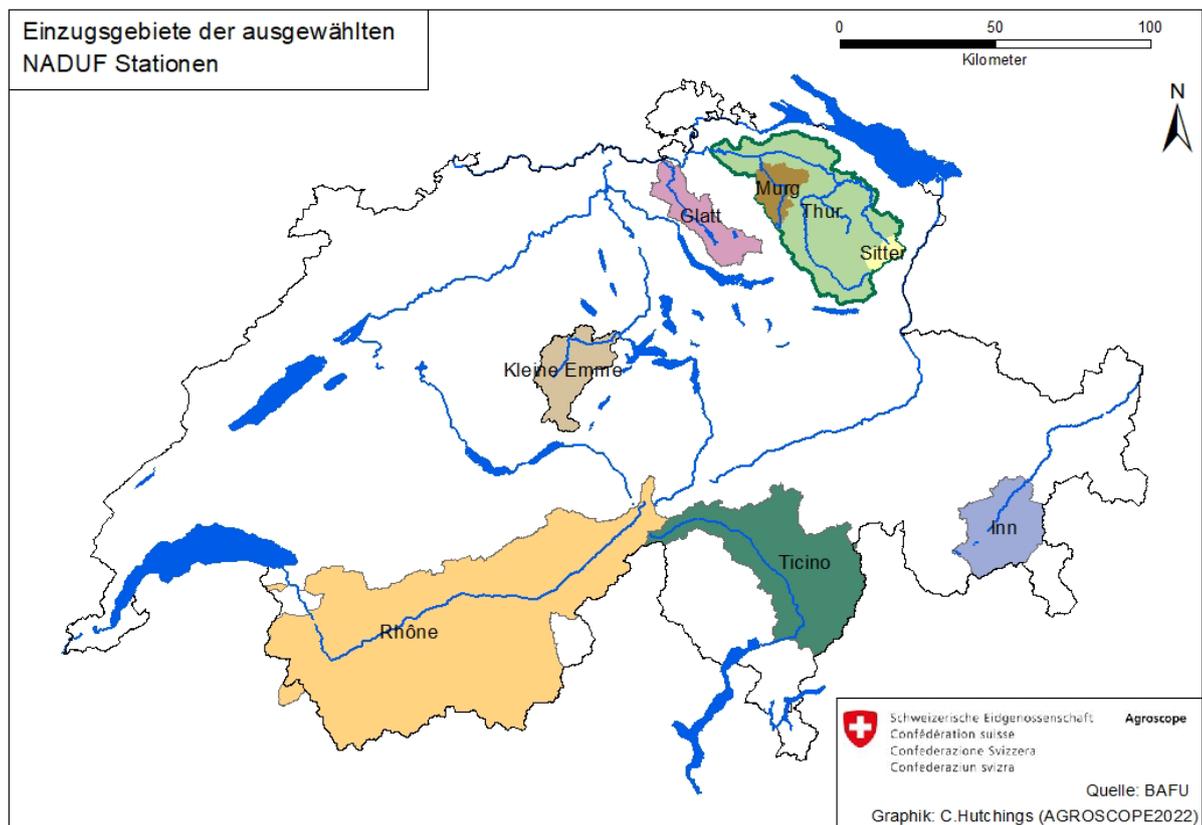


Abbildung 51: Hydrologische Einzugsgebiete der ausgewählten NADUF-Messstationen.

Beim N überwiegen in allen acht Einzugsgebieten die diffusen Einträge an den Gesamtfrachten (Tab. 73). Im Einzugsgebiet der Sitter gibt es keine punktuellen Einträge, in der Glatt ist der Anteil der punktuellen Einträge mit 45 % am höchsten. Beim N ist bei der Thur, der Glatt und der Rhone kein Trend einer Veränderung aus dem Verlauf der Pegelraten zwischen 2012 und 2021 ersichtlich. Einzig beim Inn ist ein leichter Rückgang zu erkennen und bei den anderen Messstationen sind die Daten nur für drei Messjahre vorhanden.

Tabelle 70: Kennwerte ausgewählter Pegelmessstationen und Vergleich der am Pegel gemessenen und mit MODIFFUS berechneten Gesamt-N-Einträge (diffus und punktuell).

Fluss und Pegelstation	Fläche km ²	Neigung	Nieder- schlag mm	Gesamt-Stickstoff (t/Jahr)				Pegel- Jahre
				Pegel- messwert	MO- DIFFUS	Abwei- chung (%)	nur diffus kg/ha	
Glatt - Rheinsfel- den	417	5.2	1156	890	1561	75	20.4	2012-2021
Thur - Andelfin- gen	1702	10.2	1429	3649	3792	4	15.4	2012-2021
Murg - Frauenfeld	213	7.7	1197	538	585	9	18.1	2010-2013
Sitter - Appenzell	74	21.0	1914	84	82	-3	11.0	2010-2013
Kleine Emme - Emmen	478	15.7	1657	639	617	-3	11.6	2019-2021
Rhone - Porte-du- Scex	5238	25.7	1372	3949	4226	7	5.1	2012-2021
Ticino - Riazzino	1613	28.7	1717	2558	1396	-45	7.4	2013-2015
Inn – S-chanf	616	24.1	1063	180	278	55	3.2	2012-2021

Beim Gesamt-Phosphor wurde in sieben von acht Einzugsgebieten eine z. T. massiv höhere Fracht aus diffusen und punktuellen Quellen berechnet als an den Pegeln gemessen wurde (Tab. 71). Eine Überschätzung der Emissionsbetrachtung gegenüber der Immissionsbetrachtung war zu erwarten gewesen. Partikulärer Phosphor kann im jeweiligen Einzugsgebiet an zahlreichen Stellen sedimentiert werden (Seen, Stauseen, Talauen etc.). In der Glatt stammen 53 % des gesamten P und 61 % des gelösten P aus punktuellen Quellen, überwiegend aus dem unteren Einzugsgebietsteil unterhalb von Greifen- und Pfäffikersee. Die aus dem Rückhalt in Greifen- und Pfäffikersee zu erwartende starke Reduktion der diffusen P-Fracht wird dadurch etwas kompensiert und die Abweichungen zwischen gemessener Pegelfracht und berechneten Gesamt-P-Einträgen ist vergleichsweise gering. Für die höhere gemessene P-Fracht am Pegel gegenüber der berechneten P-Fracht in der Murg konnte keine plausible Erklärung gefunden werden. Die höheren berechneten P-Frachten gegenüber den gemessenen Werten in Glatt, Thur, Rhone und Ticino liegen in der gleichen Grössenordnung und dürften einerseits auf die angesprochenen Rückhalte in den Einzugsgebieten zurückzuführen sein, andererseits aber auch auf die Unsicherheiten bei der Abschätzung der P-Einträge über sonstige Erosion. In den beiden voralpinen Flüssen Sitter und Kleine Emme sind die Unterschiede deutlich grösser. Hier dürfte der Einfluss der sonstigen Erosion noch grösser sein. Die massiv höhere berechnete P-Fracht im Inn ist auf die weiter oben angesprochene Beeinflussung durch mehrere Seen und viele Wasserableitungen und -entnahmen zu erklären.

Beim P-Gesamt sind unterschiedliche Trends bei den gemessenen P-Frachten an den Pegeln zu erkennen: In Thur und Glatt gehen die gemessenen Frachten in den letzten zehn Jahren leicht zurück, in der Rhone sind sie konstant geblieben und im Inn nehmen sie leicht zu.

Beim Vergleich der gelösten gemessenen P-Frachten und berechneten P-Frachten sind die Unterschiede überall sehr gross (Tab. 72). Beim gelösten P handelt es sich bei den Pegelmessdaten nur um den «Dissolved Reactive Phosphorus (DRP)», bei den MODIFFUS-Berechnungen um den totalen gelösten P, welcher höher ist. Auch wurden vereinfachte Annahmen bezüglich der Anteile von gelöstem P am Gesamt-P getroffen (s. Kap. 1.3). Eine weitere Erklärung dürfte sein, dass ein erheblicher Teil des P, der gelöst in ein Gewässer gelangt, auf der Fließstrecke bis zum Pegel an Schwebstoffe adsorbiert wird und dort dann als partikulärer P gemessen wird. Weiterhin dürfte ein Teil des gelösten P von Pflanzen und Tieren aufgenommen werden.

Beim gelösten P ist in der Thur, in der Glatt und in der Rhone bei den gemessenen P-Frachten eine Abnahme zu erkennen, im Inn ist kein Trend zu erkennen.

Tabelle 71: Kennwerte ausgewählter Pegelmessstationen und Vergleich der am Pegel gemessenen und mit MODIFFUS berechneten Gesamt-P-Einträge (diffus und punktuell).

Fluss und Pegel Station	Fläche km ²	Neigung	Nieder- schlag mm	Gesamt-Phosphor (t/Jahr)				Pegel- Jahre
				Pegel- messwert	MO- DIFFUS	Abwei- chung (%)	nur diffus (kg/ha)	
Glatt - Rheinsfel- den	417	5.2	1156	21.0	29.4	40	0.33	2012-2021
Thur - Andelfin- gen	1702	10.2	1429	123.4	183.0	48	0.87	2012-2021
Murg - Frauenfeld	213	7.7	1197	20.2	14.4	-29	0.46	2010-2013
Sitter - Appenzell	74	21.0	1914	6.8	12.2	80	1.64	2010-2013
Kleine Emme - Emmen	478	15.7	1657	30.3	54.2	79	1.09	2019-2021
Rhone - Porte-du- Scex	5238	25.7	1372	587.0	868.1	48	1.56	2012-2021
Ticino - Riazzino	1613	28.7	1717	87.5	127.5	46	0.75	2013-2015
Inn - S-chanf	616	24.1	1063	23.0	50.6	120	0.77	2012-2021

Tabelle 72: Kennwerte ausgewählter Pegelmessstationen und Vergleich der am Pegel gemessenen und mit MODIFFUS berechneten gelösten P-Einträge (diffus und punktuell).

