



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Agroscope
Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften INH

Volker Prasuhn | 18. August 2016

Bericht | Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Abklärungen zum Umweltziel Landwirtschaft: Reduktion der landwirtschaftsbedingten Stickstoffeinträge in die Gewässer um 50% gegenüber 1985

Auftraggeber:

Bundesamt für Umwelt BAFU, 3003 Bern

Auftragnehmer:

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

Autor:

Volker Prasuhn

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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	4
1. Ausgangslage.....	5
2. Zielsetzung.....	5
3. Ziel 1: Abklärung des Beitrages der N-Deposition, speziell Ammoniak, an der Nitratauswaschung unter Wald und unproduktiven Flächen	6
3.1 N-Emissionen und N-Deposition in der Schweiz sowie „Critical Loads“	6
3.2 Beziehung zwischen N-Deposition und N-Auswaschung im Wald	11
3.3 Messungen von N-Auswaschung im Schweizer Wald	12
3.4 Messungen und Modellierungen von Nitratauswaschung unter Wald im Ausland	15
3.5 Natürliche Hintergrundlast für N-Auswaschung	17
3.6 N-Auswaschung unter Wald nach Achermann et al. (2016)	17
3.7 N-Auswaschung unter Wald mit MODIFFUS	19
3.8 Der Anteil an landwirtschaftsbedingten N-Verbindungen an der N-Auswaschung im Wald	20
4. Ziel 2: Klärung des Begriffes „landwirtschaftsbedingte Stickstoffeinträge“ in Gewässer	21
5. Ziel 3: Berechnung des Ausgangswertes 1985 für diffuse N-Einträge und landwirtschaftsbedingte N-Einträge auf der Grundlage bestehender Daten	23
5.1 Varianten der Berechnung der diffusen N-Einträge in die Gewässer der Schweiz	23
5.1.1 Berechnung nach Methode N-Haushalt Schweiz 1990 (BUWAL 1993a, b)	23
5.1.2 Berechnung nach Methode Prasuhn (2003) und Prasuhn & Sieber (2005)	24
5.1.3 Berechnung nach Methode Prasuhn (2003) und Prasuhn & Sieber (2005) mit teilweise angepassten Daten	25
5.1.4 Berechnung der Gesamt-N-Fracht über Pegelmessdaten	26
5.2 Berechnung der landwirtschaftsbedingten N-Einträge in die Gewässer der Schweiz	28
6. Diskussion	33
7. Literatur	35

Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wurden Abklärungen dazu getroffen, inwieweit das Umweltziel „Reduktion der landwirtschaftsbedingten Stickstoffeinträge in die Gewässer um 50% gegenüber 1985“ erreicht worden ist. Emissionen von Stickstoff (N) aus der Landwirtschaft in die Luft in Form von Ammoniak (NH_3) tragen über die N-Deposition massgeblich zur N-Auswaschung unter Wald und unproduktiven Flächen bei und müssen bei der Betrachtung der landwirtschaftsbedingten N-Einträge berücksichtigt werden. Die natürliche Hintergrundlast ist andererseits zu ermitteln und in Abzug zu bringen. Es werden vier mögliche Methoden zur Berechnung der gesamten diffusen N-Einträge in die Gewässer der Schweiz diskutiert; ein Verfahren wird daraufhin empfohlen. Demnach betrugen die diffusen N-Einträge im Jahr 1985 68'500 t N und im Jahr 2010 51'500 t N. Die diffusen N-Einträge haben sich in diesem Zeitraum somit um 17'000 t N bzw. 25% reduziert. Darauf basierend werden neun Varianten für die landwirtschaftsbedingten N-Einträge berechnet. Das empfohlene Verfahren berücksichtigt die diffusen N-Einträge von den landwirtschaftlich genutzten Flächen inklusive der alpwirtschaftlichen Nutzflächen plus den aus den landwirtschaftlichen NH_3 -Emissionen stammenden Anteilen an der N-Auswaschung und N-Abschwemmung von Wald und unproduktiven Flächen, abzüglich der natürlichen Hintergrundlast von allen landwirtschaftlich genutzten Flächen. Die so ermittelte Fracht beträgt **49'000 t N für 1985** und wird als Ausgangswert für die Beurteilung der Zielerreichung vorgeschlagen. Die mit demselben Verfahren berechnete Fracht für 2010 beträgt 36'500 t N. Damit konnte eine **Reduktion von 12'500 t N bzw. 26%** erreicht werden. Das gesteckte Umweltziel einer Reduktion um 50% wurde somit klar verfehlt. Es besteht eine Ziellücke von 12'000 t N landwirtschaftsbedingter N-Einträge. Die flächenspezifischen landwirtschaftsbedingten N-Einträge haben sogar nur um 21% abgenommen. 5% der Abnahme von 26% beruht auf dem Verlust von landwirtschaftlich genutzten Flächen (Umwandlung in andere Nutzungen). Die Reduktion der NH_3 -Emissionen in die Luft hat zu einem wesentlichen Teil (5'000 t N) zur Verringerung der landwirtschaftsbedingten N-Einträge in die Gewässer beigetragen.

1. Ausgangslage

Im Bericht „Umweltziele Landwirtschaft“ (BAFU & BLW 2008) lautet beim Stickstoff Ziel 2: **„Reduktion der landwirtschaftsbedingten Stickstoffeinträge in die Gewässer um 50% gegenüber 1985“**. Bei der Herleitung dieses Zieles wird auf das „Allgemeine Umweltziel“ für Stickstoff **„Reduktion der Stickstoffeinträge in die Gewässer um 50% gegenüber 1985“** (BAFU & BLW 2008) verwiesen. Letzteres beruht auf internationalen Abkommen (OSPAR, IKSr) und bezieht sich auf das Rheineinzugsgebiet der Schweiz (Zufluss zur Nordsee) (OSPAR 2008). Dazu liegen Jahresfrachten aus Pegelmessdaten vor (Weil am Rhein) und Modellrechnungen für die Stickstoffeinträge in das REZGUS (Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der Seen) für 1985 vor (Prasuhn & Sieber 2005). Entsprechend kann auf der Basis der neuen MODIFFUS-Berechnungen (Hürdler et al. 2015) die Zielerreichung des allgemeinen Umweltziels für Stickstoff beurteilt werden.

Beim „Umweltziel Landwirtschaft“ gestaltet sich dies schwieriger. Weder ist klar definiert, was die „landwirtschaftsbedingten Stickstoffeinträge“ sind, noch liegen Berechnungen dazu für die ganze Schweiz für das Jahr 1985 vor. Der Ausgangswert für 1985 ist also nicht bekannt. Bezüglich der Beurteilung der Zielerreichung ist es aber zwingend nötig, zu wissen, welche N-Fracht um 50% reduziert werden soll.

Eine Halbierung der durch die Landwirtschaft verursachten Auswaschung von Nitrat wurde bereits in BUWAL & BLW (1996, S. 37) als vorläufiges Ziel festgelegt. In BUWAL & BLW (1996, S. 36) wurde - ausgehend von einer anthropogenen N-Belastung im Rheineinzugsgebiet unterhalb der Seen von 53'000 t N im Jahr 1985 - eine Reduktion von 10'000 bis 12'000 t N bis zum Jahr 2000 prognostiziert und im Sinne einer Zielsetzung eine Reduktion von 18'000 bis 28'000 t N bis zum Jahr 2015 anvisiert. Als ökologische Zielsetzung wurden 15'000 bis 20'000 t N-Einträge aus der Landwirtschaft in die Gewässer der Schweiz genannt. In BUWAL (1993a, S. 46) wurde ein Verminderungspotential der N-Verluste aus der Landwirtschaft von 15'000 t N für den Zeitraum 1985 bis 2010 berechnet.

2. Zielsetzung

- (1) Abklärung des Beitrages der N-Deposition, im speziellen der reduzierten N-Verbindungen (NH_3 und NH_4^+), an der Nitratauswaschung unter Wald und unproduktiven Flächen; Klärung, ob diese Einträge zu den landwirtschaftsbedingten Einträgen zählen oder nicht.
- (2) Definition der „landwirtschaftsbedingten N-Einträge“;
- (3) Eruiieren des N-Ausgangswertes 1985 auf der Grundlage bestehender Daten/Ab-schätzungen.

In diesem Bericht werden nur Abklärungen und einfache Berechnungen, die auf bestehenden Datensätzen und Annahmen beruhen, zu den oben aufgeführten Punkten gemacht. Es werden keine vollständig neuen Berechnungen des Stickstoffhaushaltes Schweiz oder der Stickstoffeinträge mit MODIFFUS für 1985 gemacht.

3. Ziel 1: Abklärung des Beitrages der N-Deposition, speziell Ammoniak, an der Nitratauswaschung unter Wald und unproduktiven Flächen

Mittels Literaturrecherche und Expertengesprächen mit S. Braun (IAP Schönenbuch), P. Schleppi, P. Waldner und A. Thimonier (WSL Birmensdorf) sowie B. Achermann, G. Theis-Goldener und S. Augustin (BAFU) wurde abgeklärt, wie hoch die Nitratauswaschung unter Wald und unproduktiven Flächen in der Schweiz ist und wie hoch sie ohne anthropogene Luftverschmutzung (bei natürlicher Luftbelastung bzw. N-Deposition) sein würde (= natürliche Hintergrundlast). Weiterhin wurde abgeklärt, welchen Anteil die landwirtschaftsbedingten NH₃-Emissionen an der N-Deposition haben und welchen Einfluss diese auf die N-Auswaschung insgesamt haben. Dies ist für die Definition der „landwirtschaftsbedingten N-Einträge“ von zentraler Bedeutung.

3.1 N-Emissionen und N-Deposition in der Schweiz sowie „Critical Loads“

Gemäss dem Schweizer Luftschadstoff-Emissionsinventar (Informative Inventory Report, BAFU 2012a) und dem Treibhausgasinventar (National Inventory Report, BAFU 2012b) aus dem Jahr 2012 betrugen die schweizerischen N-Emissionen im Jahr 2010 insgesamt 82'000 t N (NO_x-N, NH₃-N, N₂O-N). 66% der N-Emissionen stammten überwiegend aus der Landwirtschaft, 34% aus dem Energiesektor (Verkehr, Industrie und Haushalte) (Tab. 1). 63% der Gesamt-N-Emissionen waren NH₃-N-Emissionen, von denen wiederum 92% überwiegend aus der Landwirtschaft stammten (= 47'410 t N).

Tab. 1: Emissionen von N-haltigen Luftschadstoffen der beiden Hauptquellengruppen Landwirtschaft und Energiesektor in Gg N (Zusammenstellung aus Bühlmann 2014).

	Landwirtschaft	Energie	Total Schweiz
NO _x -N (Gg)	1.38	22.33	23.96
NH ₃ -N (Gg)	47.41	2.76	51.46
N ₂ O-N (Gg)	5.12	0.65	6.58
Total N (Gg)	53.92	25.74	82.00

Tab. 2: NH₃- und NO_x-Emissionen von 1980 bis 2010 (Zusammenstellung nach Angaben aus Bühlmann 2014).

Jahr	NH ₃ -N (Gg)	NO _x -N (Gg)
1980	66.32	50.75
1985	62.61	50.19
1990	59.26	44.25
2000	53.06	33.51
2007	52.33	26.28
2010	51.46	23.96

Die Entwicklung der N-Emissionen zeigt Tab. 2. Die NH_3 -Emissionen haben demnach seit 1985 um 18% abgenommen, die NO_x -Emissionen um 52%. Die N-Emissionen haben also insgesamt deutlich abgenommen, die NO_x -Emissionen aber stärker als die NH_3 -Emissionen. Entsprechend hat sich das Verhältnis von NO_x - zu NH_3 -Emissionen verändert. Während 1985 56% NH_3 -Emissionen waren, waren es 2010 69%.

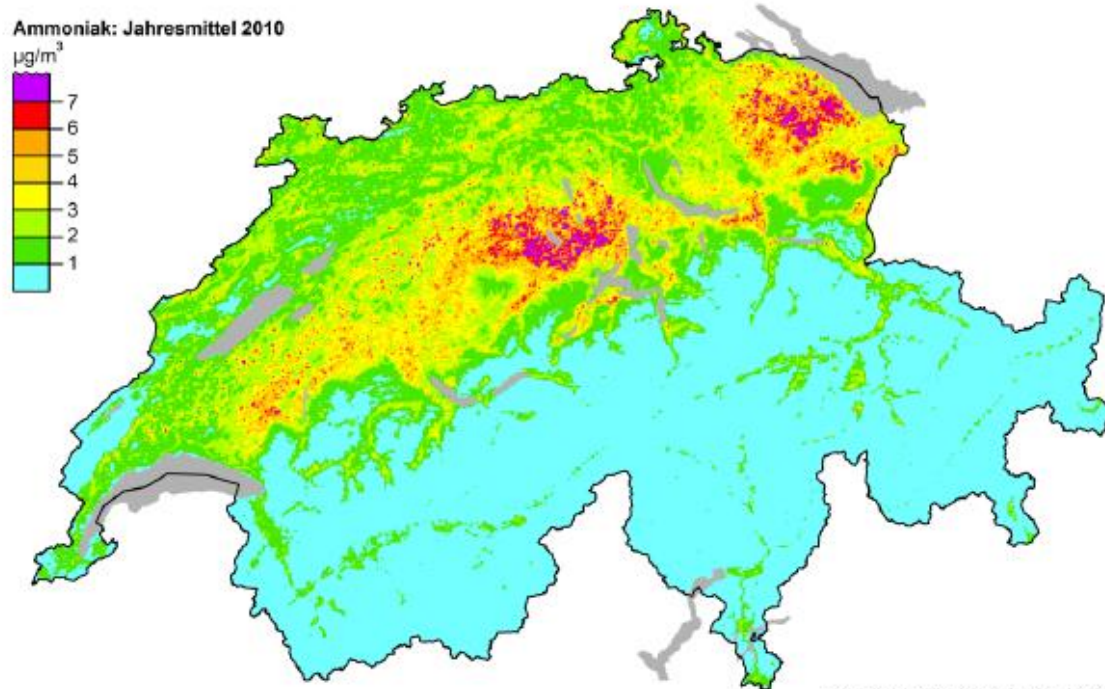


Abb. 1: Jahresmittel der Ammoniakkonzentrationen im km^2 -Raster des Jahres 2010 (Quelle: Meteotest 2014).