Fluss und Pegel Station	Fläche km ²	Neigung	Nieder- schlag mm	Gelöster Phosphor (t/Jahr)				Pegel- Jahre
				Pegel- messwert	MO- DIFFUS	Abwei- chung (%)	nur dif- fus (kg/ha)	
Glatt - Rheinsfel- den	417	5.2	1156	11.8	25.1	113	0.23	2012-2021
Thur - Andelfin- gen	1702	10.2	1429	37.4	98.3	163	0.37	2012-2021
Murg - Frauenfeld	213	7.7	1197	5.0	11.8	138	0.34	2010-2013
Sitter - Appenzell	74	21.0	1914	1.6	2.9	77	0.39	2010-2013
Kleine Emme - Emmen	478	15.7	1657	3.3	17.8	442	0.33	2019-2021
Rhone - Porte-du- Scex	5238	25.7	1372	22.2	90.7	309	0.08	2012-2021
Ticino - Riazzino	1613	28.7	1717	9.1	24.3	168	0.11	2013-2015
Inn – S-chanf	616	24.1	1063	1.0	8.0	722	0.07	2012-2021

Für das Einzugsgebiet des Baldeggersees (73 km²) haben Stoll et al. (2019) basierend auf Daten des Kantons Luzern zu P-Frachten aus Zuflussuntersuchungen und zur P-Deposition auf die Seefläche sowie Angaben zu Punktquellen eine algenverfügbare P-Fracht von 3.88 t/Jahr als Mittelwert für die Jahre 2012-2016 berechnet. Davon stammten rund 0.7 t/Jahr aus Punktquellen. Die mit MODIFFUS 2020 berechnete diffuse P-Fracht für das Einzugsgebiet Baldeggersee beträgt 3.1 t/Jahr für gelösten P und 3.8 t P/Jahr für Gesamt-P und stimmt somit sehr gut mit den gemessenen Einträgen überein.

Tabelle 73: Anteil der diffusen Einträge an den berechneten Gesamteinträgen (diffus plus punktuell) für die verschiedenen Einzugsgebiete.

Fluss und Pegel Sta- tion	Anteil diffuse Quellen (%)		
	N gesamt	P gesamt	P gelöst
Glatt - Rheinsfelden	55	47	39
Thur - Andelfingen	69	81	64
Murg - Frauenfeld	66	68	61
Sitter - Appenzell	100	100	100
Kleine Emme - Emmen	90	96	88
Rhone - Porte-du-Scex	63	94	44
Ticino - Riazzino	85	94	71
Inn - S-chanf	70	93	57

Fazit: Der Vergleich zwischen gemessenen N- und P-Frachten an Pegelmessstellen von Oberflächengewässern des NADUF und den Berechnungen mit MODIFFUS für die diffusen plus punktuellen N- und P-Einträge in den entsprechenden Einzugsgebieten ist nur bedingt möglich. Die mit MODIFFUS berechneten diffusen Einträge in die Gewässer (= Emissionsbetrachtung) sind meist höher – beim P oft massiv höher – als die an den Einzugsgebietsausgängen gemessenen mittleren Stofffrachten (= Immissionsbetrachtung). Die Grössenordnung der mit MODIFFUS berechneten N-Frachten sind aber plausibel. Auch Müller et al. (2022) und Stoll et al. (2019) konnten zeigen, dass die mit MODIFFUS 2010 bzw. 2020 berechneten N- und P-Einträge in zwei Schweizer Seen (Sempacher- und Baldeggersee) mit den langjährig gemessenen Daten sehr gut übereinstimmten. Eine Zu- oder Abnahme der N-Frachten in den ausgewählten Fließgewässern zwischen 2010 und 2020 ist nicht erkennbar.

4.3 Vergleich mit anderen Untersuchungen

Szenario-Berechnungen mit MODIFFUS und SWISSland

Prasuhn et al. (2016) haben basierend auf den Berechnungen mit MODIFFUS 3.0 für das Jahr 2010 verschiedene Szenarien für die Entwicklung der diffusen N- und P-Einträge in die Gewässer der Schweiz für die Jahre 2020 und 2025 gerechnet. Für die Berechnungen der Szenarien wurden nur die Veränderungen gemäss Resultaten aus SWISSland (Möhring et al., 2016) verwendet (Landnutzung, Kulturarten, Tierbestände). Es wurden die gleichen klimatischen Eingangsdaten wie für das Jahr 2010 verwendet. Das Szenario REF bildete das Basisszenario und stellt die Fortschreibung der Agrarpolitik AP14- 17 dar. Gemäss diesen Berechnungen haben in Szenario REF2020 und REF2025 die N-Einträge um 1329 t bzw. 1461 t (= jeweils 3 %) gegenüber 2010 abgenommen. Bei den diffusen Gesamt-P-Einträgen gab es eine Abnahme um 59 t (REF2020) bzw. 62 t (REF 2025), was jeweils einer Abnahme um 2 % entspricht. Bei den gelösten diffusen P-Einträgen lagen die Abnahmen bei 19 t (REF2020) und 21 t (REF2025), was ebenfalls je 2 % Abnahme bedeutet.

Die Neuberechnung mit MODIFFUS 3.1 für 2020 zeigt grössere Reduktionen der N- und P-Einträge gegenüber 2010 als die Szenario-Berechnungen. Beim N betrug die Abnahme zwischen 2010 und 2020 3977 t bzw. 8 %, wobei rund drei Viertel dieser Abnahme als real beurteilt wurde und ein Viertel als methodisch bedingt. Beim Gesamt-P betragen die Abnahme 109 t, davon wurde jedoch nur ein Sechstel als real eingestuft. Den grössten Unterschied gibt es beim gelösten P. Mit 165 t beträgt die Abnahme gegenüber 2010 18 %, von denen ein Viertel als real eingestuft wurden. Die Gründe für die etwas höheren Abnahmen mit MODIFFUS 3.1 gegenüber den Szenario-Berechnungen mit MODIFFUS 3.0 liegen neben den methodisch bedingten Veränderungen vor allem auch in der Berücksichtigung klimatischer Veränderungen bei MODIFFUS 3.1.

Nationale N- und P-Bilanzen der Landwirtschaft

Betrachtet man die nationale N- und P-Bilanzen zwischen 1990 und 2020 (Spiess & Liebisch, 2022), zeigt sich folgendes Bild: Der N-Überschuss nahm zwischen 1990 und 1997 um gegen 20 % ab und blieb danach bis 2018 konstant. Erst in den letzten beiden Jahren konnte wiederum ein Rückgang beobachtet werden, bei dem sich aufgrund der grossen Jahresschwankungen allerdings erst in einigen Jahren zeigen wird, ob er von Dauer ist. Der P-Überschuss nahm zwischen 1990 und 2005 um rund 75 % ab und liegt seither im Bereich von 5'000 t mit leicht sinkender Tendenz.

Die Entwicklung der nationalen Nährstoffüberschüsse ist zwar nicht direkt mit den Stoffeinträgen in die Gewässer vergleichbar. Aber dass sich die nationalen Bilanzen in den letzten zehn Jahren nicht signifikant verändert haben, deckt sich relativ gut mit den nur sehr geringen Abnahmen der mit MODIFFUS berechneten landwirtschaftsbedingten diffusen N- und P-Einträge in die Gewässer zwischen 2010 und 2020.

5 Ausblick

Mit der neuen Modellversion MODIFFUS 3.1 liegt eine aktuelle, mit den derzeit bestmöglichen verfügbaren Eingangsdaten versehene Modellierungsplattform für die Berechnung diffuser Nährstoffeinträge in die Gewässer der Schweiz vor. Nichtsdestotrotz sehen wir für die Zukunft weitere Verbesserungspotentiale oder Ausbaumöglichkeiten des bestehenden Modellansatzes. Nachfolgende Ideen skizzieren nur Potentiale für mögliche Modellanpassungen und Anwendungen. Die grösste Wirkung ist bei denjenigen Weiterentwicklungen zu sehen, die die wichtigsten Eintragspfade bzw. -quellen betreffen. Dies sind beim Stickstoff die Auswaschung unter Ackerland und beim gelösten Phosphor die Abschwemmung von Grasland. Inwieweit die vorgeschlagenen Weiterentwicklungen auch realisierbar sind, bedarf detaillierter Abklärungen. Dabei hängt es vor allem von der Datenverfügbarkeit (Beschaffung, Aufbereitung, Zeitpunkt, Qualität), von deren Implementierung (Aufwand) und vom Wissensstand (Literatur) bezüglich deren Auswirkungen auf die N- und P-Einträge in die Gewässer ab, wie leicht sie umzusetzen sind. Wir haben nachfolgend versucht, diesbezüglich eine Grobabschätzung vorzunehmen, wobei wir als Zeithorizont das Jahr 2030 veranschlagt haben (** = relativ einfach umsetzbar, * = mit mittlerem Aufwand umsetzbar, * = eher schwierig oder längerfristig umsetzbar).

- **A***:** Räumliche Auflösung verbessern: Anstelle der Arealstatistik (Hektarraster) könnten in Zukunft parzellenscharfe Daten (Polygone) zur landwirtschaftlichen Nutzung, wie sie von den Kantonen derzeit jährlich erhoben werden, verwendet werden. Dadurch könnten bestimmte Prozesse oder Faktoren wie z. B. das Erosionsrisiko und der Gewässeranschluss, welche im 2m-Raster vorliegen, räumlich besser abgebildet werden. Intensiv, wenig intensiv und extensiv genutzte Wiesen und Weiden sowie andere ökologische Ausgleichsflächen, Ackerflächen mit bodenschonender Bearbeitung, Graslandumbruch etc. könnten räumlich exakt dargestellt und deren Einfluss auf die Stoffeinträge berechnet werden. Bei den Ackerflächen könnten kulturspezifische oder auch fruchtfolgebasierte Berechnungen gemacht werden. Die Nitratmatrix könnte dann für Kulturkombinationen angewendet werden. Faktoren wie der C-Faktor oder der Hofdüngereffektor könnten parzellenscharf und nicht mehr nur auf Gemeindeebene in die Berechnungen eingehen. Parzellenscharfe Daten dürften vor allem die N- und P-Einträge über Erosion und Abschwemmung realitätsnaher abbilden, da die Reliefeigenschaften exakt abgebildet werden können. Fruchtfolgebasierte Berechnungen könnten vor allem die N-Auswaschung von Ackerflächen verbessern.
- **B*:** Nutzung bzw. Einbindung von Fernerkundungsdaten. Mittels Satellitendaten könnten beispielsweise landwirtschaftlich genutzte Flächen mit geringer oder keiner Bodenbedeckung identifiziert werden. Solche schlecht geschützten oder brachliegenden Flächen könnten für eine verbesserte Berechnung der Nitratauswaschung und des Erosionsrisikos verwendet werden.
- **C**:** Im Rahmen des Projekts digiFlux des BLW sollen in Zukunft auch räumliche Daten zum Mineraldüngereinsatz vorliegen. Diese müssten in MODIFFUS implementiert werden und könnten die Berechnung der diffusen N- und P-Einträge verbessern.
- **D*:** Die Bewässerung wird derzeit in MODIFFUS nicht berücksichtigt. Daten aus dem Projekt SwissIrrigationInfo von Agroscope und HAFL könnten zukünftig genutzt werden.
- **E*:** Zeitliche Auflösung verbessern: Bisher rechnet MODIFFUS mit langjährigen mittleren Jahreswerten bei Niederschlag und Verdunstung und den nachgeschalteten Wasserflüssen (Oberflächenabfluss, Drainage, Sickerwasser). Die Berücksichtigung saisonaler Aspekte (Sommer- und Winterhalbjahr oder die vier Jahreszeiten) könnte bestimmte Prozesse (z. B. Oberflächenabfluss, Erosion, Auswaschung) besser abbilden. Die Stoffflüsse könnten dann unter Einbezug weiterer Faktoren detaillierter modelliert werden. So könnten z. B. die N-Auswaschung unter Berücksichtigung von Mineralisierung und Denitrifikation in Abhängigkeit von der Jahreszeit bzw. Temperatur, oder die P-Abschwemmung unter Berücksichtigung von Hofdüngerausbringung, Vegetationszeit und Starkregeneignissen besser modelliert werden.
- **F*:** MODIFFUS könnte in Zukunft stärker für die Berechnung von Szenarien (Landnutzungsänderungen, Klimawandel, Verminderungsmassnahmen von diffusen Stoffeinträgen) genutzt werden.
- **G*:** Gemäss der Motion Zanetti 20.3625 «Wirksamer Trinkwasserschutz durch Bestimmung der Zuströmbereiche» sollen die Zuströmbereiche für alle im öffentlichen Interesse liegenden Grundwasserfassungen von regionaler Bedeutung, sowie anderer Grundwasserfassungen, bei welchen die Gefahr einer Verunreinigung besteht, bis 2035

bestimmt sein. Für ausgeschiedene Zuströmbereiche könnten mit einer gemäss oben aufgeführter Punkte verbesserten Modellversion von MODIFFUS kritische Flächen bezüglich N-Auswaschung identifiziert und für die Umsetzung von Massnahmen vorgeschlagen werden.

6 Literatur

- Achermann, B., Meier, R., Rihm, B. (2016): Durch atmosphärische Stickstoff-Deposition induzierte Stickstoff-Auswaschung aus Waldökosystemen in der Schweiz. Unveröffentlichter Bericht, Bern, 9 S.
- Agridea (2022): Verordnungspaket Pa.IV. 19.475 - Das Wichtigste in Kürze. 15 S. <https://agripedia.ch/focus-ap-pa/de/startseite/absenkpfad-pflanzenschutz-und-naehrstoffe-pa-iv-19-475/absenkpfad-pflanzenschutzmittel-und-naehrstoffe/>
- 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 (2017): Bauzonenstatistik Schweiz. Bundesamt für Raumentwicklung.
- BAFU (2012): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217: 76 S.
- BAFU (2019): Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz. Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt Zustand Nr. 1901: 138 S.
- BAFU (2020a): Biogeographische Regionen der Schweiz. Bundesamt für Umwelt.
- BAFU (2020b): Biogeographische Regionen der Schweiz - Datenbeschreibung Biogeographische Regionen. Bundesamt für Umwelt.
- BAFU (2020c): Topographische Einzugsgebiete Schweizer Gewässer: Teileinzugsgebiete 2 km²
- BAFU (2021a): Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2101: 134 S.
- BAFU (2021b): Luftqualität 2020: Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL). Bundesamt für Umwelt, Bern, Umwelt-Zustand Nr. 2114: 28 S.
- BAFU (2022a): Gewässer in der Schweiz. Zustand und Massnahmen. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 2207: 90 S
- BAFU (2022b): Abflussmengen, N-Fracht und P-Fracht der nationale Daueruntersuchung Fließgewässer (NADUF) für 2010 bis 2021.
- BAFU (2022c): Nitrat-Konzentrationen der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA für 2010 bis 2020. Datenlieferung von M. Reinhardt (Excel-File). Mittelwerte der Maximalwerte pro Messstelle und Aufteilung auf Hauptbodennutzung.
- BAFU und 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.
- BAFU und BLW (2012): Nährstoffe und Verwendung von Düngern in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe. Teilrevidierte Ausgabe 2021. Umweltschutz in der Landwirtschaft. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1225: 61 S.
- BAFU und BLW (2016): Umweltziele Landwirtschaft. Statusbericht 2016. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1633: 114 S.
- Baillieux, A., Campisi, D., Jammet, N., Bucher, S., Hunkeler, D. (2014): Regional water quality patterns in an alluvial aquifer: direct and indirect influences of rivers. Journal of Contaminant Hydrology, 169, 123-131.
- Behrendt, H., Huber, P., Kornmilch, M., Ley, M., Opitz, D., Schmoll, O., Scholz, G., Uebe, R. (1999): Nährstoffbilanzierung der Flussgebiete Deutschlands. UBA-Texte, 75/99, 288 S.

- Beisecker, R.; Piegholdt, C. (2021): Metaanalyse - Empirischer Zusammenhang zwischen N-Flächenbilanzsaldo, Herbst-Nmin-Gehalt und der Stickstofffracht des Sickerwassers. Abschlussbericht. Hrsg.: DVGW, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs, Bonn, 75 S.
- BFS (2004): Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz 1:200'000. Bundesamt für Statistik.
- BFS (2013): Landwirtschaftliche Betriebszählungen 2010. Bundesamt für Statistik.
- BFS (2020a): Arealstatistik 2013/18, Sektion Geoinformatik, Neuchâtel. Bundesamt für Statistik.
- BFS (2020b): Landwirtschaftliche Betriebszählungen 2020. Bundesamt für Statistik.
- Bircher, P., Liniger, H., Prasuhn, V. (2019): Aktualisierung und Optimierung der Erosionsrisikokarte (ERK2): Die neue ERK2 (2019) für das Ackerland der Schweiz: Schlussbericht Bern: Bundesamt für Landwirtschaft.
- Bircher, P., Liniger, H.P., Kupferschmied, P., Prasuhn, V. (2021): Tools for USLE-CP-factor calculation and actual erosion risk on field block level for Switzerland. *MethodsX*, 8, <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101569>
- BLW (2019): Wegleitung Suisse-Bilanz.
- BLW (2020a): Beitrag für schonende Bodenbearbeitung (gemäss Art. 79–81 DZV) - Teilnahmestatistik 2015–2019
- BLW (2020b): AGIS Daten Kulturen, RE-Programm und Tierzahlen. Bundesamt für Landwirtschaft.
- BLW (2020c): Auszug der Daten der Datenbank HODUFLU (Hofdüngerflüsse) für 2020.
- BLW (2022a) Landwirtschaftliche Zonengrenzen der Schweiz. Geodaten.
- BLW (2022b): Agrarbericht 2022, Phosphor in Böden. https://www.agrarbericht.ch/de/umwelt/phosphor/phosphor-in-der-umwelt?_k=GPSsUDAZ
- BMEL und BMU (2020): Nitratbericht 2020. Gemeinsamer Bericht der Bundesministerien für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) sowie für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Bonn, 167 S.
- BMLFUW (2011): Stoffbilanzmodellierung für Nährstoffe auf Einzugsgebietsebene als Grundlage für Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenprogramme (STOBIMO-Nährstoffe), Endbericht. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Stubenring 1, 1010 Wien, 190 S.
- Braun, M., Kopše Rolli, D., Prasuhn, V. (1997): Verminderung des Nährstoffeintrags in Gewässer durch Massnahmen in der Landwirtschaft. Bericht einer Studie über das Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der Seen. Schriftenreihe Umwelt Nr. 293, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 100 S.
- Braun, M., Frey, M., Hurni, P., Sieber, U. (1991): Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer im Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der Seen (Stand 1986). FAC Liebefeld und BUWAL Bern, 87 S.
- Braun S. (2005): Measured values of nitrogen deposition and nitrogen leaching in European forest soils compiled by Wim de Vries and Sabine Braun. Pers. comm. 10 February 2005. IAP Schönenbuch. In: Rihm B. & Achermann B., 2007: Indirect Leaching of Nitrate and Emissions of Nitrous Oxide from Agricultural Activities – Considerations for Switzerland. Informal Note to the TFIAM/COST 729 Workshop on Integrated Modelling of Nitrogen, 28-30 November 2007, Laxenburg, Austria.
- Braun, S., Rihm, B., Flückiger, W. (2012): Stickstoffeinträge in den Schweizer Wald: Ausmass und Auswirkungen. *Schweiz. Z. Forstwes.* 163/9, 355-362.
- Der Bundesrat (2021): Wasserversorgungssicherheit und Wassermanagement – Grundlagenbericht. Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 18.3610 Rieder vom 15. Juni 2018, 29 S.
- DVGW (2016): Diffuse Stoffeinträge in Gewässer aus der Landwirtschaft. DVGW Information Wasser Nr. 88, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn, 39 S.
- EEA (2017): Data Dictionary. Definition of WISE SoE - Emissions (WISE-1) dataset. Version: May 2017. European Environment Agency, 75 S.