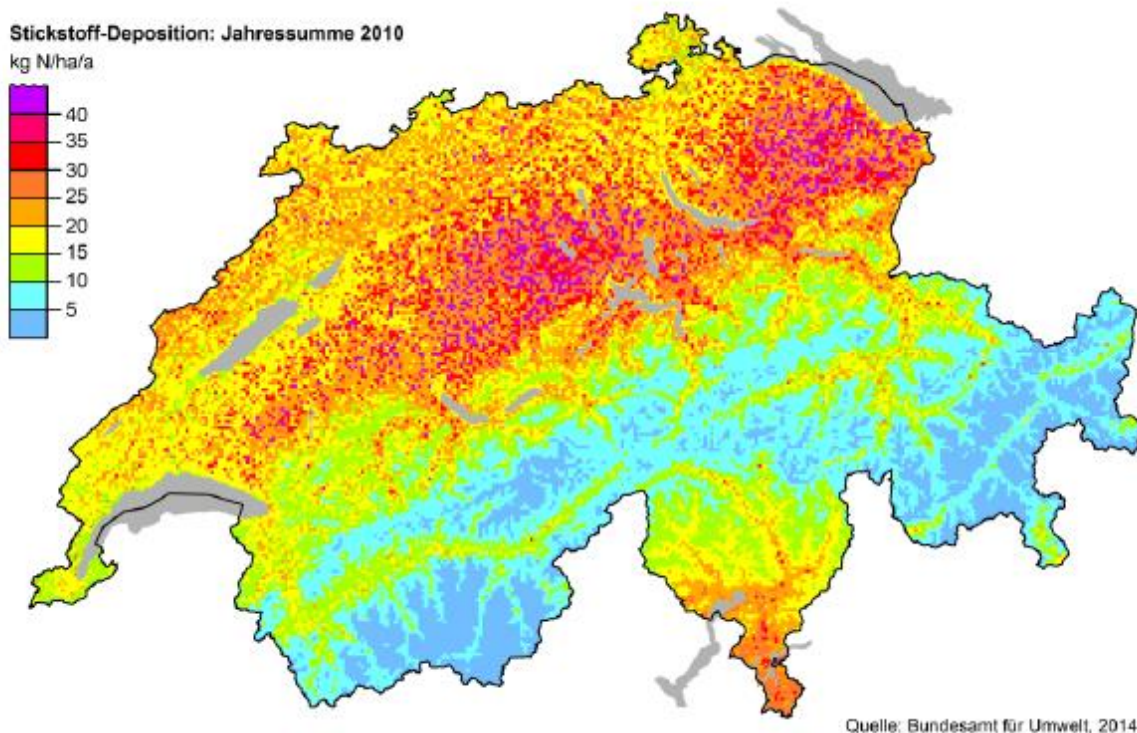


Abb. 2: Modellerte Stickstoffdeposition. Belastungskarte im km^2 -Raster des Jahres 2010 (Quelle: Meteotest 2014).

Die Emissionsdaten von $\text{NO}_x\text{-N}$ und $\text{NH}_3\text{-N}$ werden zur Modellierung der N-Deposition verwendet. Das gasförmige Ammoniak wird überwiegend über kurze Distanzen verfrachtet und dabei in ammoniumhaltige Aerosole umgewandelt, die über grössere Distanzen transportiert werden. Aus diesem Grund treten erhöhte Ammoniakkonzentrationen nur in unmittelbarer Umgebung der Ammoniakquellen auf (Abb. 1). Der Stickstoff wird trocken in Form von Gasen oder festen Partikeln oder nass mit dem Niederschlag deponiert. Ein Teil der N-Depositionen kann auch aus dem Ausland importiert sein. Abbildung 2 zeigt die modellierte N-Deposition für die Schweiz für das Jahr 2010.

Bühlmann (2014) hat die N-Depositionen für verschiedene semi-natürliche Landnutzungen zusammengestellt (Tab. 3). Demnach betrug die N-Deposition im Schweizer Wald im Mittel 23,6 kg N/ha im Jahr 2010. Die Deposition auf allen semi-natürlichen Flächen betrug insgesamt 29'630 t N, im Jahr 1985 36'780 t N. Sie hat sich also um knapp 20% verringert und liegt damit in der gleichen Grössenordnung, wie sich die gesamten N-Emissionen der Schweiz in diesem Zeitraum verringert haben. Achermann et al. (2016) haben die N-Deposition auf die Waldfläche der Schweiz (1'039'800 ha) nach ersten Berechnungen für das Jahr 2000 (Rihm & Achermann 2007) neu für 2010 berechnet. Sie kommen für das Jahr 2010 mit 23'900 t N bzw. 23,0 kg N/ha auf ähnliche Werte wie Bühlmann et al. (2015). 67% dieser Deposition sind reduzierte N-Verbindungen, die überwiegend aus NH_3 -Emissionen stammen (Achermann et al. 2016). Für 1985 rechnen Achermann et al. (2016) mit einer N-Deposition auf Waldflächen von 30'300 t N bzw. 29,1 kg N/ha. Die N-Deposition hat demnach im Wald um insgesamt um 21% abgenommen, die reduzierten N-Verbindungen um 18%.

Rihm (2016) hat die N-Deposition für alle Flächen >2000 m Höhe für das Jahr 2010 berechnet (Tab. 4). Danach beträgt die N-Deposition auf diesen Flächen 5'822 t N bzw. 6,0 kg N/ha und ist somit bedeutend geringer als im Mittelland und in den Voralpen oder als im Wald. Die geringste Deposition erfolgt auf den höchstgelegenen Flächen („bare land“ = Fels und Gletscher) mit 5,2 kg N/ha. Diese Werte liegen aber trotzdem deutlich über der zu erwartenden natürlichen Hintergrundlast (s. Kap. 3.5). Insgesamt stammen 60% der gesamten N-Deposition auf Flächen >2000 m Höhe aus reduzierten N-Verbindungen (überwiegend Landwirtschaft) und 40% aus oxidierten N-Verbindungen.

Tab. 3: Fläche, totale N-Deposition auf die Ökosystemflächen und mittlere flächenbezogene N-Deposition der (semi-)natürlichen Ökosysteme der Schweiz für das Jahr 2010. (Quelle: Bühlmann 2014).

	Wald	(semi-)natürliches Grasland	Nassstandorte	Total
Fläche (ha)	1'073'262	489'173	7'931.00	1'570'366
N-Deposition (Gg N)	25.31	4.16	0.16	29.63
Mittlere N-Deposition (kg N ha ⁻¹ a ⁻¹)	23.58	8.50	20.17	18.87

Tab. 4: N-Deposition auf Flächen über 2000 m Höhe für das Jahr 2010 (Quelle: Rihm 2016).

			kg N	kg N	kg N	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha
Code	Description	Area km ²	REN2010	OXN2010	NTOT2010	REN2010	OXN2010	NTOT2010
1	closed forest	85	44'370	24'465	68'835	5.2	2.9	8.1
2	open forest	87	47'978	26'434	74'412	5.5	3.0	8.6
3	brush forest	88	47'948	32'105	80'053	5.4	3.6	9.1
4	woods	40	20'051	10'484	30'534	5.0	2.6	7.6
8	arable land and meadows (except mountain meadows)	3	1'512	757	2'269	5.0	2.5	7.6
10	mountain meadows	46	22'429	11'451	33'880	4.9	2.5	7.4
11	alpine pastures	2'225	999'390	563'463	1'562'853	4.5	2.5	7.0
12	lakes	39	13'367	9'200	22'567	3.4	2.4	5.8
13	rivers and river shores	42	16'545	10'750	27'296	3.9	2.6	6.5
14	unproductive vegetation	1'430	661'281	386'845	1'048'127	4.6	2.7	7.3
15	bare land	5'557	1'592'759	1'271'310	2'864'069	2.9	2.3	5.2
16	buildings (except industry)	2	760	475	1'235	3.8	2.4	6.2
17	surroundings of buildings (except industry)	1	403	259	661	4.0	2.6	6.6
20	special urban areas	1	384	225	609	3.8	2.3	6.1
22	road areas	6	2'420	1'893	4'313	4.0	3.2	7.2
	Total	9'652	3'471'597	2'350'115	5'821'712	3.6	2.4	6.0
REN = Deposition von reduzierten N-Verbindungen (von NH ₃ -Emissionen stammend)								
OXN = Deposition von oxidierten N-Verbindungen (von NO _x -Emissionen stammend)								
NTOT = gesamte N-Deposition								

Als „Critical Load“ wird die Grenze einer Belastung in Bezug auf das Auftreten von schädlichen Auswirkungen bezeichnet. Definition „Critical Load“: die quantitative Schätzung einer Belastung durch ein oder mehrere Luftschadstoffe, unterhalb derer signifikante schädliche Effekte auf ausgewählte sensitive Teile des Ökosystems nach aktuellem Kenntnisstand nicht auftreten (UNECE 1992). Die Eintragungsgrenze ist abhängig von verschiedenen Standort- und Umweltfaktoren und wird empirisch oder über Massenbilanzen ermittelt (EKL 2014, Rihm & Kurz 2001). Die „Critical Loads for nitrogen“ liegen je nach Waldtyp bzw. Ökosystem zwischen 5 und 20 kg N/ha und Jahr (Bobbink & Hetteling 2011). Die Deposition im Wald der Schweiz beträgt nach Bühlmann (2014) im Mittel 24 kg N/ha und Jahr, bei natürlichem Grasland 8,5 kg N/ha und Jahr. Auf mehr als 90% der Waldfläche in der Schweiz wird der „Critical Load for nitrogen“ überschritten. Die Karte der maximalen Überschreitung der „Critical Loads for nitrogen“ zeigt, wie stark die N-Deposition reduziert werden müsste, damit keine schädlichen Auswirkungen mehr auftreten würden (Abb. 3). Vor allem im Mittelland sind die Überschreitungen sehr hoch. Abbildung 4 zeigt die Verteilung der „Critical Loads for nitrogen“ für die Waldfläche der Schweiz.

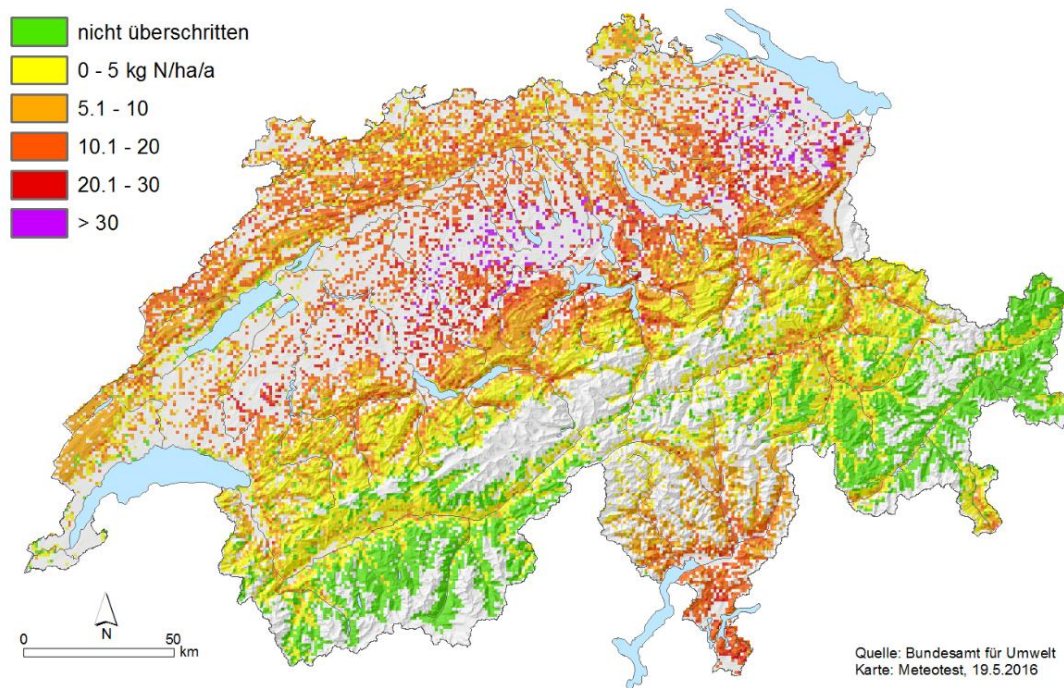


Abb. 3: Maximale Überschreitungen der Critical Loads für Stickstoff in (semi-)natürlichen Ökosystemen im km²-Raster für das Jahr 2010 (Quelle: Meteotest 2016)