- EEA (2022): Water Information System for Europe (WISE). European environment information and observation network (EIONET) spatial data sets. European Environmental Agency (EEA). <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/wise-eionet-spatial-4>
- Eulenstein, F., Cremer, N., Schindler, R., Pickert, J. (2018): Stickstoffeintrag in Oberflächengewässer und Grundwasser in Deutschland auf Basis bundesweiter Auswertungen. *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 2018 (11), Nr. 6, 3-12. [sonderdruck_nitrat.pdf \(dbges.de\)](#)
- FGG Rhein, (2020): Überblicksbericht der Flussgebietsgemeinschaft Rhein zur Bewirtschaftungsplanung nach Wasser-rahmenrichtlinie für den 3. Bewirtschaftungszeitraum Entwurf, 10. Dezember 2020, Flussgebietsgemeinschaft Rhein, 86 S. www.fgg-rhein.de
- Flish, R., Sinaj, S., Charles, R., Richner, W. (2009): Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (GRUDAF). *Agrarforschung*. 16. 1-97.
- Flish R., Neuweiler R., Kuster T., Oberholzer H., Huguenin-Elie O., Richner W. (2017) 2/ Bodeneigenschaften und Bodenanalysen in Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD). *Agrarforschung Schweiz*, 8, (6), 2017, Spezialpublikation, 1-34.
- Fuchs, S.; Kaiser, M.; Kiemle, L.; Kittlaus, S.; Rothvoß, S.; Toshovski, S.; Wagner, A.; Wander, R.; Weber, T.; Ziegler, S. (2017): Modeling of Regionalized Emissions (MoRE) into Water Bodies: An Open-Source River Basin Management System. *Water* 9, 239, doi:10.3390/w9040239.
- Fuchs, S., Weber, T., Wander, R., Toshovski, S., Kittlaus, S., Reid, L., Bach, M., Klement, L., Hillenbrand, T., Tettenborn, F. (2017): Effizienz von Maßnahmen zur Reduktion von Stoffeinträgen. Endbericht. UBA TEXTE 05, Umweltbundesamt, 385 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.
- Gurtz, J., Baltensweiler, A., Lang, H. (1999): Spatially distributed hydrotope-based modelling of evapotranspiration and runoff in mountainous basins. *Hydrological Processes* 13, 2751–276.
- Hahn, C., V. Prasuhn, Stamm, C., Schulin, R. (2012): Phosphorus losses in runoff from manured grassland of different soil P status at two rainfall intensities. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 153: 65-74.
- Hirschi, M., Davin, E.L., Schwingshackl, C., Wartenburger, R., Meier, R., Gudmundsson, L., Seneviratne, S.I. (2020): Soil moisture and evapotranspiration. Hydro-CH2018 project. Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN), Bern, Switzerland, 48 pp, doi:10.3929/ethz-b-000389455
- Holzämper, A., Cochand, F., Rössler, O., Brunner, P., Hunkeler, D. (2020): AgriAdapt – Modellgestützte Untersuchung der Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf Grundwasserressourcen im Berner Seeland. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Bern, Schweiz, 39 S. DOI: <https://doi.org/10.34776/nccs21aa>
- 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): Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Gewässer der Schweiz. MODIFFUS 3.0. Bericht z.H. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Agroscope, Zürich, 117 S.
- Hürdler, J., Prasuhn, V., Spiess, E. (2015): Abschätzung von Schwermetalleinträgen über Gülleabschwemmung in die Oberflächengewässer der Schweiz. MODIFFUS 3.0. Bericht z.H. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Agroscope, Zürich, 13 S.
- Hunkeler, D., Malard, A., Arnoux, M., Jeannin, P., Brunner, P. (2021): Effect of Climate Change on Groundwater Quantity and Quality in Switzerland. Hydro-CH2018 Project. Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN), Bern, Switzerland. 80 pp.
- Hurni, P., Braun, M., Schärer, F. (1992): Abschätzungen der P- Einträge in den Sempachersee aus diffusen Quellen und Massnahmen zu deren Reduktion. *Mitt. der EAWAG* 34D, 33-36.

- Koch, U., Prasuhn, V. (2020): Drainagekarte Schweiz: Erstellung einer Karte potentiell drainierter Flächen in der Schweiz mittels «Machine Learning». *Agroscope Science*, 104, 1-121.
- Kupper, T., Bonjour, C., Menzi, H., Bretscher, D., Zaucker, F. (2018): Ammoniakemissionen der schweizerischen Landwirtschaft 1990-2015. Bericht im Auftrag des BAFU. <https://agrammon.ch/dokumente-zum-download>
- Kupper, T., Häni, C., Bretscher, D., Zaucker, F., (2022): Ammoniakemissionen der schweizerischen Landwirtschaft 1990 bis 2020. Bericht im Auftrag des BAFU.
- Mehr, J.; Jedelhauser M.; Binder, C.R. (2018): Transition of the Swiss Phosphorus System towards a Circular Economy— Part 1: Current State and Historical Developments, *Sustainability*, MDPI, vol. 10(5), pages 1-17, May.
- Meteoschweiz (2022a): Normwert Gitterdaten – Niederschlag RnormY9120.
- Meteoschweiz (2022b): Normwert Gitterdaten – Niederschlag RnormY8110.
- Meteoschweiz (2022c): Zeitliche Entwicklung von Temperatur und Niederschlag. https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klimawandel-schweiz/temperatur-und-niederschlagsentwicklung.html?filters=rhs150m0_swiss_year_1864-smoother
- Möhring, A., Ferjani, A., Mack, G., Mann, S. (2016): Nährstoffreduktion in Gewässern – Modellergebnisse SWISSland. *Agroscope Science*, Nr. 31.
- Müller, B., Meyer, J. S., Gächter, R. (2020): Nitrogen fertilization of soils fuels carbonate weathering and translocation in calcareous watersheds. *Aquatic Sciences*, 82(2), 1-13.
- Müller, B., Thoma, R., Baumann, K. B., Callbeck, C. M., Schubert, C. J. (2021): Nitrogen removal processes in lakes of different trophic states from on-site measurements and historic data. *Aquatic Sciences*, 83(2), 1-13.
- Müller, B., Meyer, J. S., Gächter, R. (2022): Denitrification and Nitrogen Burial in Swiss Lakes. *Environmental Science & Technology*.
- Mutzner, L., Stauffer, P., Ort, C. (2016): Model-based screening for critical wet-weather discharges related to micropollutants from urban areas. *Water Research*, 104, 547-557.
- Nievergelt, J. (2002): Nitrat und Fruchtfolgen 20 Jahre lang beobachtet. *Agrarforschung* 9, 28-33.
- OECD (2017): Diffuse Pollution, Degraded Waters: Emerging Policy Solutions, *OECD Studies on Water*, OECD Publishing, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264269064-en>
- OSPAR (2008): Towards the 50% reduction target for nutrients; Assessment of Implementation of PARCOM Recommendations 88/2 and 89/4. London, 2008.
- Prasuhn, V. (1999): Phosphor und Stickstoff aus diffusen Quellen im Einzugsgebiet des Bodensees 1996/97. - Bericht Internationale Gewässerschutzkommission Bodensee (IGKB) Nr. 51, 84 S.
- 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. (2005): GIS-gestützte Abschätzung der Phosphoreinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer im Einzugsgebiet des Brienersees. Interner Bericht Agroscope FAL Reckenholz. 17 S.
- Prasuhn, V. (2016): Abklärungen zum Umweltziel Landwirtschaft: Reduktion der landwirtschaftsbedingten Stickstoffinträge in die Gewässer um 50 % gegenüber 1985. Bericht z.H. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Agroscope, Zürich, 38 S.
- Prasuhn, V., Blaser, S. (2018): Der Agrarumweltindikator «Erosionsrisiko». *Bulletin BGS*, 39, 11-18.
- Prasuhn, V., Braun, M. (1994): Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern. - Schriftenreihe d. Eidg. Forschungsanstalt f. Agrikulturchemie und Umwelthygiene (FAC) Liebefeld-Bern, Nr. 17, Liebefeld-Bern, 113 S. + Anhang 101 S.