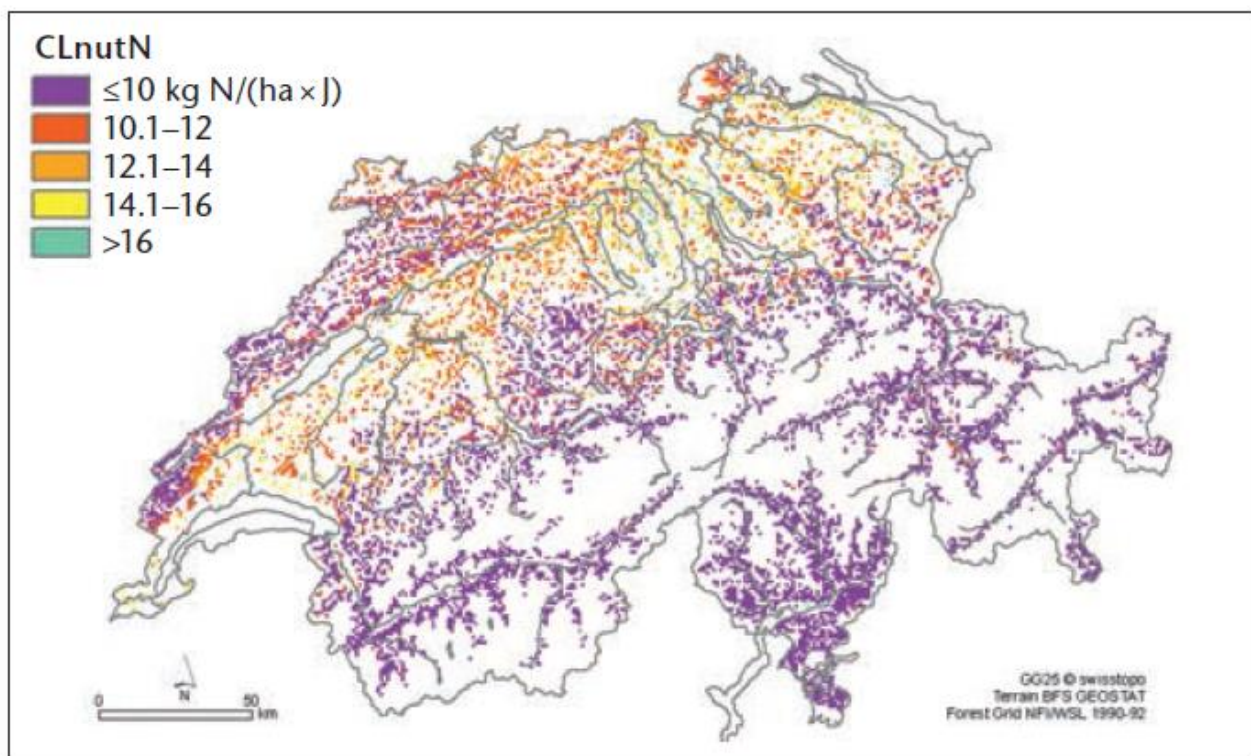


Abb. 4: Verteilung des Critical Load für Stickstoff (CLnutN) für den Schweizer Wald, basierend auf dem SMB-Ansatz (simple mass balance). Das Waldraster stammt vom Schweizerischen Landesforstinventar (Quelle: Braun et al. 2012).

3.2 Beziehung zwischen N-Deposition und N-Auswaschung im Wald

Die Höhe der N-Auswaschung unter Wald wird einerseits durch die Höhe der N-Einträge und der N-Mineralisierung im Boden, andererseits durch die N-Senken bzw. andere Verlustquellen bestimmt. Die massgebliche Eintragsquelle ist die N-Deposition; N-Senken sind die Nettoaufnahme der Vegetation und die Immobilisierung im Boden; eine weitere Verlustquelle ist die Denitrifikation im Boden. Sind die N-Einträge durch Deposition grösser als die N-Senken, ist das Risiko für N-Auswaschung gross. Der Zusammenhang zwischen Höhe der N-Deposition und N-Auswaschung ist in der internationalen Literatur unbestritten. Übersteigt die N-Deposition Werte von 10 kg N/ha und Jahr, ist mit erhöhter N-Auswaschung (>5 kg N/ha und Jahr) zu rechnen (Braun et al. 2012, Thimonier et al. 2010). Das C/N-Verhältnis des Oberbodens wird in der Literatur immer wieder als ein wichtiges Kriterium für die Höhe der N-Auswaschung genannt. Bei hohem C/N-Verhältnis (meist in Moder- oder Rohhumusaufgaben) findet zuerst eine N-Akkumulation statt, d.h. N wird in erster Linie aufgenommen und kaum ausgewaschen (Braun et al. 2012). Als kritische Grösse für die N-Auswaschung wird in der Literatur meist ein C/N-Verhältnis von 25 angegeben, manchmal auch 23 (Dise et al. 2009). Die C/N-Verhältnisse in Oberböden der Schweizer Waldstandorte liegen aber nach Auskunft der angefragten Experten fast überall unter diesem Schwellenwert (Waldner et al. 2016, Walthert et al. 2016), so dass dieses Kriterium unberücksichtigt bleiben kann. Die Baumartenzusammensetzung wird in vielen Studien ebenfalls als wichtig angesehen, so ist die N-Auswaschung unter Nadelwald wegen des Auskämmeffekts der ganzjährigen Benadelung meistens viel höher als unter Laubwald (Hegg et al. 2004), was auch durch Messungen in der Schweiz bestätigt wird (Waldner et al. 2016). Bestandeszusammensetzung, Alter der Bäume und Krautschicht ist ebenfalls eine Einflussgrösse. Verjüngung führt zu geringerer N-Auswaschung, Durchforstung zu höherer. Dies wurde durch die Experten in der Schweiz bestätigt. Weiterhin wurde der Einfluss von Vernässung und damit Denitrifikation als wichtig taxiert. Auf vernässten Standorten ist entsprechend auch in der Schweiz mit geringerer N-Auswaschung zu rechnen.

Braun (2013) hat eine Formel zur Berechnung der N-Auswaschung in Abhängigkeit von N-Deposition, Denitrifikation und Verjüngung erstellt:

Aus dieser Analyse resultiert folgende Gleichung zur Schätzung der N-Auswaschung:

$$NLeach = e^{(0.80 \cdot NDEP^{0.5} - 10.0 \cdot f_{DE} - 3.70 \cdot VERJ^{0.5})}$$

mit NDEP=N-Deposition (kg N ha⁻¹ a⁻¹), f_{DE}: Denitrifikationsfaktor (0-1) und Verjüngung (VERJ = Anzahl Jungbäume in der Grössenklasse 1.3-2.5 m pro m²)

Wenig Information wurde in der Literatur gefunden zu den möglichen Einflussgrössen Sickerwassermenge, zeitliche Verteilung der Sickerwassermenge, Bodeneigenschaften (Wasserspeichervermögen, Gründigkeit, Sorptionsfähigkeit, Humusgehalt) sowie Temperatureinflüsse (N-Mineralisation).

Kurzfristige Phänomene wie Waldbrand, Windwurf, Borkenkäferbefall, Holzentnahmen oder Kahlschlag mit Aufforstung etc., die die natürlichen Stoffkreisläufe unterbrechen, können zu erheblich höheren Nitratauswaschungen über etliche Jahre führen.

3.3 Messungen von N-Auswaschung im Schweizer Wald

Das Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP) in Schönenbuch betreibt im Auftrag verschiedener Kantone seit vielen Jahren ein Messnetz, zu welchem heute über 300 Standorte zählen (Interkantonales Walddauerbeobachtungsprogramm). An 40 dieser Standorte werden die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser gemessen (Braun 2012, Braun & Flückiger 2013, Braun et al. 2012, Flückiger et al. 2011). Abbildung 5 zeigt die Verteilung der 40 Standorte mit Sickerwassermessungen. Sie liegen vor allem im Mittelland und der Nordwestschweiz, während die Zentralschweiz (UR, NW, OW, GL, SZ), Westschweiz (GE, VS, VD, NE) und Teile der Ostschweiz (SG, GR, AI, AR) schlecht abgedeckt sind. Im Tessin befinden sich 2 Standorte. Die Messungen der Nitratkonzentrationen erfolgt über keramische Saugkerzen, die in verschiedenen Bodentiefen in mehrfacher Wiederholung eingebaut sind. Das mittels angelegten Unterdruck gewonnene Sickerwasser wird monatlich analysiert und mit der über ein Wasserhaushaltsmodell (WASIM-ETH) berechneten Sickerwassermenge in eine Nitratfracht umgerechnet (zur Problematik der N-Frachtberechnung siehe Kap. 3.4). Die Messresultate bzw. berechneten N-Auswaschungsfrachten für 2005-2011 zeigt Tab. 5. Die Spannweite der Werte ist gross und reicht von 0,1 kg N/ha und Jahr bis 86 kg N/ha und Jahr (Standort im Tessin, der stark von der Deposition aus dem Ausland beeinflusst wird). Der Mittelwert beträgt 14,7 kg N/ha und Jahr, wird aber sehr stark von den Ausreissern bestimmt. Der Median eignet sich daher besser. Dieser beträgt 6,4 kg N/ha und Jahr.

Nach mündlicher Mitteilung von S. Braun ist bei den N-Auswaschungswerten unter Wald kein zeitlicher Trend von 1998 – 2012 messbar (obwohl die N-Deposition abgenommen hat), auch ist aus den Daten kein jahreszeitlicher Trend (Sommer/Winter etc.) erkennbar.

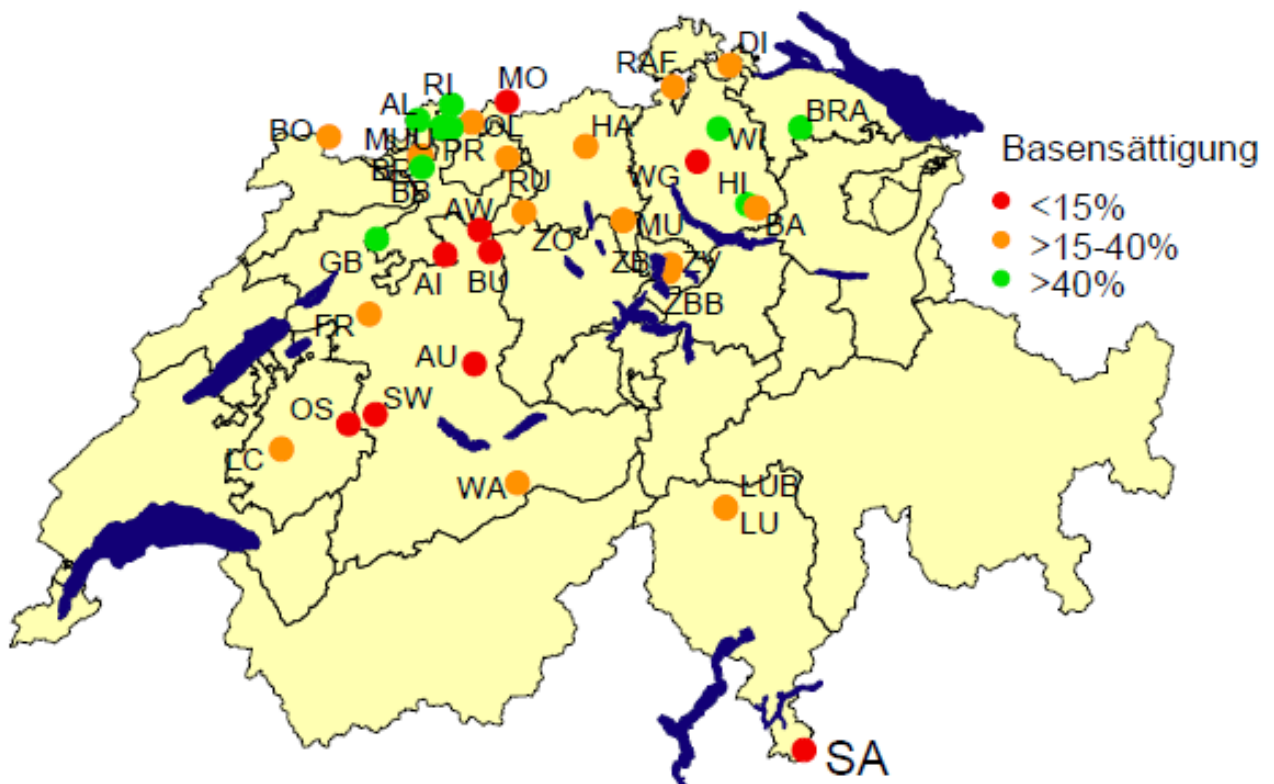


Abb. 5: IAP-Walddauerbeobachtungsflächen mit Bodenlösungsmessungen, klassiert nach Basensättigung (Versauerungsgrad) des Oberbodens (Quelle: Flückiger et al. 2011).

Tab. 5: Sickerwassermengen, Median der Nitratkonzentrationen in verschiedenen Bodentiefen, berechnete N-Auswaschung, modellierte N-Deposition und Bewertung der Grenzwertüberschreitung. Mittelwerte 2005-20011 (Quelle: Braun & Flückiger 2013; Braun 2013).