- Prasuhn, V., Hurni, P. (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., 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., Müller, K. (2003): GIS-gestützte Abschätzung der Phosphoreinträge aus diffusen Quellen in den Zugersee. Bericht z.H. Amt für Umweltschutz Kanton Zug, 60 S.
- Prasuhn, V., Spiess, E., Braun, M. (1996): Methoden zur Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in den Bodensee. - Bericht Internationale Gewässerschutzkommission Bodensee (IGKB) Nr. 45, 113 S. + Anhang (Sonderband), 83 S.
- Prasuhn, V., Braun, M., Kopše Rolli, D. (1997): Massnahmen zur Verminderung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus der Landwirtschaft in die Gewässer, dargestellt am Beispiel von 20 hydrologischen Einzugsgebieten im Kt. Bern. - Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft Bern, 216 S.
- Prasuhn, V., Probst, T., Mohni, R. (2003): Abschätzung der Stickstoff- und Phosphoreinträge aus diffusen Quellen in die Birs. Bericht der FAL, 68 S.
- Prasuhn, V., Kupferschmied, P., Spiess, E., Hürdler, J. (2016): Szenario-Berechnungen für das Projekt zur Verminderung diffuser Nährstoffeinträge in die Gewässer der Schweiz mit MODIFFUS. Bericht z.H. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Agroscope, Zürich, 73 S.
- Prasuhn, V., Hutchings, C., Schneuwly, J., Gilgen, A., Blaser, S. (2023): Kulturspezifische C-Faktoren für die Schweiz und Karte des aktuellen Erosionsrisikos der Schweiz. (in Vorbereitung).
- Prasuhn V., Herzog F., Schärer M., Frossard E., Flühler H., Flury Ch., Zraggen, K. (2004): Stoffflüsse im Greifenseegebiet: Phosphor und Stickstoff. *Agrarforschung* 11 (10), 400-454.
- Remund, D., Liebisch, F., Liniger, H.P., Heinimann, A., Prasuhn, V. (2021): The origin of sediment and particulate phosphorus inputs into water bodies in the Swiss Midlands – A twenty-year field study of soil erosion. *Catena* 203, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105290>
- Reutimann, J., Ehrler, A., Schäppi, B. (2022): Aktualisierung Stoffflussanalyse Stickstoff für das Jahr 2018. Bericht INFRAS im Auftrag des BLW.
- Richner, W., Flisch, R., Mayer, J., Schlegel, P., Zähler, M., Menzi, H. (2017): Eigenschaften und Anwendung von Düngern, in: Richner, W., Sinaj, S. (Eds.), *Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz / GRUD 2017*. *Agrarforschung Schweiz* 8 (6) Spezialpublikation, S. 1-24.
- Rihm, B., Künzle, T. (2019): Mapping Nitrogen Deposition 2015 for Switzerland. Bericht im Auftrag des BAFU. [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/en/dokumente/luft/externe-studien-berichte/mapping-nitrogen-deposition-2015-for-switzerland.pdf.download.pdf/Mapping Nitrogen Deposition 2015 for Switzerland.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/en/dokumente/luft/externe-studien-berichte/mapping-nitrogen-deposition-2015-for-switzerland.pdf.download.pdf/Mapping%20Nitrogen%20Deposition%202015%20for%20Switzerland.pdf)
- Rihm, B., Künzle, T. (2023, in Vorbereitung): Nitrogen deposition and exceedances of critical loads for nitrogen in Switzerland 1990–2020. Meteotest AG im Auftrag des BAFU.
- Schädler, B., Hubacher, R. (2002): Komponenten des natürlichen Wasserhaushaltes 1961-1990. Tafel 6.3. In: Weingartner, R., Spreafico, M. (Hrsg.): *Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES)*. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Scherrer, S. C., Hirschi, M., Spirig, C., Maurer, F., Kotlarski, S. (2022): Trends and drivers of recent summer drying in Switzerland. *Environmental Research Communications*, 4(2), 025004.
- Schleiss, K. (2019): Kompostier- und Vergärungsanlagen. Erhebung in der Schweiz und Lichtenstein. Im Auftrag von: BAFU.
- Schmid, C., Prasuhn, V. (2000): GIS-gestützte Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Zürich. *Schriftenreihe der FAL* 35, 114 S.

- Seneviratne, S. I., Lehner, I., Gurtz, J., Teuling, A. J., Lang, H., Moser, U., Grebner, D., Menzel, L., Schrott, K., Vitvar, T., Zappa, M. (2012): Swiss prealpine Rietholzbach research catchment and lysimeter: 32 year time series and 2003 drought event. *Water Resources Research*, 48(6).
- Skaalsveen, K., Ingram, J., Clarke, L.E. (2019): The effect of no-till farming on the soil functions of water purification and retention in north-western Europe: a literature review. *Soil Tillage Res.* 189, 98–109.
- Spieß, E. (2005): Nitrat auswaschung und Entwicklung der Nitratgehalte im Grundwasser im Kanton Bern. *Schriftenreihe der FAL* 57, 41-48.
- Spieß, E., Liebisch, F., (2022): Entwicklung der Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft bis 2020. *Agroscope Science*, Nr. 149. <https://doi.org/10.34776/as149g>.
- Spieß, E., Humphrys, C., Richner, W., Schneider, M. K., Piepho, H. P., Chervet, A., Prasuhn, V. (2020): Does no-tillage decrease nitrate leaching compared to ploughing under a long-term crop rotation in Switzerland? *Soil and Tillage Research*, 199, 104590. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104590>
- Stoll, S., von Arb, C., Jörg, C., Kopp, S., Prasuhn, V. (2019): Evaluation der stark zur Phosphorbelastung des Baldeggersee beitragenden Flächen. *Schlussbericht, Agroscope*, 126 S. + Anhang.
- Strähl, S., Ort, C., Siegrist, H., Thomann, M., Obrecht J., Kurz, E. (2013): Stickstoffelimination in Schweizer ARA. *Aqua & Gas No5*, S. 74 – 84.
- Sundermann, G., Wägner, N., Cullmann, A., von Hirschhausen, C., Kemfert, C. (2020): Nitratbelastung im Grundwasser überschreitet Grenzwert seit Langem – mehr Transparenz und Kontrolle in der Düngepraxis notwendig. *DIW Wochenbericht Nr.9*, 120-130.
- Swisstopo (2020a): swissBOUNDARIES3D Bundesamt für Landestopographie -> für Gemeindegrenzen.
- Swisstopo (2020b): swissTLM3D., Bundesamt für Landestopographie.
- Swisstopo (2020c): swissALTI3D., Bundesamt für Landestopographie.
- Swisstopo (2021) swissBOUNDARIES3D_1_3_TLM_HOHEITSGRENZE
- Thimonier, A., Graf Pannatier, E., Schmitt, M., Waldner, P., Walthert, L., Schleppi, P., Dobbertin, M., Kräuchi, N. (2010): Does exceeding the critical loads for nitrogen alter nitrate leaching, the nutrient status of trees and their crown condition at Swiss Long-term Forest Ecosystem Research (LWF) sites? *Eur. J. Forest Res.* 129, 443-461.
- Thomann, M., Hochstrat, R., Jovanovic, A., Kawecki, B. Schäfer, R. (2022): Gesamt Betrachtung Weiterentwicklung Reinigungsleistung ARA: Nitrifikation und Stickstoffelimination. *Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz*, 81 S. (noch nicht veröffentlicht).
- UNECE (2005): Forest Condition in Europe. 2005 Technical Report. Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests, 1-99. Geneva and Brussels.
- UVM (2005): Internationale Flussgebietseinheit Rhein. Internationales Bearbeitungsgebiet Hochrhein Bericht zur Bestandsaufnahme; Teil B. Bearbeitungsstand: 8. März 2005. Ministerium für Umwelt und Verkehr (UVM) Baden-Württemberg (BW), 94 S.
- Venohr, M., Hirt, U., Hofmann, J., Opitz, D., Gericke, A., Wetzig, A., Natho, S., Neumann, S., Hürdler, J., Matranga, M., Mahnkopf, J., Gadegast, M. und Behrendt, H. (2011): Modelling of Nutrient Emissions in River Systems – MONERIS – Methods and Background. *International Review of Hydrobiology*, V. 96, Issue 5, pp. 435-483.
- Von Arb, C., Stoll, S., Frossard, E., Stamm, C., Prasuhn, V. (2021): The time it takes to reduce soil legacy phosphorus to a tolerable level for surface waters: What we learn from a case study in the catchment of Lake Baldeg, Switzerland. *Geoderma* 403 (2021) 115257.
- VSA (2022): Kosten und Leistungen der Abwasserentsorgung. (noch nicht veröffentlicht). <https://vsa.ch/publikationen/shop/>

- Waldner, P.; Braun, S.; Rihm, B. (2019): Schlussbericht des Projekts ‚Nitrate leaching risks mapping‘ (NitLeach II). Birnmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL; Witterswil, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie; Bern, Meteotest, 46 S.
- Wilke, B., Schaub, D. (1996): Phosphatanreicherung bei Bodenerosion. Mitt. Deutsche Bodenkundl. Gesellsch. 79, 435-438.
- WSL (2020a): Aktuelle Verdunstung 2010-2020 (unveröffentlichter Datensatz). Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.
- WSL (2020b): Abfluss 2010-2020 (unveröffentlichter Datensatz). Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.
- Zappa, M., Liechti, K., Deller, M., Barben, M. (2017): Wasserhaushalt der Schweiz 2.0. Eine validierte, modellgestützte Methode für die Bilanzierung der Wasserressourcen der Schweiz. Wasser, Energie, Luft 109(3), 203-212.
- Zarrineh, N., Abbaspour, K. C., Holzkämper, A. (2020): Integrated assessment of climate change impacts on multiple ecosystem services in Western Switzerland. Science of the Total Environment, 708, 135212.

7 Anhang

7.1 Anhang A: Berechnung der Abschwemmungs- und Auswaschungsgefährdung der Böden

Kantone Luzern, Wallis, Glarus, Solothurn – Datenschlüssel 6

Abschwemmung

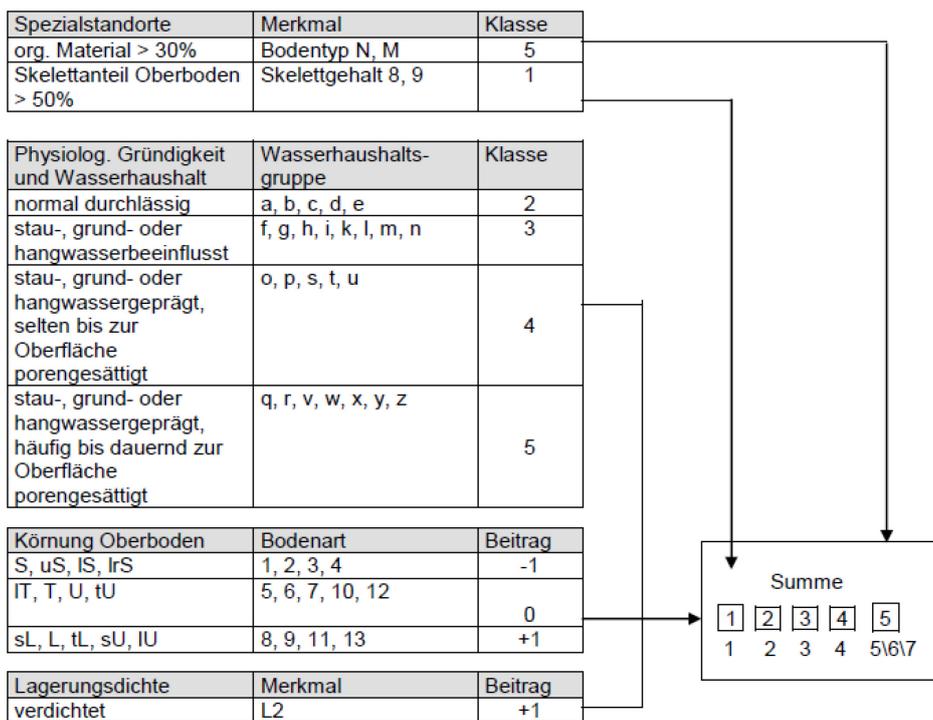


Abbildung A1: Schema zur Berechnung der Abschwemmungsgefährdung (5 Klassen).