Standort	Sickerwasser	Nitratkonzentration			Leaching	Deposition	Grenzwertüberschreitung	
		≤30 cm	>30-60cm	>60cm			Konz.	Leach.
	mm	mg N/l	mg N/l	mg N/l	kg N ha-1 a-1	kg N ha-1 a-1		
AI	513	3.56	1.78	2.40	7.6	30.9	x	x
AL	95		51.12		49.3	26.7	x	x
AU	823	1.48	1.56	1.84	16.5	31.4	x	x
AW	446	1.62		0.86	4.9	25.0	x	x
BA	1028	4.69	3.86	3.91	36.1	34.8	x	x
BAB	1063	2.01	1.96	0.37	25.2	28.5	x	x
BB	281	0.07		0.02	0.1	21.3		
BO	388	0.06		0.00	0.1	17.8		
BR	291	2.19	1.09	1.05	2.5	25.2	x	
BRAU	420	5.05	3.93	2.18	9.9	42.1	x	x
BRB	361	0.26	0.05		0.3	20.7		
BU	369	0.07		0.01	0.1	46.5		
DI	239	6.12	5.98	6.42	15.7	23.7	x	x
FR	526	0.47	1.01	1.66	4.6	28.4	x	x
GB	1032	1.33			10.4	22.5	x	x
HA	266	2.52		3.35	9.4	22.1	x	x
HI	554	1.93		1.86	12.8	34.4	x	x
LC	761	0.25	0.69	0.07	1.2	32.7	x	
LU	1218	0.28	0.05	0.43	7.8	14.6	x	x
LUB	1083		0.16		5.5	15.5		x
MO	299	3.12	3.09	2.26	5.2	23.1	x	x
MU	560	2.64	3.01	2.80	15.0	35.9	x	x
MUB	382			1.62	5.9	28.7	x	x
MUF	263	4.02	4.16	3.83	11.7	36.1	x	x
MUU	217		0.49	0.16	0.5	22.0	x	
OL	237	0.11	0.09	0.03	0.1	21.5		
OS	463	0.08	0.06	0.04	0.1	28.2		
PR	368	0.55		0.40	1.8	21.6	x	
RAF	235	1.65		0.03	0.1	23.4	x	
RI	349	0.15		0.18	0.9	19.4		
RU	228	0.06		0.14	0.5	24.1		
SA	1140		8.76		66.3	37.8	x	x
SW	153	0.34	0.26	0.29	0.0	25.3	x	
WA	903	0.06	0.08	0.11	0.8	12.5		
WG	406	4.00	6.26	6.44	21.9	30.9	x	x
WI	430	0.70		0.62	2.4	29.7	x	
ZB	795	1.77	1.74	0.95	6.1	31.9	x	x
ZBB	931	1.48	0.68	0.07	6.4	29.1	x	x
ZO	402	0.32		0.33	0.3	27.1	x	
ZV	460	2.00		1.60	8.0	34.1	x	x

Als Indikator für die N-Sättigung eines Ökosystems gilt die erhöhte N-Auswaschung ins Grundwasser. Waldökosysteme gelten als stickstoffbelastet, wenn im Mittelland 4 kg N/ha und Jahr (Nadelwald) bis 5 kg N/ha und Jahr (Laubwald) und im Gebirge mehr als 1-2 kg N/ha und Jahr ausgewaschen werden (UNECE 1992). Diese Werte sind die maximal tolerierbaren Auswaschungswerte. Sie sind nicht mit der natürlichen Hintergrundlast gleichzusetzen, welche geringer ist. Nach den Messungen des IAP war in der Messperiode 2005-2011 bei 39% der Analysen die N-Auswaschung höher als dieser kritische Wert, d. h. 39% der Standorte waren gemäss diesem Kriterium N-überbelastet (Braun & Flückiger 2013).

Die Eidg. Anstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) in Birmensdorf betreibt 9 Standorte in der Schweiz im Rahmen der Dauerbeobachtung („Langfristige Waldökosystem-Forschung“, LWF), an denen die N-Auswaschung erfasst wird. An 8 Standorten werden Bodenlösungen analog zur Methode des IAP auf Nitratkonzentrationen untersucht und mittels Modellrechnungen (Wasserbilanzmodell WATBAL) zu N-Frachten verrechnet, an einem Standort wurde in einem Einzugsgebiet-Ansatz der Gesamtabfluss als Output genommen (Thimonier et al. 2010). Die Lage der Stationen zeigt Abb. 6. Bei den WSL-Standorten gibt es weniger Stationen im stark von der N-Deposition beeinträchtigten Mittelland.

Der Standort Alptal hatte im Mittel weniger als 5 kg N/ha und Jahr Auswaschung, die Denitrifikationsverluste an diesem Standort lagen bei rund 1 kg N/ha und Jahr (Schleppi 2005, Schleppi et al. 2003).

Die Spannweite der N-Auswaschung ist auch in diesem Messnetz nach 9 - 11 Messjahren hoch: 0,1 bis 23,1 kg N/ha und Jahr. Erhöhte N-Auswaschung wurde nur an Standorten mit einer Deposition von >10 kg N/ha und Jahr gemessen. Das Mittel über alle 9 Stationen beträgt 6,0 kg N/ha und Jahr (Thimonier et al. 2012).



Abb. 6: Die LWF-Dauerbeobachtungsflächen der WSL. An den Standorten Bettlachstock, Lausanne, Vordemwald, Othmarsingen, Schanis, Beatenberg, Celerina und Novaggio werden Bodenlösungen gewonnen, am Standort Alptal wird in einem Einzugsgebiet-Ansatz der Abfluss gemessen (Quelle: Thimonier et al. 2010).

3.4 Messungen und Modellierungen von Nitratauswaschung unter Wald im Ausland

Es gibt eine Vielzahl von Untersuchungen zur Messung und Modellierung der Nitratauswaschung unter Wald. Wichtige und häufig zitierte Arbeiten sind z. B. Aber (1989), Bobbink et al. (2003), Bobbink & Hettelingh (2011), Gundersen et al. (1998), Gundersen et al. (2006), Schaap et al. (2015), van der Salm et al. (2007), de Vries et al. (2007a, 2007b), Waldner et al. (2014). An dieser Stelle sollen nur Resultate einiger weniger Studien aufgeführt werden, die bereits eine Vielzahl von Untersuchungen zusammengefasst haben, sowie Untersuchungen, die aufgrund der Standortgegebenheiten mit der Schweiz vergleichbar sind. Bei den genannten 4 Untersuchungen handelt es sich um Auswertungen von Intensiv-Messflächen. Die Datensätze überschneiden sich sehr, d.h. in den Untersuchungen wurden oft auch Daten der anderen Studien verwendet, da z.B. jeweils die europäischen oder nur deutschen Level II-Standorte enthalten waren.

1. De Vries et al. (2007) haben Studien zu 121 ICP-Forest Level II-Standorten in Europa analysiert. Nur an zwei Standorten lag die mittlere N-Auswaschung über 20 kg N/ha und Jahr, ansonsten lag sie immer zwischen 0 und 20 kg N/ha und Jahr.
2. MacDonald et al. (2002) haben Studien von 181 Standorten in Europa analysiert. Sie fanden N-Auswaschungswerte von 1-40 kg N/ha und Jahr und eine klare Abhängigkeit von der Höhe der N-Deposition sowie einem C/N-Verhältnis > oder < 25 der Böden.
3. Dise et al. (2009) analysierten die Datensätze von IFEF (248 Standorte aus 15 Ländern) und die Level-II-Datenbasis aus dem UN-ECE/EC-Monitoring-programm mit über 200 Standorten aus 11 Ländern. Sie fanden eine starke Beziehung zwischen N-Input und N-Auswaschung sowie eine Abhängigkeit vom C/N-Verhältnis. War die N-Deposition mit dem Kronendurchlass < 8 kg N/ha und Jahr, war in 95% der modellierten Fälle die N-Auswaschung < 1 kg N/ha und Jahr.
4. Borken & Matzner (2004) berichten über Resultate von 57 Standorten in Deutschland. Die N-Austräge variierten zwischen 0-26,5 kg N/ha und Jahr; 29% der Flächen zeigten N-Auswaschungswerte > 5 kg N/ha und Jahr. Unter Fichten war die N-Auswaschung am höchsten (5,8 kg N/ha und Jahr), gefolgt von Buche (1,9), Eiche (1,2) und Kiefer (0,5 kg N/ha und Jahr). Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass Eichen und Kiefern auf trockenen Standorten wachsen, während die Fichte in kühleren und höheren Lagen mit höheren Niederschlagsmengen wächst.

In einem flächenhaften Ansatz haben Kiese et al. (2011) die N-Auswaschung für Deutschland mit einem prozess-orientierten, biogeochemischen Modell (Forest-DNDC) modelliert. Sie kommen auf Auswaschungswerte von 0-85 kg N/ha und Jahr, bei einem Mittelwert von 5,5 kg N/ha und Jahr. Betrachtet man hier nur die Mittelwerte für Bayern und Baden-Württemberg, die klimatisch am besten mit der Schweiz vergleichbar sind, waren die entsprechenden Auswaschungsfrachten 6,5 bzw. 6,0 kg N/ha und Jahr.

Die Resultate dieser Studien zeigen, dass die Nitratauswaschung unter Wald je nach Standort stark schwanken kann. Mittelwerte von nahe Null bis hin zu extrem hohen Werten von > 80 kg N/ha und Jahr wurden gemessen. Dies deckt sich gut mit der grossen Bandbreite der gemessenen Werte im Schweizer Messnetz von IAP und WSL.

Exkurs Saugkerzenproblematik:

Die meisten Untersuchungen zur Nitratauswaschung unter Wald beruhen auf der Analyse von Wasserproben, die mittels Saugkerzen gewonnen wurden. Auch in der Schweiz wird diese Methode vom IAP und der WSL angewendet. Dabei werden keramische Saugkerzen in verschiedenen Bodentiefen und in mehrfacher Wiederholung in den Boden eingebaut. Dann wird ein definierter Unterdruck angelegt, so dass Bodenwasser in die Saugkerze fließt. Dieses Wasser wird in definierten Zeitabschnitten abgesaugt, eine Mischprobe aus verschiedenen Saugkerzen der gleichen Bodentiefe gebildet und im Labor auf Nitrat und andere Stoffe analysiert (DVWK 1990, Wilson 1995). Die gemessenen Stoffkonzentrationen werden anschliessend mit Sickerwassermengen, die über hydrologische Modelle bestimmt werden, zu Stofffrachten verrechnet.

Die Methode ist zwar internationaler Standard (Manual des ICP Forests: Nieminen 2011), aber nicht unumstritten und ihre Vor- und Nachteile wurden schon vielfach in der Literatur diskutiert (z. B. Durner et al. 2004, Grossmann et al. 1987, Wang et al. 2012, Weihermüller et al. 2007). Zum einen wird mittels Saugkerzen nur die „volumengemittelte Konzentration“ und nicht die für die Sickerwasserprognose relevante „fliessgemittelte Konzentration“ erfasst (Durner et al. 2004). Weiterhin wird präferentieller Fluss über Makroporen mit Saugkerzen i. d. R. nicht erfasst („Bypassing“). Saugkerzen erfassen weiterhin vorwiegend die Inhalte der beim angelegten Unterdruck jeweils grössten wassergefüllten Poren.

Ein Problem ist oft die Hochrechnung der ermittelten Stoffkonzentrationen in Frachten. Da eine Messung der Sickerwassermenge sehr aufwändig ist (z. B. mittels Feldlysimeter) und im Wald noch schwieriger ist als unter landwirtschaftlich genutzten Flächen, werden Wasserhaushaltsmodelle herangezogen. Diese berücksichtigen zwar alle für den Wasserfluss wichtigen Einflussgrößen für Waldstandorte (Hörmann et al. 2003). Inwieweit sie aber die Sickerwassermenge für den jeweiligen Zeitraum (meist 14 Tage oder monatlich) in Anbetracht der komplexen Verhältnisse im Wald (Interzeption, Stammabfluss, Wurzelwerk, Krautschicht, Heterogenität des Bodens etc.) richtig wiedergeben, ist unsicher.

Fazit aus diesen Betrachtungen: Die vorliegenden gemessenen Nitratauswaschungsfrachten unter Wald sind mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Damit sollen diese Werte nicht grundsätzlich in Frage gestellt werden, aber darauf hingewiesen werden, dass hier ein gewisser Schwankungs- und Interpretationsspielraum besteht.

3.5 Natürliche Hintergrundlast für N-Auswaschung

Die natürliche Hintergrundlast der N-Auswaschung ist ein theoretischer Wert, der die N-Auswaschung unter potenziell natürlicher Vegetation und ohne anthropogene Luftverschmutzung darstellt. Die potenziell 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.). Die natürlichen N-Einträge wären weitgehend beschränkt auf NO_x bei Blitzschlag und Waldbrand, natürliche NH_3 -Deposition (Wildtiere und natürliches Grasland) und natürliche N-Fixierung durch Vegetation und Böden. Immobilisierung, Denitrifikation und N-Mineralisierung (z. B. nach Waldbrand, Windwurf oder Schädlingsbefall) treten neben der Auswaschung weiterhin als Senken oder Quellen auf. Da derartige Verhältnisse nirgends mehr auf der Welt existieren, gibt es auch keine gesicherten Messwerte zur N-Auswaschung unter natürlichen Verhältnissen. Messwerte aus abgelegenen Regionen, in denen die Einflüsse der Luftverschmutzung gering sind, lassen auch nur bedingt Rückschlüsse zu, da hier meist völlig andere Standortbedingungen (Klima, Boden) vorliegen. Die natürlichen N-Emissionen sind in der Schweiz gemäss Angaben in Achermann et al. (2016) sehr gering, entsprechend ist auch mit geringen N-Depositionen zu rechnen. Verschiedene Studien aus relativ gering belasteten Wäldern in nordischen Ländern (Skandinavien, Alaska) nennen 1-2 kg N/ha und Jahr als Depositionswerte und geringe N-Auswaschungswerte von 0,3-1 kg N/ha und Jahr (Literatur siehe Achermann et al. 2016). Inwieweit die Ergebnisse dieser Studien unter Berücksichtigung von Niederschlag, Temperatur und Boden auf die Verhältnisse in der Schweiz übertragen werden können ist fraglich. Auch wenn die Höhe der N-Deposition eine sehr wichtige Rolle für die N-Auswaschung spielt, können andere Faktoren (Sickerwassermenge, jahreszeitliche Verteilung, N-Mineralisierung etc.) nicht ganz ausser Acht gelassen werden. Weiterhin ist die Messung der N-Auswaschungsfracht im Wald mit Unsicherheiten behaftet (siehe Kap. 3.4).

Keiner der angefragten Experten mochte sich bei den Vorbesprechungen auf einen Wert für die natürliche Hintergrundlast festlegen. Einig war man sich, dass es eine gewisse N-Auswaschung unter solchen Bedingungen geben wird und dass sie relativ gering sein muss. Mein Vorschlag von 1-2 kg N/ha und Jahr wurde von allen Experten als realistische Grössenordnung eingeschätzt, bzw. ihm wurde nicht widersprochen.

Daher wurde für die **natürliche Hintergrundlast ein Wert von 1,5 kg N/ha und Jahr** für die vorliegenden Berechnungen angenommen. Dieser Wert ist deutlich geringer als der bisher immer in MODIFFUS verwendete Wert von 3,5 kg N/ha und Jahr (Braun et al. 1991, Prasuhn & Mohni 2003, Hürdler et al. 2015). Er ist aber auch deutlich höher als der erst nach den Expertengesprächen empfohlene Wert von Achermann et al. (2016) von 0,3 kg N/ha und Jahr. Aufgrund der grossen Unsicherheiten bei der Festlegung eines solchen Wertes, sind beide Werte denkbar. Im vorliegenden Bericht wurde die im Sinne der Landwirtschaft konservative Schätzung von 1,5 kg N/ha und Jahr gewählt, es wurde aber auch zusätzlich mit den Werten von Achermann et al. (2016) gerechnet.

3.6 N-Auswaschung unter Wald nach Achermann et al. (2016)

Braun (2005), zitiert in Achermann et al. (2016) und Rihm & Achermann (2007), hat aus den schweizerischen und europäischen Messdaten zur N-Auswaschung unter Wald eine Beziehung zwischen der Höhe der N-Deposition und der N-Auswaschung abgeleitet (Abb. 7).

Achermann et al. (2016) haben daraus wiederum eine modifizierte Beziehung abgeleitet, die sie für ihre Berechnungen der N-Auswaschung in der Schweiz zugrunde gelegt haben (Abb. 8). Achermann et al. (2016) haben eine Waldfläche von rund 1'040'000 ha für ihre Berechnungen verwendet (ohne Gebüschwald und unzugänglichen Wald), in MODIFFUS wurde die gesamte bestockte Fläche gemäss Arealstatistik verwendet. Sie umfasst 1'293'017 ha und ist somit um 253'217 ha bzw. 24% grösser.

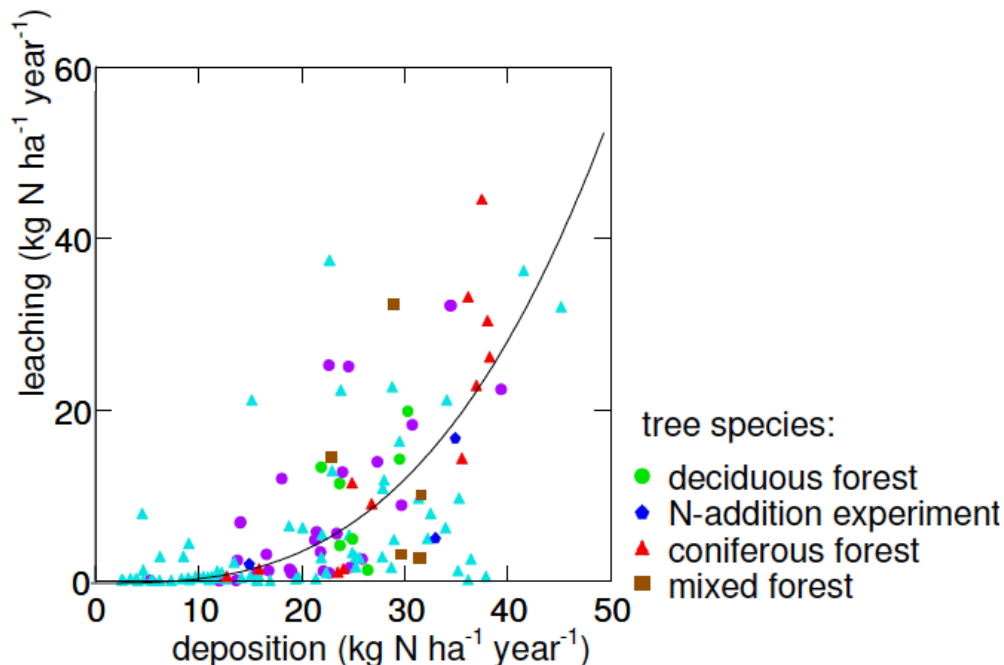


Abb. 7: Beziehung zwischen atmosphärischer N-Deposition und N-Auswaschung aus Waldökosystemen bei europäischen Waldstandorten des ICP Forests und des Instituts für angewandte Pflanzenbiologie IAP (Braun 2005). Hellblaue Symbole: Daten des europäischen Programms ICP Forests (LRTAP Convention, UNECE) (Quelle: Achermann et al. 2016).

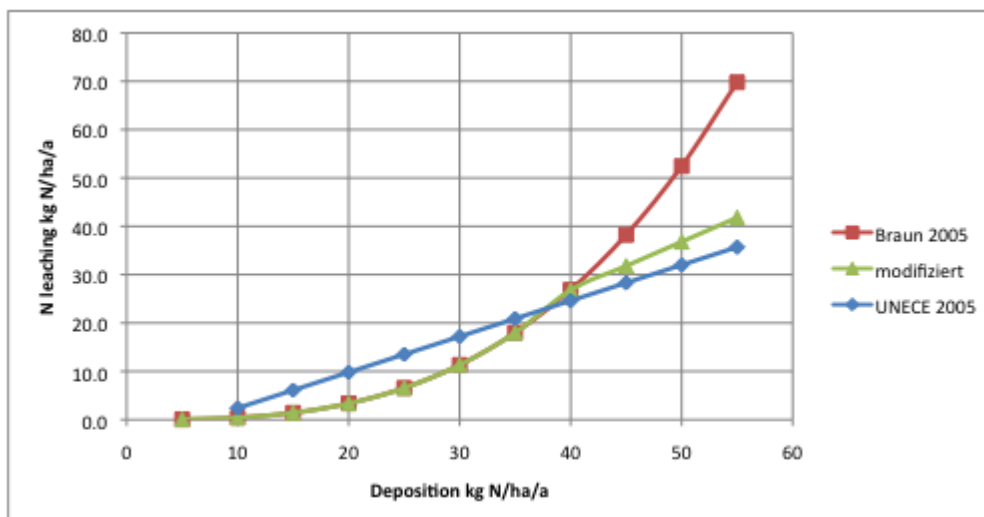


Abb. 8: Beziehungen zwischen N-Deposition und N-Auswaschung nach Braun (2005), UNECE (2005) sowie modifiziert für die Bewertung der durch atmosphärische N-Einträge erzeugten N-Auswaschung bei Waldstandorten in der Schweiz nach Achermann et al. (2016) (Quelle: Achermann et al. 2016).

Achermann et al. (2016) haben gemäss obiger Beziehung die N-Deposition von 2010 (Abb. 2) mit der Waldfläche verrechnet und eine Karte der durch N-Deposition verursachten N-Auswaschung unter Wald erstellt (Abb. 9). Die aufsummierte N-Fracht beträgt für das Jahr 2010 7'560 t N bzw. 7,3 kg N/ha und für das Jahr 1985 13'600 t N bzw. 13,1 kg N/ha.

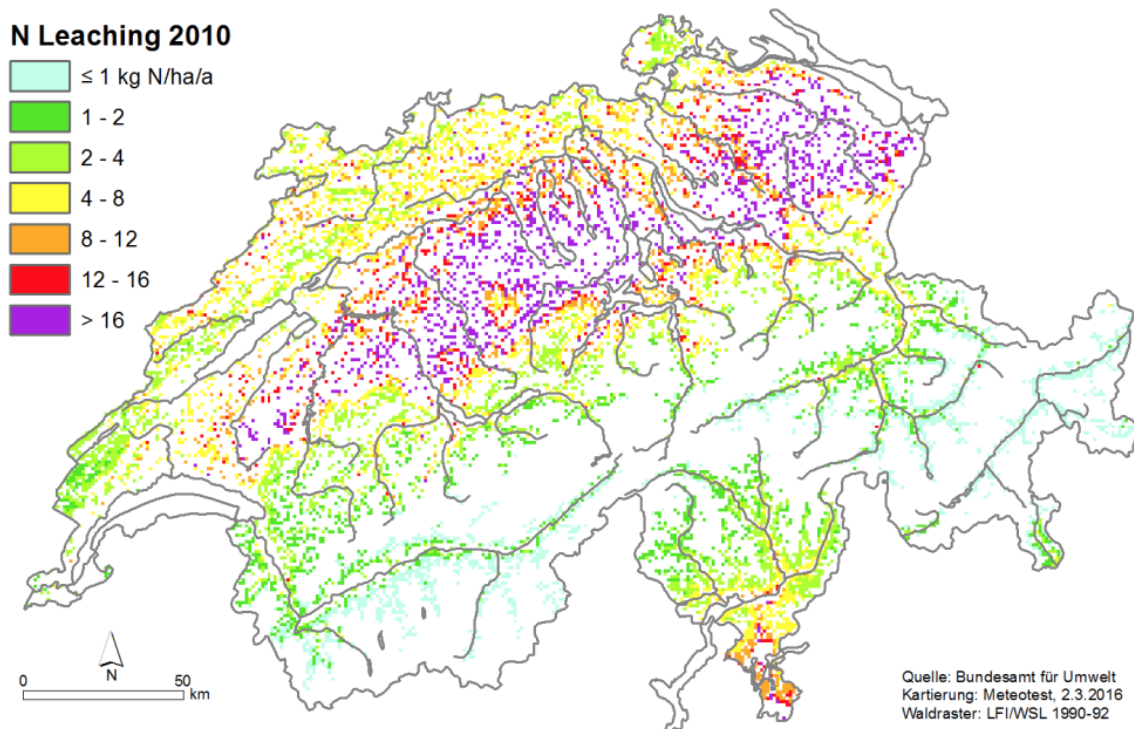


Abb. 9: Durch atmosphärische N-Deposition induzierte N-Auswaschung aus Waldökosystemen im km²-Raster für das Jahr 2010 (Quelle: Achermann et al. 2016).

Achermann et al. (2016) haben weiterhin die Anteile der oxidierten und reduzierten N-Komponenten der N-Deposition bei jedem Waldstandort auf die N-Auswaschung umgelegt und aufsummiert. Demnach stammen 5'350 t N aus reduzierten N-Verbindungen (überwiegend Landwirtschaft) und 2'210 t N aus den oxidierten N-Verbindungen. Somit stammen 5,15 kg N/ha und Jahr bzw. 71% aus reduzierten N-Verbindungen und 2,12 kg N/ha und Jahr bzw. 29% aus den oxidierten N-Verbindungen.

3.7 N-Auswaschung unter Wald mit MODIFFUS

Mit MODIFFUS wurde die N-Auswaschung bisher für das Jahr 2010 wie folgt berechnet (Hürdler et al. 2015):

Als N-Ausgangsauswaschungswert wurde für alle Waldflächen ein Wert von 5,5 kg N/ha und Jahr - abgeleitet aus Literaturdaten - eingesetzt. Dieser Ausgangswert wurde dann mit verschiedenen Standortfaktoren regional differenziert: die Höhe der Sickerwassermenge, die Höhenlage der jeweiligen Fläche und das Auswaschungsrisiko des Bodens (Details siehe Hürdler et al. 2015). Da die N-Deposition nur indirekt über den Ausgangswert und die Höhenlage in die Berechnungen eingeflossen ist, wurde die N-Auswaschung im Wald gegenüber der Berechnung von Achermann et al. (2016) im Mittelland vermutlich etwas zu niedrig und in den Alpen etwas zu hoch berechnet.

Die mit MODIFFUS berechnete N-Auswaschungsfracht für den Wald für das Jahr 2010 beträgt **7'356 t N bzw. 5,7 kg N/ha und Jahr**.

Achermann et al (2016) kommen für das Jahr 2010 auf eine Fracht von 7'560 t N bzw. 7,3 kg N/ha. Die absoluten Werte beider Berechnungen sind ähnlich gross, da aber unterschiedliche Waldflächenanteile den Berechnungen zugrunde gelegt wurden, unterscheiden sich die flächenspezifischen N-Auswaschungswerte um über 20%. Achermann et al. (2016) haben Daten des Landesforstinventars verwendet und ausschliesslich die Waldfläche berücksichtigt (1'040'000 ha), während in MODIFFUS die gesamte bestockte Fläche gemäss Arealstatistik mit 1'293'017 ha (inklusive Gebüschwald (66'899 ha) und Gehölzen (91'679 ha) verwendet wurde. Die Waldfläche in MODIFFUS ist somit um 24% grösser. Bei Gebüschwald und Gehölzen ist wegen der geringeren Auskämmungseffekte mit einer deutlich geringeren N-Deposition und somit auch mit einer geringeren N-Auswaschung zu rechnen. Damit nähern sich die flächenspezifischen Auswaschungswerte beider Berechnungen wieder etwas an.