Auswaschung

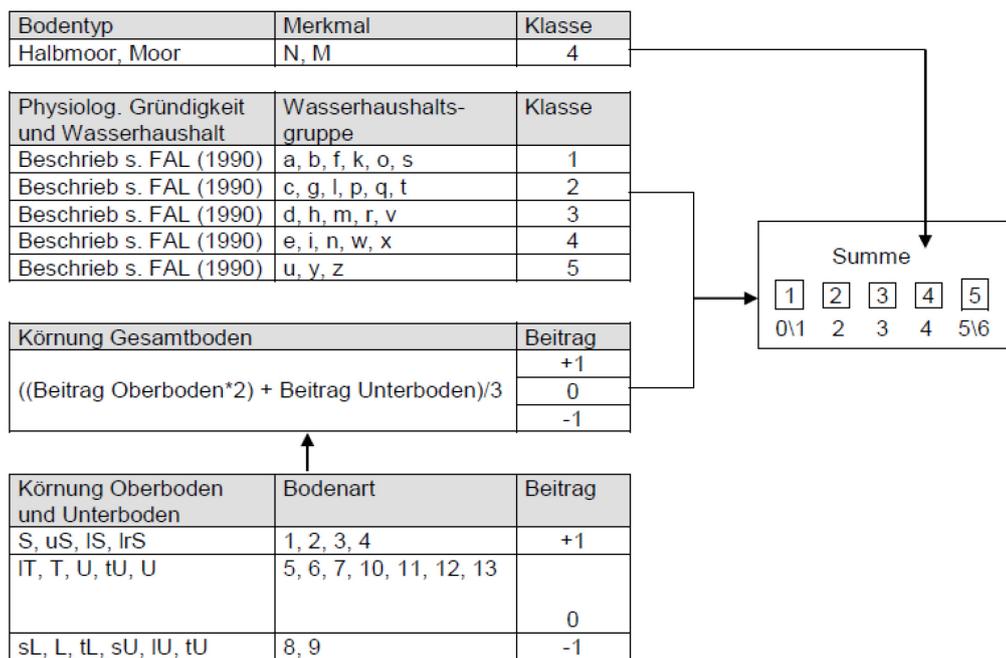


Abbildung A2. Schema zur Berechnung der Auswaschungsgefährdung (5 Klassen). Kategorienbezeichnung siehe FAL (1990).

Kantone Fribourg - Murten

Gleich wie Datenschlüssel 6 mit folgenden Anpassungen:

- Skelettanteil wurde nicht berücksichtigt, da die Einteilung mit höchstem Skelettanteil ist skelettreich mit >30 %. Datenschlüssel 6 ist diese erst ab 50 %
- IDs waren nicht eindeutig in der Legende sowie im Shapefile. Daher sind rund 15 % der Polygone evtl. falschen Attribute zugeordnet worden.
- Einteilung der Körnung nach unterstehender Tabelle

Tabelle A1: Einteilung der Körnung im Kt. Fribourg für die Beurteilung des Abschwemmungs- und Auswaschungsrisiko.

Körnung Oberboden	Beitrag Abschwemmung	Beitrag Auswaschung
IS, IS-sL, S, S-L, sL-IS, S-IS, S-sL	-1	+1
L, L-IT, IS-sL-IU, L-tL, IU, sL, sL-IU, sL-L, sL-tL, S-IU, tL-IT, tL-IU	0	0
T, tL-T, tU - T	+1	-1

Kanton Bern

Die Daten des Kanton Berns liegen in 8 unterschiedlichen Datenschlüsseln vor. Die Einteilung wurde bestmöglich analoge zu Datenschlüssel 6 vorgenommen. Insbesondere bei dem Wasserhaushalt und den Wasserhaushaltsgruppen gab es Abweichungen zum aktuellen Schlüssel. Bei der Abschwemmung konnten der WH eindeutig der Bewertung zugeordnet werden. Da bei der Auswaschung auch die PNG eine Rolle spielt war eine Zuteilung analoge zu den anderen Kantonen nicht immer möglich. Rund 64 % aller Polygone konnte eindeutig eingeteilt werden, bei etwa 20 % kommt es aufgrund der Kombination PNG und WH zu Abweichung von 1 bis maximal 2 Klassen und bei 15 % gab es keine Daten zum PNG. Hier war aber Teils der Bodentyp (Moor, Halbmoor) alleine ausschlaggebend für die Klasse, bei den übrigen wurde die Risikokartierung der BEK200 übernommen (rund 9 % der Fläche der Kantonalen Bodenkarten).

7.2 Anhang B: Nährstoffausscheidung pro Tierkategorie, Anzahl Tiere und Hofdüngeranfall

Tabelle A2: Nährstoffausscheidung pro Tierkategorie der GRUD/GRUDAF, Anzahl Tiere sowie Anteil an der Tierkategorie (%) und der Hofdüngeranfall (N und P) jeweils für die Jahre 2010 und 2020 sowie prozentuale Änderung.

Tierkategorie GRUD/GRUDAF	Nährstoffausscheidung in kg pro Einheit						Anzahl Tiere					Hofdüngeranfall t					
	2010 ¹		2020 ²		%					Anteil an Tierkategorie (%)		2010		2020		%	
	N	P	N	P	N	P	2010	2020	%	2010	2020	N	P	N	P	N	P
Milchkuh 7500/6500 kg	115	18	112	17	-3	-6	589'024	546'479	-7	37	37	67738	10602	61206	9290	-10	-12
Mutterkuh (600-700 kg)	80	13	85	12	6	-8	111'291	131'384	18	7	9	8903	1447	11168	1577	25	9
Aufzuchtrind unter 1-jährig	25	3	25	3.3	0	10	227'454	190'895	-16	14	13	5686	682	4772	630	-16	-8
Aufzuchtrind 1 bis 2-jährig	40	6	40	5.7	0	-5	210'811	192'570	-9	13	13	8432	1265	7703	1098	-9	-13
Aufzuchtrind über 2-jährig	55	9	55	8.7	0	-3	116'501	107'169	-8	7	7	6408	1049	5894	932	-8	-11
Mastkalb pro Platz	13	2	18	3.1	38	55	189'085	76'191	-60	12	5	2458	378	1371	236	-44	-38
Mutterkuhkalb (bis ca. 350 kg)	34	4	22	3.1	-35	-11	0	83'726	-	0	6	0	0	1842	260	-	-
Rindviehmast (Muni)	33	5	49	5.7	48	14	147'066	78'472	-47	9	5	4853	735	3845	447	-21	-39
Rindviehweidemast	40	5	40	5.2	0	4	0	75'055	-	0	5	0	0	3002	390	-	-
Stute mit Fohlen	52	13.5	52	13	0	-4	6'043	0	-100	10	0	314	82	0	0	-100	-100
Anderes Pferd über 3-jährig	44	10	44	10	0	0	47'398	43'921	-7	80	93	2086	474	1933	439	-7	-7
Fohlen 0.5- bis 3-jährig	42	8	42	8	0	0	5'660	3'059	-46	10	7	238	45	128	24	-46	-46
Ziegenplatz	16	2	17	2.5	6	25	36'501	36'137	-1	13	14	584	73	614	90	5	24
Schafplatz	12	2	18	2.6	50	30	228'178	206'257	-10	82	81	2738	456	3713	536	36	18
Milchschaflplatz	21	4	20	3.7	-5	-8	12'362	13'816	12	4	5	260	49	276	51	6	3

Tierkategorie GRUD/GRUDAF	Nährstoffausscheidung in kg pro Einheit						Anzahl Tiere					Hofdüngeranfall t					
	2010 ¹		2020 ²		%					Anteil an Tierkategorie (%)		2010		2020		%	
	N	P	N	P	N	P	2010	2020	%	2010	2020	N	P	N	P	N	P
Mastschwein / Remonte pro Platz	13	2.5	13	2.3	0	-8	788'149	707'807	-10	61	64	10246	1970	9201	1628	-10	-17
Eber	18	4	18	4.4	0	10	3'685	2'378	-35	0	0	66	15	43	10	-35	-29
Säugende Zuchtsau pro Platz	42	10	49	10	17	0	33'508	26'326	-21	3	2	1407	335	1290	263	-8	-21
Galtsau pro Platz	20	5	25	6.5	25	30	106'070	80'972	-24	8	7	2121	530	2024	526	-5	-1
Abgesetztes Ferkel pro Platz	4.6	1	3.9	0.7	-15	-27	350'908	284'881	-19	27	26	1614	351	1111	208	-31	-41
Damhirsch	20	3	20	3.1	0	3	9'773	10'842	11	55	54	195.5	29.3	216.8	33.6	11	15
Rothirsch	40	6	40	6.1	0	2	1'311	2'379	81	7	12	52.4	7.9	95.2	14.5	81	84
Bison über 3-jährig	60	13	60	13.1	0	1	222	292	32	1	1	13.3	2.9	17.5	3.8	32	33
Bison unter 3-jährig	20	4	20	4.4	0	10	291	163	-44	2	1	5.8	1.2	3.3	0.7	-44	-38
Lama über 3-jährig	17	3	17	2.8	0	-7	2'969	2'262	-24	17	11	50.5	8.9	38.5	6.3	-24	-29
Lama bis 3-jährig	11	2	11	1.7	0	-15	0	637	-	0	3	0.0	0.0	7.0	1.1	-	-
Alpaka über 3-jährig	11	2	11	1.7	0	-15	3'116	2'835	-9	18	14	34.3	6.2	31.2	4.8	-9	-23
Alpaka bis 3-jährig	7	1	7	1.1	0	10	0	729	-	0	4	0.0	0.0	5.1	0.8	-	-
Legehennen pro 100 Plätze	80	20	80	20	0	0	2'304'993	3'854'017	67	26	31	1844	461	3083	771	67	67
Junghennen pro 100 Plätze	34	9	30	7.4	-12	-18	1'058'580	1'149'653	9	12	9	360	95	345	85	-4	-11
Mastpoulet pro 100 Plätze	45	7	36	6	-20	-14	5'580'103	7'424'990	33	62	59	2511	391	2673	445	6	14
Masttruten pro 100 Plätze	140	30.5	140	31	0	2	58'074	88'373	52	1	1	81	18	124	27	52	55
Strauss älter als 13 Monate	24	4.0	24	4.4	0	10	829	175	-79	85	31	19.9	3.3	4.2	0.8	-79	-77
Strauss bis 13 Monate	11	2.5	11	2.6	0	4	150	393	162	15	69	1.7	0.4	4.3	1.0	162	172

¹GRUDAF (2009) Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. Agrarforschung 16 (2).