Im Vergleich mit den aufgeführten Literaturwerten für Nitratauswaschung im Wald (Tab. 6) scheinen die mit MODIFFUS berechneten Werte für die bestockte Fläche von 5,7 kg N/ha (2010) bzw. 6,1 kg N/ha (2000) plausibel zu sein und werden für die weiteren Berechnungen verwendet.

Tab. 6: Literaturdaten zur gemessenen und berechneten N-Auswaschung unter Wald.

IAP: Median 40 Standorte CH 2005-2011	6,4 kg N/ha und Jahr
IAP: Mittelwert nur Alpennordseite CH 2005-2011	8,0 kg N/ha und Jahr
WSL: Mittelwert 9 Standorte CH 1997-2009	6,0 kg N/ha und Jahr
Kiese et al. (2011) Modellberechnungen Bayern	6,0 kg N/ha und Jahr
Kiese et al. (2011) Modellberechnungen Baden-Württemberg	6,5 kg N/ha und Jahr

Für die natürliche Hintergrundlast wurde in MODIFFUS eine N-Auswaschungsmenge von 10'500 t N berechnet, was bei einer natürlichen Waldfläche von rund 3'075'000 ha etwa 3,5 kg N/ha und Jahr entspricht (Hürdler et al. 2015). Nach den Abklärungen mit Experten und der Literatur ist dieser Wert eindeutig zu hoch (s. Kap. 3.5). Wird, wie in Kap. 3.5 vorgeschlagen, ein flächenspezifischer Wert von 1,5 kg N/ha und Jahr eingesetzt, errechnet sich eine N-Fracht von rund 4'500 t N als natürliche Hintergrundlast für die N-Auswaschung unter natürlichem Wald.

3.8 Der Anteil an landwirtschaftsbedingten N-Verbindungen an der N-Auswaschung im Wald

Nach Berechnungen von Achermann et al. (2016) betrug der Anteil der N-Deposition, der aus NH₃-Emissionen stammt, im Jahr 2010 rund 67%. Der von Achermann et al. (2016) daraus berechnete Anteil der N-Auswaschung unter Wald, der reduzierten N-Verbindungen zugeordnet werden kann, beträgt 71%. Für das Jahr 1985 berechneten Achermann et al. (2016) einen Anteil von 67% reduzierter N-Verbindungen an der N-Auswaschung unter Wald. Für die Berechnung des landwirtschaftsbedingten Anteils an der N-Auswaschung unter Wald in Kap. 5.2 wurden diese 71% für 2010 und 67% für 1985 verwendet.

4. Ziel 2: Klärung des Begriffes „landwirtschaftsbedingte Stickstoffeinträge“ in Gewässer

Nachfolgend werden verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt, was unter dem Begriff „landwirtschaftsbedingte N-Einträge“ verstanden werden könnte. Die Varianten werden kurz beschrieben. In Kap. 5 wird dann aufgezeigt, wie die entsprechende Fracht für die Schweiz für 1985 und 2010 berechnet worden ist und welche Variante empfohlen wird.

A. N-Einträge aus diffusen Quellen.

Umfasst alle diffusen Einträge (gemäss Definition in Hürdler et al. 2015) über alle Eintragspfade (Auswaschung, Abschwemmung, Erosion, Deposition etc.) und alle Eintragsquellen (Ackerland, Grasland, Wald, unproduktive Vegetation, Gewässer etc.) und umfasst die diffus anthropogene Belastung und die natürliche Hintergrundlast.

B. N-Einträge aus diffus anthropogenen Quellen nach Hürdler et al (2015).

Umfasst alle diffusen Einträge (gemäss Definition in Hürdler et al. 2015) über alle Eintragspfade (Auswaschung, Abschwemmung, Erosion, Deposition etc.) und alle Eintragsquellen (Ackerland, Grasland, Wald, unproduktive Vegetation, Gewässer etc.) abzüglich der natürlichen Hintergrundlast (gemäss Definition in Hürdler et al. 2015) für alle Flächen. Die gesamte natürliche Hintergrundlast (Auswaschung, Abschwemmung, Erosion, Deposition, Direkteinträge) beträgt nach Hürdler et al. (2015) rund 18'000 t N. Da sich die natürliche Hintergrundlast mit der Zeit nicht verändert, wurde dieser Wert für die Jahre 1985 und 2010 verwendet.

C. N-Einträge aus diffus anthropogenen Quellen (Neuberechnung).

Umfasst alle diffusen Einträge (gemäss Definition in Hürdler et al. 2015) über alle Eintragspfade (Auswaschung, Abschwemmung, Erosion, Deposition etc.) und alle Eintragsquellen (Ackerland, Grasland, Wald, unproduktive Vegetation, Gewässer etc.) abzüglich der natürlichen Hintergrundlast, welche neu berechnet wurde. Die gesamte natürliche Hintergrundlast wurde berechnet unter der Annahme, dass alle Flächen (ausser Gewässer und unproduktive Flächen) unterhalb der Waldgrenze Naturwald sind und dass es keine anthropogene Luftverschmutzung gibt. Sie beträgt gemäss Neuberechnung rund 9'000 t N (Kap. 5.2). Dieser Wert wird für die Jahre 1985 und 2010 verwendet.

D. N- Einträge von landwirtschaftlich genutzten Flächen ohne alpwirtschaftliche Nutzfläche.

Umfasst alle diffusen Einträge aus den in MODIFFUS verwendeten Kategorien der Arealstatistik „Ackerland, Dauergrünland, Heimweiden, Rebbau, Obstbau, Gartenbau“. Diese Fläche entspricht nicht der Landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) gemäss Definition nach Landwirtschaftlicher Begriffsverordnung (Art. 14) bzw. BFS. Sie ist mit 967'809 ha etwas kleiner als die LN gemäss BFS (1'051'747 ha), für die LN liegt aber kein digitaler Datensatz vor. Die Einträge aller Pfade (Auswaschung, Erosion, Abschwemmung etc.) inklusive natürlicher Hintergrundlast wurden berücksichtigt.

E. N-Einträge von landwirtschaftlich genutzten Flächen inklusive alpwirtschaftlicher Nutzfläche.

Umfasst alle diffusen Einträge aus den in MODIFFUS verwendeten Kategorien der Arealstatistik „Ackerland, Dauergrünland, Heimweiden, Rebbau, Obstbau, Gartenbau, alpwirtschaftliche Nutzfläche“. Diese Fläche entspricht nicht der LN gemäss Definition nach Landwirtschaftlicher Begriffsverordnung (Art. 14) bzw. BFS. Sie ist mit 1'481'669 ha deutlich grösser als die LN gemäss BFS (1'051'747 ha), da die Sömmerungsflächen enthalten sind. Die Einträge aller Pfade (Auswaschung, Erosion, Abschwemmung etc.) inklusive natürlicher Hintergrundlast werden berücksichtigt.

F. N-Einträge von landwirtschaftlich genutzten Flächen ohne alpwirtschaftliche Nutzfläche plus der Anteil an N-Einträgen aus anderen Flächen, der aus der NH₃-Deposition resultiert.

Wie Punkt D, aber zusätzlich kommen die N-Einträge von Wald, Gewässern, unproduktiver Vegetation, Fels und Gletschern sowie alpwirtschaftlicher Nutzfläche, die aus der NH₃-Deposition stammen, hinzu. Dazu wurden die flächenspezifischen N-Einträge über Auswaschung jeder Landnutzungskategorie abzüglich der neu berechneten natürlichen Hintergrundlast verwendet. Diese stellen die anthropogen bedingten Auswaschungsverluste dar. Nach Achermann et al. (2016) wurde angenommen, dass 71% (bzw. 67% für 1985) davon aus NH₃-Emissionen stammen, also landwirtschaftsbedingt sind, und 29% aus Verkehr, Industrie und Haushalten stammen.

G. N-Einträge von landwirtschaftlich genutzten Flächen mit alpwirtschaftliche Nutzfläche plus der Anteil an N-Einträgen aus anderen Flächen, der aus der NH₃-Deposition resultiert.

Wie Punkt E, aber zusätzlich kommen die N-Einträge von Wald, Gewässern, unproduktiver Vegetation und Fels und Gletschern, die aus der NH₃-Deposition stammen, hinzu. Dazu wurden die flächenspezifischen N-Einträge über Auswaschung jeder Landnutzungskategorie abzüglich der neu berechneten natürlichen Hintergrundlast verwendet. Diese stellen die anthropogen bedingten Auswaschungsverluste dar. Nach Achermann et al. (2016) wurde angenommen, dass 71% (bzw. 67% für 1985) davon aus NH₃-Emissionen stammen, also landwirtschaftsbedingt sind, und 29% aus Verkehr, Industrie und Haushalten stammen.

H. N-Einträge von landwirtschaftlich genutzten Flächen ohne alpwirtschaftliche Nutzfläche abzüglich natürlicher Hintergrundlast dieser Flächen plus der Anteil an N-Einträge aus anderen Flächen, der aus der NH₃-Deposition resultiert.

Wie Punkt F, aber die neu berechnete natürliche Hintergrundlast von den landwirtschaftlich genutzten Flächen „Ackerland, Dauergrünland, Heimweiden, Rebbau, Obstbau, Gartenbau“ wird abgezogen. Es wird davon ausgegangen, dass auch unter landwirtschaftlich genutzten Flächen nicht sämtliche N-Einträge landwirtschaftsbedingt sind, sondern dass es auch hier eine natürliche Hintergrundlast gibt. Diese natürliche Hintergrundlast wurde mit 1,5 kg N/ha und Jahr veranschlagt.

I. N-Einträge von landwirtschaftlich genutzten Flächen mit alpwirtschaftlicher Nutzfläche, abzüglich natürlicher Hintergrundlast dieser Flächen, plus der Anteil an N-Einträge aus anderen Flächen, der aus der NH₃-Deposition resultiert.

Wie Punkt G, aber die neu berechnete natürliche Hintergrundlast von den landwirtschaftlich genutzten Flächen „Ackerland, Dauergrünland, Heimweiden, Rebbau, Obstbau, Gartenbau, alpwirtschaftlicher Nutzfläche“ wird abgezogen. Es wird davon ausgegangen, dass auch unter landwirtschaftlich genutzten Flächen nicht sämtliche N-Einträge landwirtschaftsbedingt sind, sondern dass es auch hier eine natürliche Hintergrundlast gibt. Diese natürliche Hintergrundlast wurde mit 1,5 kg N/ha und Jahr veranschlagt.

5. Ziel 3: Berechnung des Ausgangswertes 1985 für diffuse N-Einträge und landwirtschaftsbedingte N-Einträge auf der Grundlage bestehender Daten

Zunächst werden verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt, wie die diffusen N-Einträge in die Gewässer für 1985 berechnet werden können (Kap. 5.1). Die diffusen N-Einträge bilden die Grundlage für die Berechnung der landwirtschaftsbedingten N-Einträge. Die Resultate werden verglichen und ein Vorgehen wird empfohlen. Basierend auf diesem Vorschlag werden die verschiedenen Varianten der landwirtschaftsbedingten N-Einträge gemäss Kap. 4 für 1985 und 2010 berechnet, diskutiert und verglichen (Kap. 5.2.). Ein Verfahren wird empfohlen.

5.1 Varianten der Berechnung der diffusen N-Einträge in die Gewässer der Schweiz

5.1.1 Berechnung nach Methode N-Haushalt Schweiz 1990 (BUWAL 1993a und b)

Der N-Haushalt Schweiz wurde erstmals für das Jahr 1990 gerechnet (BUWAL 1993a). Die diffusen N-Einträge in die Gewässer der Schweiz (Hydrosphäre) wurden dort auf der Grundlage der Abschätzungen von Braun et al. (1991) für das Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der Seen (REZGUS) gemacht. Die dort ermittelten flächenspezifischen N-Verluste wurden - mit gewissen Anpassungen - auf die Fläche der gesamten Schweiz des Jahres 1990 hochgerechnet (BUWAL 1993b). Die so ermittelte N-Fracht für 1990 beträgt **74'000 t N** (Tab. 7). Da die Berechnungen von Braun et al. (1991) auf Daten von 1986 beruhen, kann dieser Wert auch annäherungsweise für 1985 angenommen werden.

Tab. 7: Stickstoffeinträge in die Hydrosphäre gemäss N-Haushalt Schweiz (BUWAL 1993b, Anhang A).

Quelle/Pfad	N-Einträge (t N)
Abschwemmung LN	2'000
Auswaschung LN inkl. Sömmerung	37'000
Auswaschung Wald	12'000
Verluste Öd- und Unland	14'000
Übrige Verluste	1'000
Deposition auf Gewässer	4'000
N ₂ -Fixierung durch Algen	1'000
Auswaschung Siedlungsgrünflächen	3'000
Total	74'000

Tab. 8: Zusammenfassung der diffusen N-Einträge in die Hydrosphäre der Schweiz nach Quellen (BUWAL 1993a).

Quelle	N-Einträge (t N)
Landwirtschaftliche Nutzfläche	40'000
Wald	12'000
Öd- und Unland	14'000
Siedlungsgrünflächen	3'000
Deposition auf Gewässer	4'000

Gemäss Tab. 5.2 in BUWAL (1993a, S. 56) stammen 40'000 t N aus der landwirtschaftlich genutzten Fläche der Schweiz (Tab. 8).

Als Verursacher werden **45'000 t N der Landwirtschaft** zugeschrieben, 20'000 t N der natürlichen Hintergrundbelastung (BUWAL 1993, S. 56).

5.1.2 Berechnung nach Methode Prasuhn (2003) und Prasuhn & Sieber (2005)

Prasuhn (2003) hat - basierend auf den Resultaten von Prasuhn & Hurni (1999) - eine Neuberechnung der diffusen N- und P-Einträge für das Jahr 1985 für das REZGUS mit einem aktualisierten Modellansatz und aktualisierten Daten gegenüber Braun et al. (1991) durchgeführt. Diese Berechnungen basieren auf der Arealstatistik 1992/97, welche methodisch mit der Arealstatistik 2004/09 (die für die Berechnungen mit MODIFFUS 2010 verwendet wurde) vergleichbar ist (Tab. 9).

Vergleicht man die Daten der Arealstatistik 1979/85 mit 2004/09 zeigen sich deutliche Entwicklungen, die auch Auswirkungen auf die diffusen Stoffverluste haben. Die Flächenkategorie mit den höchsten diffusen N-Verlusten (Landwirtschaftsflächen) haben mit 85'000 ha am stärksten abgenommen. Die Siedlungsflächen, die überwiegend keine diffusen N-Verluste aufweisen, haben dagegen um 58'000 ha zugenommen. Auch die bestockte Fläche mit vergleichsweise geringen N-Verlusten hat mit rund 39'000 ha deutlich zugenommen.

Tab. 9: Arealstatistik 1979/85 und 2004/09 nach 17 Nutzungsarten (Quelle: BFS)

Nutzungsart	1979/85r	2004/09	Veränderung in 24 Jahren	
	ha	ha	ha	%
Gesamtfläche	4'129'039	4'129'039		
Siedlungsflächen	249'478	307'899	58'421	23.4
Industrie- und Gewerbeareal	18'129	23'975	5'846	32.2
Gebäudeareal	114'996	152'012	37'016	32.2
Verkehrsflächen	82'455	95'237	12'782	15.5
Besondere Siedlungsflächen	19'610	17'031	-2'579	-13.2
Erholungs- und Grünanlagen	14'288	19'644	5'356	37.5
Landwirtschaftsflächen	1'566'725	1'481'657	-85'068	-5.4
Obst-, Reb- und Gartenbauflächen	73'689	50'970	-22'719	-30.8
Ackerland	436'584	407'068	-29'516	-6.8
Naturwiesen, Heimweiden	513'085	509'766	-3'319	-0.6
Alpwirtschaftsflächen	543'367	513'853	-29'514	-5.4
Bestockte Flächen	1'254'512	1'293'045	38'533	3.1
Wald	1'095'582	1'134'467	38'885	3.5
Gebüschwald	58'329	66'899	8'570	14.7
Gehölze	100'601	91'679	-8'922	-8.9
Unproduktive Flächen	1'058'324	1'046'438	-11'886	-1.1
Stehende Gewässer	142'985	143'261	276	0.2
Fliessgewässer	33'226	34'175	949	2.9
Unproduktive Vegetation	293'733	288'310	-5'423	-1.8
Vegetationslose Flächen	434'908	466'417	31'509	7.2
Gletscher, Firn	153'472	114'275	-39'197	-25.5
1979/85r, = revidierte Daten				

Die für das REZGUS berechneten flächenspezifischen N-Verluste von Prasuhn (2003) wurden mit den Flächen der Gesamtschweiz gemäss Arealstatistik 1979/85 zu einer Gesamt-N-Fracht für das Jahr 1985 für die Schweiz verrechnet (Tab. 10). Daraus ergibt sich eine diffuse Fracht von rund **76'500 t N**.

Tab. 10: Hochrechnung der diffusen N-Einträge in die Gewässer des REZGUS auf die Fläche der Schweiz für das Jahr 1985.

	Fläche REZGUS (ha)	(t N)	(kg N/ha)	Fläche CH (ha)	(t N)
N-Abschwemmung Grasland	345'855	233	0.67	1'056'452	710
N-Abschwemmung Ackerland	137'356	53	0.39	436'584	169
N-Erosion Ackerland	137'356	90	0.65	436'584	285
N-Erosion natürlich	942'648	272	0.29	4'129'039	1'191
N-Auswaschung/Drainage Grasland	345'855	4'995	14.44	1'056'452	15'257
N-Auswaschung/Drainage Ackerland	137'356	8'267	60.18	436'584	26'275
N-Auswaschung Wald	338'776	3'107	9.17	1'254'512	11'504
N-Abschwemmung und Auswaschung Siedlungsflächen	48'861	1'583	32.39	120'000	3'887
N-Abschwemmung und Auswaschung unproduktive Veg., vegetationslos	8'978	127	14.15	882'113	12'478
N-Deposition Gewässer	8'663	163	18.85	176'211	3'321
N-Einträge sonstige	942'648	331	0.35	4'129'039	1'450
Gesamt	942'648	19'219	20.39	4'129'039	76'527

5.1.3 Berechnung nach Methode Prasuhn (2003) und Prasuhn & Sieber (2005) mit teilweise angepassten Daten

Die Verteilung der Landnutzungsarten im REZGUS ist für die Schweiz nicht repräsentativ. Das Mittelland ist über-, die Alpen dagegen sind unterrepräsentiert. Entsprechend können die flächenspezifischen N-Verluste im REZGUS nicht ohne weiteres auf die Gesamtfläche der Schweiz hochgerechnet werden. Die Graslandfläche des REZGUS besteht nur zu rund 15% aus alpwirtschaftlich genutzten Flächen, die der Schweiz aber zu rund 50%. Auf alpwirtschaftlichen Flächen sind die N-Verluste aber geringer als unter Dauergrünland und Heimweiden. Entsprechend wurden die N-Verluste unter Grasland aufgeteilt und angepasst. Vergletscherte Flächen und Flächen mit Fels haben im REZGUS keine Bedeutung, in der Schweiz haben sie dagegen einen grossen Flächenanteil und bestimmen die N-Verluste aus unproduktiven Flächen und der natürlichen Erosion (Tab. 11). Auch bei dieser Landnutzungskategorie wurden die Verluste entsprechend aufgeteilt und angepasst. Die aufgrund dieser Anpassungen ermittelte diffuse Fracht für die Schweiz beträgt rund **68'500 t N** für das Jahr 1985.

Die N-Auswaschung unter Wald für das Jahr 1985 beträgt nach den hier vorgenommenen Berechnungen 11'500 t N (bei Braun et al. 1991 = 12'000 t N) und fällt damit etwas geringer aus, als Achermann et al. (2016) für 1985 berechnet haben (13'600 t N) (s. Kap. 3.6).

Tab. 11: Hochrechnung der diffusen N-Einträge in die Gewässer des REZGUS auf die Fläche der Schweiz für das Jahr 1985 mit angepassten flächenspezifischen N-Verlusten (in rot).

	Fläche REZGUS (ha)	(t N)	(kg N/ha)	Fläche CH (ha)	(t N)
N-Abschwemmung Grasland	345'855	233	1.0	513'085	513
N-Abschwemmung alpwirt. Nutzfläche			0.5	543'367	272
N-Abschwemmung Ackerland	137'356	53	0.4	436'584	169
N-Erosion Ackerland	137'356	90	0.7	436'584	285
N-Erosion natürlich	942'648	272	0.6	4'129'039	2431
N-Auswaschung/Drainage Grasland	345'855	4'995	16.0	513'085	8'209
N-Auswaschung alpwirt. Nutzfläche			8.0	543'367	4'347
N-Auswaschung/Drainage Ackerland	137'356	8'267	60.2	436'584	26'275
N-Auswaschung Wald	338'776	3'107	9.2	1'254'512	11'504
N-Abschwemmung und Auswaschung Siedlungsflächen	48'861	1'583	32.4	120'000	3'887
N-Abschwemmung und Auswaschung unproduktive Veg.	8'978	127	6.5	293'733	1'909
N-Abschwemmung Fels, Gletscher			6.5	588'380	3'824
N-Deposition Gewässer	8'663	163	18.8	176'211	3'321
N-Einträge sonstige	942'648	331	0.4	4'129'039	1'450
	942'648	19'219	20.4	4'129'039	68'397

5.1.4 Berechnung der Gesamt-N-Fracht über Pegelmessdaten

Abbildung 10 zeigt die Entwicklung der N-Fracht im Rhein am Pegel „Weil am Rhein“ gemäss NADUF-Daten des BAFU. Einerseits ist ein deutlich abnehmender Trend erkennbar, andererseits zeigen sich grosse jährliche Schwankungen. Diese Schwankungen sind vor allem auf unterschiedliche Abflussmengen zurückzuführen (die deutlich höheren N-Frachten der Jahre 1986, 1987 und 1988 beruhen z. B. auf sehr hohen Abflussmengen). Daher können nur Mittelwerte über mehrere Jahre sinnvoll miteinander verglichen werden. Demnach betrug die am Pegel „Weil am Rhein“ gemessene N-Fracht um 1985 rund 70'000 t N und um 2010 rund 50'000 t N. Es kann also ein Rückgang um rund 20'000 t N bzw. 30% verzeichnet werden.

Die Frachten an der Pegelmessstelle umfassen allerdings sowohl die Einträge aus punktuellen wie auch die aus diffusen Quellen. Weiterhin stammt ein Teil der gemessenen Fracht aus ausländischen Zuflüssen zum Rhein (Deutschland, Österreich, Liechtenstein). Der N-Austrag aus einem Einzugsgebiet an der Pegelmessstelle (= Immissionsbetrachtung) ist auch nicht mit dem N-Eintrag in die Zuflüsse (= Emissionsbetrachtung) zu vergleichen. Stoffrückhalt und -umwandlung auf der Fliessstrecke bis zum Pegel (z. B. in Seen) reduzieren die gemessene N-Fracht.

Tabelle 12 zeigt die berechneten N-Einträge in den Rhein für das REZGUS (diffus und punktuell) und eine grobe Abschätzung der Anteile aus dem Ausland und aus den grossen Seen (bzw. dem Einzugsgebiet oberhalb der grossen Seen) im Vergleich mit den NADUF-Werten am Pegel. Die Werte stimmen gut überein, der berechnete Rückgang der N-Fracht von 1985 bis 2010 fällt mit rund 24'000 t N bzw. 33% etwas höher aus als die entsprechenden Werte der gemessenen N-Frachten am Pegel.

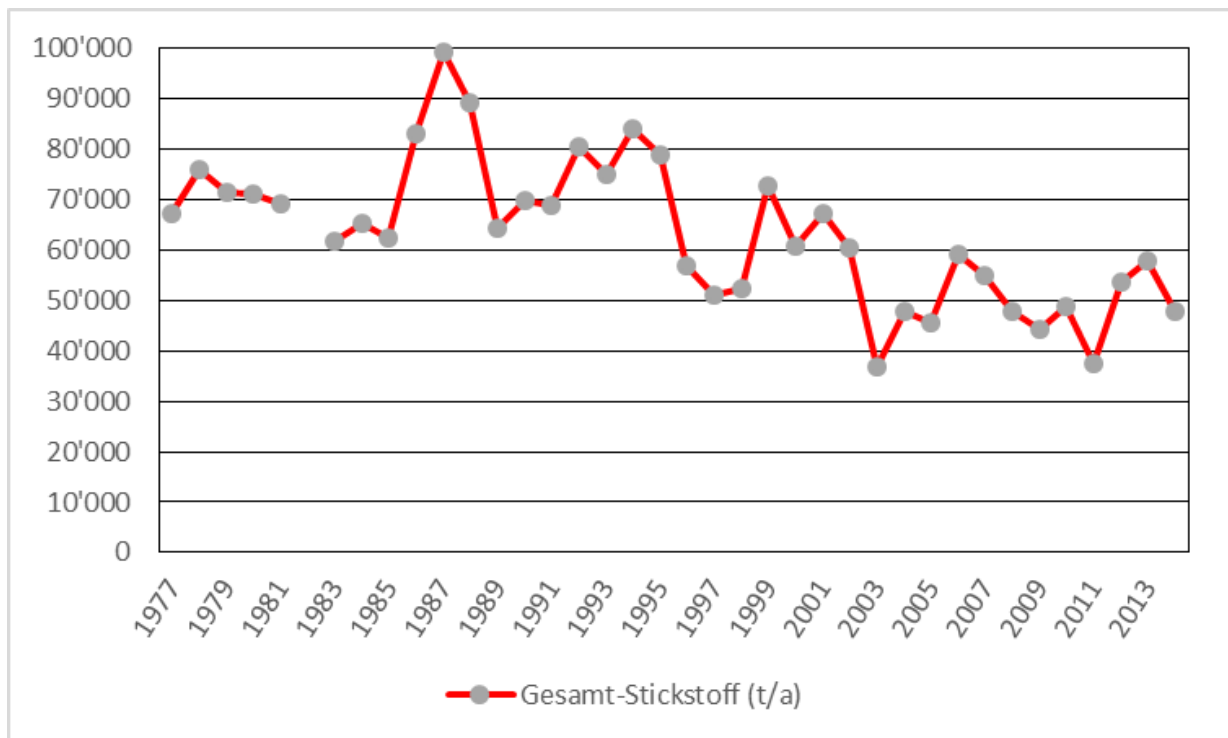


Abb. 10: Entwicklung der Gesamt-Stickstofffracht am Pegel Weil am Rhein von 1977 bis 2014 (Datenquelle: BAFU).