²GRUD (2017) Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz. Agrarforschung Schweiz, 8, (6)

Tabelle A3: Nährstoffausscheidung in kg/Tier und Jahr nach GRUD sowie Kupper et al. (2022).

Tierkategorie	Nährstoffausscheidung in kg/Tier und Jahr		
	GRUD	Kupper	Differenz
Milchkuh	112	111	-1
Aufzuchtrind unter 1-jährig	25	25	0
Aufzuchtrind 1 bis 2-jährig	40	40	0
Aufzuchtrind über 2-jährig	55	55	0
Mutterkuh	85	85	0
Mutterkuhkalb	22	22	0
Masttiere	40	38	-2
Mastkalb	18	18	0
Pferde über 3-jährig	44	44	0
Pferde unter 3-jährig	42	42	0
Ziegen	17	17	0
Schafe	18	15	-3
Milchschafe	20	20	0
Mastschwein / Remonte	13	11.3	-1.7
Eber	18	14.8	-3.2
Säugende Zuchtsau	49	40.8	-8.2
Galtsau	25	24.8	-0.2
Abgesetztes Ferkel	3.9	3.39	-0.51
Legehennen	0.8	0.8	0
Junghennen	0.3	0.3	0
Mastpoulet	0.4	0.36	0
Masttruten	1.4	1.4	0

7.3 Anhang C: Ausgangswerte für Berechnung der N-Auswaschung unter Ackerland

Tabelle A4: Ausgangswerte (2010 sowie 2020) für die Berechnung der N-Auswaschung unter Ackerland. Rote Zahlen: höherer Wert als 2010; blaue Zahlen: niedrigerer Wert als 2010.

Kultur	Basiswert kg N/ha		N Konzentration mg N/l
	2010	2020	2020
Sommergerste	40	40	7.2
Wintergerste	40	40	7.2
Hafer	40	40	7.2
Triticale	40	40	7.2
Mischel Futtergetreide	40	40	7.2
Futterweizen (gemäss Sortenliste swiss granum)	40	40	7.2
Körnermais	60	50	9.0
Reis		40	7.2
Emmer, Einkorn	40	40	7.2
Sommerweizen (ohne Futterweizen der Sortenliste swiss granum)	40	40	7.2
Winterweizen (ohne Futterweizen der Sortenliste swiss granum)	40	40	7.2
Roggen	40	40	7.2
Mischel Brotgetreide	40	40	7.2
Dinkel	40	40	7.2
Saatmais (Vertragsanbau)	60	50	9.0
Silo- und Grünmais	60	50	9.0
Zuckerrüben	30	40	7.2
Futterrüben	30	40	7.2
Kartoffeln	100	100	17.9
Pflanzkartoffeln (Vertragsanbau)	100	100	17.9
Sommerraps zur Speiseölgewinnung	30	50	9.0
Winterraps zur Speiseölgewinnung	30	50	9.0
Soja	70	70	12.6
Sonnenblumen zur Speiseölgewinnung	50	50	9.0
Lein (Flachs)	50	30	5.4
Hanf (nur Sorten nach BLW- und EU-Sortenkatalog)	50	30	5.4
Ackerbohnen zu Futterzwecken	70	70	12.6
Eiweisserbsen zu Futterzwecken	70	70	12.6
Lupinen zu Futterzwecken	70	70	12.6
Ölkürbisse	50	50	9.0
Tabak	50	50	9.0
Hirse	50	30	5.4
Getreide siliert		40	7.2
Leindotter		30	5.4
Einjährige Freilandgemüse (ohne Konservengemüse)	150	150	26.9
Freiland-Konservengemüse	150	150	26.9
Wurzeln der Treibzichorie	50	50	9.0
Buchweizen		30	5.4

Sorghum		50	9.0
Einjährige Beeren (z. B. Erdbeeren)	50	50	9.0
Einjährige nachwachsende Rohstoffe (Kenaf, usw.)	50	30	5.4
Einjährige Gewürz- und Medizinalpflanzen	50	30	5.4
Einjährige gärtnerische Freilandkulturen (Blumen, Rollrasen usw.)	50	50	9.0
Ackerschonstreifen		30	5.4
Buntbrache	30	30	5.4
Rotationsbrache	30	30	5.4
Saum auf Ackerflächen	50	50	9.0
Mohn		30	5.4
Safflor		30	5.4
Linsen		70	12.6
Misch. Ackerboh. Eiweisserb. & Lup. zu Futterzwecken		70	12.6
Blühstreifen Bestäuber & andere Nützlinge		30	5.4
Senf		30	5.4
Quinoa (ab 2019)		30	5.4
Sommerraps als nachwachsender Rohstoff	30	50	9.0
Winterraps als nachwachsender Rohstoff	30	50	9.0
Sonnenblumen als nachwachsender Rohstoff	50	50	9.0
Off. Ackerfl. beitragsber. Biodiversitätsförderfl.		30	5.4
Off. Ackerfl. nicht beitragsber. Biodiversitätsförderfl.		30	5.4
Übrige offene Ackerfläche, beitragsberechtigt	50	50	9.0
Übrige offene Ackerfläche, nicht beitragsberechtigt	50	50	9.0
Kunstpflanzen	40	35	6.3
Übrige Kunstpflanze, beitragsberechtigt (z. B. Schweineweide, Geflügelweide)		70	12.6
Futterleguminosen für die Samenproduktion (Vertragsanbau) (Rot-/Weissklee, Luzerne, Esparsette)	50	50	9.0
Futtergräser für die Samenproduktion (Vertragsanbau)	50	50	9.0

7.4 Anhang D: Auswertungen MODIFFUS für die EEA

“The European environment information and observation network (Eionet) spatial data sets include information about European river basin districts, river basin district sub-units, surface water bodies, groundwater bodies and monitoring sites. The data sets are part of the Water Information System for Europe (WISE), and compile information reported to the European Environment Agency (EEA) since 2001” (EEA, 2020).

Die EEA verlangt räumliche Zuordnungen für River Basin District und hat eine andere Aufgliederung der diffusen Eintragspfade (siehe Bericht EEA, 2017):

NP – Diffuse sources

NP1 – Diffuse - Agricultural emissions

NP2 – Diffuse - Atmospheric deposition

NP3 – Diffuse - Un-connected dwellings emissions

NP4 – Diffuse - Urban run-off

NP5 – Diffuse - Storm overflow emissions

NP7 – Diffuse - Other diffuse emissions

NP71 – Diffuse - Forestry emissions

NP72 – Diffuse - Transport emissions

NP73 – Diffuse - Mining emissions

NP74 – Diffuse - Aquaculture emissions

NP8 – Diffuse - Background emissions

Die diffusen Quellen NP1, NP2, und NP71 wurden vom BAFU gewünscht und können aus den bestehenden Datensätzen extrahiert bzw. zusammengestellt werden. Die anderen Quellen wurden von uns bisher nicht erhoben (NP3, NP4, NP5, NP72, NP73, NP74) und spielen vermutlich auch keine grosse Rolle in der Schweiz (NP3, NP4, NP72, NP73, NP74). Die natürliche Hintergrundlast (NP8) ist in den Werten von NP1, NP2 und NP71 bereits enthalten.

N- und P-Einträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen (NP1)

Die Auswertungen für die landwirtschaftlich genutzten Flächen wurden mit und ohne alpwirtschaftlich genutzten Flächen gemacht. Die alpwirtschaftlich genutzte Fläche ist in der Schweiz relativ gross und wird relativ extensiv genutzt. Daher sind die Stoffeinträge hier vergleichsweise gering und beeinflussen die flächenspezifischen Stoffausträge der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche wenig. Wir empfehlen trotzdem die Werte inklusive der alpwirtschaftlich genutzten Fläche zu verwenden, und allenfalls mit einer entsprechenden Fussnote zu versehen.

RBD	landwirtschaftlich genutzte Fläche inklusive alpwirtschaftliche Flächen					landwirtschaftlich genutzte Fläche ohne alpwirtschaftliche Flächen				
	Fläche (ha)	kg P/ha	P in t	kg P/ha (gelöst)	gelöst P in t	Fläche (ha)	kg P/ha	P in t	kg P/ha (gelöst)	gelöst P in t
Rhein	1'165'635	0.76	889	0.38	442	817'864	0.74	604	0.46	377
Rhone	193'377	0.52	100	0.22	42	110'418	0.51	56	0.27	30
Donau	41'117	0.19	8	0.13	5	5'610	0.26	1	0.21	1
Po	46'893	1.11	52	0.21	10	13'205	1.10	15	0.28	4
Adige	3'761	0.18	0.7	0.13	0.5	888	0.29	0.3	0.23	0.2
CH	1'450'783	0.72	1050	0.34	500	947'985	0.71	677	0.43	412

RBD	Landwirtschaftlich genutzte Fläche inklusive alpwirtschaftliche Flächen			Landwirtschaftlich genutzte Fläche ohne alpwirtschaftliche Flächen		
	Fläche (ha)	kg N/ha	N in t	Fläche (ha)	kg N/ha	N in t
Rhein	1'165'782	20.5	23'864	817'953	25.8	21'081
Rhone	193'434	16.5	3'189	110'432	24.1	2'662
Donau	41'118	3.9	162	5'610	6.1	34
Po	46'910	15.1	710	13'212	34.9	461
Adige	3'762	4.4	17	888	7.5	7
CH	1'451'006	19.3	27'942	948'095	25.6	24'245

Atmosphärische Deposition (NP2)

RBD	Fläche (ha)	kg P/ha	P in t	kg N/ha	N in t
Rhein	116'596	0.35	40.5	14.8	1'719
Rhone	42'371	0.30	12.8	10.0	423
Donau	3013	0.20	0.6	5.0	15
Po	13'195	0.46	6.0	18.1	240
Adige	90	0.16	0.0	4.7	0
CH	175'265	0.34	60.0*	13.7	2'399*

* geringe Abweichungen zu den Werten Tab. 52 und Tab. 56 im Bericht resultieren aus 1-2m Unterschied im Grenzverlauf der Schweiz bei Gewässern.

Einträge von Waldflächen (NP 71)

RBD	Fläche (ha)	kg N/ha	N in t	kg P/ha	P in t	kg P/ha (gelöst)	gelöst P in t
Rhein	874'199	7.2	6'270	0.43	376	0.08	69
Rhone	205'282	5.0	1'017	0.28	58	0.08	17
Donau	39'281	3.0	120	0.15	6	0.08	3
Po	188'116	7.7	1'441	0.99	186	0.09	17
Adige	4'429	3.0	13	0.15	1	0.08	0
CH	1'311'307	6.8	8'861	0.48	626	0.08	107

7.5 Anhang E: Auswertungen MODIFFUS für die OECD und Eurostat

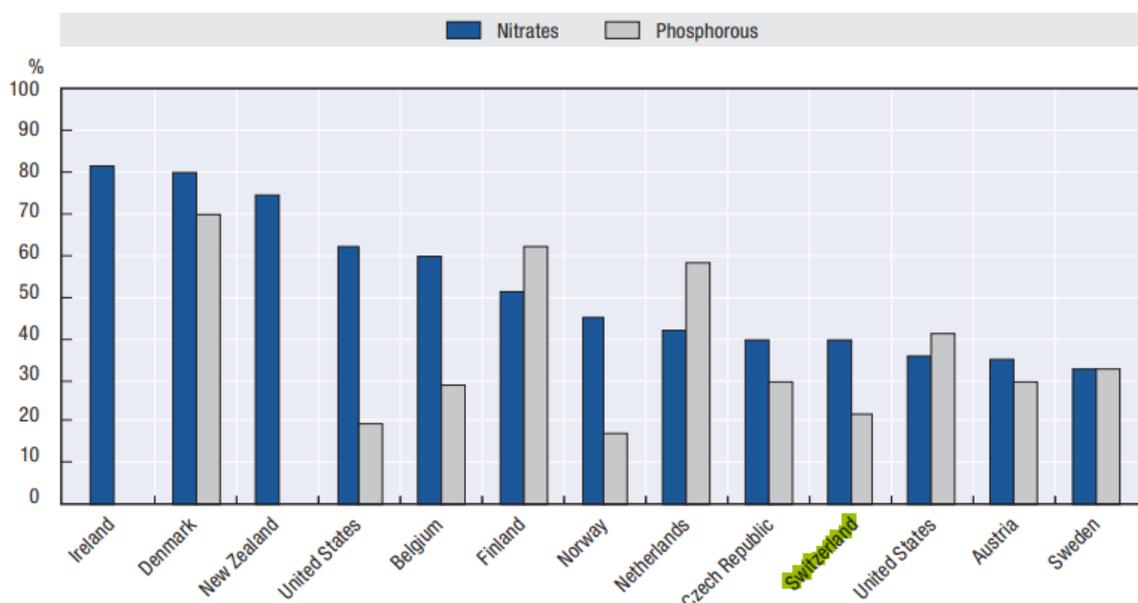
Die OECD und Eurostat erheben regelmässig Daten zur Gewässerqualität für alle beteiligten Länder (OECD, 2017). Das BAFU liefert die entsprechenden Daten. Unter Punkt 3a wird der "Share of agriculture in total emissions of nitrate and phosphate in surface water (%)" gewünscht.

Die bisherige Tabelle enthält für die Schweiz nur wenige Daten (Auszug aus Datenbank Eurostat):

1985	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
			40					39																	
			22										24												

Es liegen also nur Daten für die Jahre 2000 und 2005 (Stickstoff) und 2000 und 2010 (Phosphor) vor. Für die bisherigen Daten wird Heldstab et al. (2010) als Quelle aufgeführt. In nachfolgender Abbildung aus OECD (2017) werden die Daten von 2000 für die Schweiz aufgeführt:

Figure 1.3. Percentage share of agriculture in total emissions of nitrates and phosphorus in surface water, OECD countries, 2009 or latest available year



Notes: Countries are ranked in descending order of highest share of nitrates in surface water. For nitrates, the figures presented correspond to the year 2000 for Austria, Czech Republic, New Zealand, Norway, Switzerland and United States; 2002 for Denmark; 2004 for Finland and Ireland; 2005 for Belgium (Wallonia); 2008 for United Kingdom; and 2009 for Netherlands and Sweden. For phosphorus, the figures presented correspond to the year 2000 for Austria, Czech Republic, Norway, Switzerland and United States; 2002 for Denmark; 2004 for Finland; 2005 for Belgium (Wallonia); and 2009 for Netherlands, Sweden and United Kingdom.

Wir haben aufgrund früherer und aktueller Berechnungen mit dem MODIFFUS folgende Daten zusammengestellt, welche wir dem BAFU für die OECD/Eurostat-Tabelle vorschlagen:

Stickstoff						
	Modiffus			Modiffus		
	Diffuse Einträge	Punktquellen	Total	Diffuse Einträge LN		Quelle
	Nges (t)	Nges (t)	Nges (t)	Nges (t)	%	
1985	68'500	50'000	118'500	40'070	34	Prasuhn (2016)
2000	53'342	30'000	83'342	33'188	40	Prasuhn et al. (2016)
2005	56'300	28'200	84'500	34'000	40	Heldstab et al. (2010)
2010	51'492	23'947	75'439	32'208	43	Hürdler et al. (2015)
2020	47'515	22'819	70'334	27'942	40	Hutchings et al. (2023)

Die Angaben zu den N-Frachten der Punktquellen der Jahre 1985 und 2000 sind grobe Schätzwerte der AutorInnen und müssen ggf. geprüft und angepasst werden.

1985 war der Anteil der diffusen Einträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen an den totalen N-Einträgen mit 34 % relativ gering und hat in den nachfolgenden Jahren zugenommen und sich bei einem Wert von rund 40 % eingependelt. Aber sowohl die Frachten aus diffusen Quellen als auch die Einträge aus Punktquellen haben kontinuierlich abgenommen.

Phosphor						
	Modiffus			Modiffus		
	Diffuse Einträge	Punktquellen	Total	Diffuse Einträge LN		Quelle
	P _{gel} (t)	P _{gel} (t)	P _{gel} (t)	P _{gel} (t)	%	
1985	-	-	-	-	-	
2000	938	1500	2438	800	33	Prasuhn et al. (2016)
2010	909	896	1805	605	34	Hürdler et al. (2015)
2020	744	662	1406	500	36	Hutchings et al. (2023)
	P _{ges} (t)	P _{ges} (t)	P _{ges} (t)	P _{ges} (t)	%	
1985	-	-	-	-	-	
2000	3713	1500	5213	1209	23	Prasuhn et al. (2016)
2010	3489	896	4385	1171	27	Hürdler et al. (2015)
2020	3380	662	4042	1050	26	Hutchings et al. (2023)

Die Angaben zu den Punktquellen des Jahres 2000 und zu den gelösten diffusen P-Einträgen 2000 sind grobe Schätzwerte der AutorInnen und müssen ggf. geprüft und angepasst werden.

Für Phosphor liegen für das Jahr 1985 keine schweizweiten Daten vor. Der Anteil der diffusen Quellen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen an den totalen P-Einträgen beträgt beim gelösten P im Jahr 2000 33 % und hat leicht zugenommen auf 36 % im Jahr 2020. Die Frachten aus Punktquellen haben stärker abgenommen als die Frachten aus diffusen Quellen. Beim Gesamt-P betrug der Anteil der diffusen Quellen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen im Jahr 2000 mit 23 % deutlich weniger als beim gelösten P. Auch beim Gesamt-P hat der prozentuale Anteil der diffusen Quellen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen leicht zugenommen auf 26 % im Jahr 2022.

Folgende Bemerkungen müssen zu den gelieferten Daten gemacht werden:

- Es handelt sich um die diffusen N- und P- Einträge gemäss Definitionen und Berechnungen mit MODIFFUS. Die diffusen Einträge enthalten nicht die Einträge aus Mischwasserentlastungen. Diese werden in MODIFFUS den punktuellen Quellen zugeordnet, international aber häufig den diffusen Quellen. Die landwirtschaftlich genutzten Flächen beinhalten auch die alpwirtschaftliche Nutzfläche. Die diffusen Einträge der landwirtschaftlichen Nutzflächen beinhalten einerseits auch die natürliche Hintergrundlast dieser Flächen. Andererseits ist die N-Auswaschung in Waldflächen und unproduktiven Flächen, die aus der N-Deposition aus der Landwirtschaft (Ammoniakemissionen) stammt, nicht berücksichtigt.
- MODIFFUS berechnet die Gesamt-Stickstoffeinträge, nicht die Nitrat-Einträge.
- MODIFFUS berechnet die Gesamt-P-Einträge und die gelösten P-Einträge, nicht die Ortho-Phosphat-Einträge.

Trotz dieser Einschränkungen schlagen wir die berechneten Prozentwerte für die OECD/Eurostat-Tabelle vor. Sie entsprechen in der Grössenordnung auch den bisherigen Daten.