Tab. 12: Vergleich gemessener und berechneter N-Frachten im Rhein (1985 nach Prasuhn & Sieber (2005) und 2010 nach Hürdler et al. (2015)).

	1985	2010	Differenz	Abweichung
	(t N)	(t N)	(t N)	(%)
Diffus N REZGUS (MODIFFUS)	19'219	17'193	-2'026	-11
Punktquellen N REZGUS (BAFU)	20'530	10'624	-9'906	-48
Austrag grosse Seen & deutscher Teil REZGUS	34'500	22'257	-12'243	-35
Total	74'249	50'073	-24'176	-33
Messwert NADUF Weil am Rhein	70'182	49'994	-20'188	-29

Betrachtet man nur das REZGUS, betrugen die N-Einträge aus punktuellen Quellen 1985 etwas über 20'000 t N und die diffusen N-Einträge etwas weniger als 20'000 t N – also fast gleich viel. Die N-Einträge aus punktuellen Quellen haben bis 2010 um fast 50% abgenommen, die diffusen N-Einträge nur etwa um 11%. Dadurch hat sich das Verhältnis von punktuellen zu diffusen Quellen zu Ungunsten der diffusen Quellen verschlechtert (38% zu 62%).

Da sich bei Messungen der N-Fracht in Fließgewässern - wie am Beispiel des Rheins oben dargelegt - nur die Gesamt-N-Fracht bestimmen lässt (punktuell und diffus) und die diffusen und vor allem die landwirtschaftsbedingten N-Einträge nicht separiert werden können, wurde auf eine weitere Betrachtung dieses Ansatzes für die anderen grossen Flusseinzugsgebiete der Schweiz (Rhône, Inn, Ticino) verzichtet.

Für die Betrachtung des allgemeinen Umweltziels - Reduktion der N-Einträge in die Gewässer um 50% - eignet sich der Ansatz dagegen. Im Rheineinzugsgebiet konnte dieses Ziel mit einer Reduktion von rund 30% nicht erreicht werden.

Fazit Kapitel 5.1:

Der Ansatz 5.1.3 (Berechnung nach Methode Prasuhn (2003) und Prasuhn & Sieber (2005) mit teilweise angepassten Daten) wird empfohlen, um die N-Ausgangsracht für 1985 zu bestimmen. **Die gesamte diffuse N-Fracht beträgt demnach 68'500 t N für das Jahr 1985** und die entsprechende N-Fracht für das Jahr 2010 51'500 t N. Sie hat sich somit um 17'000 t N bzw. 25% vermindert. Die Daten aus Tab. 11 werden für die weiteren Berechnungen der landwirtschaftsbedingten N-Einträge verwendet (Kap. 5.2).

5.2 Berechnung der landwirtschaftsbedingten N-Einträge in die Gewässer der Schweiz

Berechnungsgrundlage für 2010 ist überwiegend die schweizweite Berechnung mit MODIFFUS (Hürdler et al. 2015), nur für die Berechnung der natürlichen Hintergrundlast wurden zusätzlich neue Berechnungen gemäss Erkenntnissen aus Kap. 3.5 durchgeführt. Berechnungsgrundlage für 1985 sind die Werte von Prasuhn (2003) für das REZGUS, die für 1985 schweizweit angepasst wurden (siehe Kap. 5.1.3). Weiterhin wird die Veränderung zwischen 1985 und 2010 dargestellt. Abschliessend erfolgt eine kurze Beurteilung der verschiedenen Ansätze. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse aller Varianten findet sich in Tab. 14. Alle Werte wurden auf 500 t N gerundet.

Natürliche Hintergrundlast:

Als natürliche Hintergrundlast wird die N-Fracht bezeichnet, die ohne Einfluss des Menschen unter natürlicher Vegetation und ohne anthropogene Luftverschmutzung existieren würde (s. Kap. 3.5). Als Eintragspfade von diesen Flächen gibt es neben der Auswaschung (s. Kap. 3.5) noch Abschwemmung, Erosion, Deposition auf Gewässer und Laub- und Streueintrag. Mit MODIFFUS wurden die Wasser- und Stoffflüsse für die natürliche Hintergrundlast berechnet (Hürdler et al. 2015). Die entsprechende N-Fracht beträgt rund 18'000 t N (Tab. 13). Gemäss den Abklärungen aus Kap. 3.5 wurde dabei vor allem die natürliche Hintergrundlast durch Auswaschung unter Wald überschätzt und daher neu berechnet. Entsprechend werden nachfolgend zwei weitere Varianten mit einer neu berechneten natürlichen Hintergrundlast vorgestellt. Werden – wie in Kap. 3.5 empfohlen – 1,5 kg N/ha und Jahr als natürliche Hintergrundlast bei Auswaschung und Abschwemmung eingesetzt, ergibt sich eine totale natürliche Hintergrundlast von rund 9'000 t N. Werden – wie von Achermann et al. (2016) empfohlen – 0,3 kg N/ha und Jahr verwendet, beträgt die totale natürliche Hintergrundlast rund 4'000 t N (Tab. 13).

Tab. 13: N-Einträge durch natürliche Hintergrundlast nach verschiedenen Berechnungsansätzen.

	MODIFFUS alt	neu (1,5 kg/ha)	neu (0,3 kg/ha)
	(t N)	(t N)	(t N)
Auswaschung Wald	10501	4613	923
Auswaschung unproduktive Vegetation		447	89
Deposition Gewässer	1397	263	53
Abschwemmung Fels etc.	3851	698	140
Abschwemmung Gletscher		171	34
Abschwemmung Wald/unprod. Veg.		218	218
natürliche Erosion	2060	2060	2060
Direkteinträge Laub, Streu	360	360	360
Summe	18169	8831	3877

A. N-Einträge aus diffusen Quellen

Wert für 1985 = 68'500 t N (neu berechnet nach Kap. 5.1.3, Tab.11)

Wert für 2010 = 51'500 t N (Hürdler et al. 2015).

Veränderung: -25%

Beurteilung: ungeeignet

Es werden alle diffusen Einträge erfasst und nicht nur die landwirtschaftsbedingten Einträge. Die N-Frachten sind daher deutlich zu hoch, da alle Einträge aus Wald, unproduktiven Flächen etc. vollständig, d.h. inklusive der natürlichen Hintergrundlast, enthalten sind.

B. N-Einträge aus diffus anthropogenen Quellen nach Hürdler et al. (2015)

Diffuse Quellen minus natürliche Hintergrundlast (nach Hürdler et al. 2015; siehe auch Tab. 13).

Wert für 1985 = 68'500 t N minus 18'000 = 50'500 t N

Wert für 2010 = 51'500 minus 18'000 = 33'500 t N

Veränderung: -34%

Beurteilung: ungeeignet

Der Wert ist einerseits zu hoch, da alle anthropogen bedingten Einträge auch aus nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen enthalten sind; also auch Einträge, die aus der Luftverschmutzung durch Haushalte, Industrie und Verkehr resultieren. Andererseits ist der Wert zu niedrig, da die natürliche Hintergrundlast in Hürdler et al. (2015) zu hoch veranschlagt wurde (siehe Kap. 3.5).

C. N-Einträge aus diffus anthropogenen Quellen (Neuberechnung)

Diffuse Quellen minus natürliche Hintergrundlast (Neuberechnung, Tab. 13).

Wert für 1985 = 68'500 minus 9'000 = 59'500 t N

Wert für 2010 = 51'500 minus 9'000 = 42'500 t N

Veränderung: -28%

Beurteilung: bedingt geeignet

Der Wert ist zu hoch, da alle anthropogen bedingten Einträge enthalten sind; also auch Einträge, die aus der Luftverschmutzung durch Haushalte, Industrie und Verkehr resultieren.

D. N- Einträge von landwirtschaftlich genutzten Flächen ohne alpwirtschaftliche Nutzfläche

Diffuse Einträge von Ackerland, Dauergrünland, Heimweiden, Reb-, Obst- und Gartenbau.

Wert für 1985 = 35'500 t N (Tab.11, nur Einträge aus oben aufgeführten Landnutzungen)

Wert für 2010 = 28'000 t N (Hürdler et al. 2015)

Veränderung: -20%

Beurteilung: ungeeignet

Der Wert ist deutlich zu niedrig, da die alpwirtschaftliche Nutzfläche ausgeklammert wurde. Weiterhin wurden die N-Verluste aus nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen, die aus NH₃-Emissionen der Landwirtschaft stammen, nicht berücksichtigt.

E. N-Einträge von landwirtschaftlich genutzten Flächen inklusive alpwirtschaftlicher Nutzfläche

Diffuse Einträge von Ackerland, Dauergrünland, Heimweiden, alpwirtschaftlicher Nutzfläche, Reb-, Obst- und Gartenbau.

Wert für 1985 = 40'000 t N (Wert aus D plus Einträge aus alpw. Nutzfläche nach Tab. 11)

Wert für 2010 = 32'000 t N (Hürdler et al. 2015)

Veränderung: -20%

Beurteilung: ungeeignet

Der Wert ist zu niedrig, da die N-Verluste aus nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen, die aus NH₃-Emissionen der Landwirtschaft stammen, nicht berücksichtigt wurden.

F. N-Einträge von landwirtschaftlich genutzten Flächen ohne alpwirtschaftliche Nutzfläche plus der Anteil an N-Einträgen aus anderen Flächen, der aus der NH₃-Deposition resultiert

Diffuse Einträge von Ackerland, Dauergrünland, Heimweiden, Reb-, Obst- und Gartenbau (Werte siehe Punkt D) plus Verluste durch NH₃-Deposition auf andere Flächen (Frachten Auswaschung andere Flächen nach Tab. 11 minus natürliche Hintergrundlast dieser Flächen (1,5 kg N/ha nach Tab. 13, davon 71% bzw. 67% landwirtschaftsbedingt; Siehe Kapitel 4 (F).

Wert für 1985 = 35'500 t N plus 14'000 t N = 49'500 t N

Wert für 2010 = 28'000 t N plus 9'000 t N = 37'000 t N

Veränderung: -25%

Beurteilung: bedingt geeignet

Der Wert ist einerseits etwas zu niedrig, da die N-Verluste aus der alpwirtschaftlichen Nutzfläche nur teilweise erfasst werden, andererseits ist der Wert etwas zu hoch, da sämtliche Verluste von landwirtschaftlich genutzten Flächen der Landwirtschaft zugeschrieben werden.

G. N-Einträge von landwirtschaftlich genutzten Flächen inklusive alpwirtschaftliche Nutzfläche plus der Anteil an N-Einträgen aus anderen Flächen, der aus der NH₃-Deposition resultiert

Diffuse Einträge von Ackerland, Dauergrünland, Heimweiden, alpwirtschaftlicher Nutzfläche, Reb-, Obst- und Gartenbau (Werte siehe Punkt E) plus Verluste durch NH₃-Deposition auf andere Flächen (Frachten Auswaschung andere Flächen nach Tab. 11 minus natürliche Hintergrundlast dieser Flächen (1,5 kg N/ha nach Tab. 13, davon 71% bzw. 67%; Siehe Kapitel 4 (G).

Wert für 1985 = 40'000 t N plus 11'500 t N = 51'500 t N

Wert für 2010 = 32'000 t N plus 6'500 t N = 39'000 t N

Veränderung: -25%

Beurteilung: bedingt geeignet

Der Wert ist etwas zu hoch, da sämtliche Verluste von landwirtschaftlich genutzten Flächen der Landwirtschaft zugeschrieben werden, also auch die natürliche Hintergrundlast.

H. N-Einträge von landwirtschaftlich genutzten Flächen ohne alpwirtschaftliche Nutzfläche abzüglich natürlicher Hintergrundlast dieser Flächen plus der Anteil an N-Einträgen aus anderen Flächen, der aus der NH₃-Deposition resultiert

Diffuse Einträge von Ackerland, Dauergrünland, Heimweiden, Reb-, Obst- und Gartenbau (Werte siehe Punkt D) minus natürliche Hintergrundlast dieser Flächen (967'809 ha * 1,5 kg N/ha) plus Verluste durch NH₃-Deposition auf andere Flächen (Berechnung siehe Punkt F).

Wert für 1985 = 35'000 t N minus 1'500 t N plus 14'000 t N = 48'000 t N

Wert für 2010 = 28'000 t N minus 1'500 t N plus 9'000 t N = 35'500 t N

Veränderung: -26%

Beurteilung: bedingt geeignet

Der Wert ist etwas zu niedrig, da die N-Verluste aus der alpwirtschaftlichen Nutzfläche nur teilweise (über die NH₃-Deposition) erfasst werden.

I. N-Einträge von landwirtschaftlich genutzten Flächen inklusive alpwirtschaftlicher Nutzfläche, abzüglich natürlicher Hintergrundlast dieser Flächen, plus der Anteil an N-Einträgen aus anderen Flächen, der aus der NH₃-Deposition resultiert

Diffuse Einträge von Ackerland, Dauergrünland, Heimweiden, alpwirtschaftlicher Nutzfläche, Reb-, Obst- und Gartenbau (Werte siehe Punkt E) minus natürliche Hintergrundlast dieser Flächen (1'566'725 ha bzw. 1'481'669 ha * 1,5 kg N/ha) plus Verluste durch NH₃-Deposition auf andere Flächen (Berechnung siehe Punkt G).

Wert für 1985 = 40'000 t N minus 2'500 t N plus 11'500 t N = 49'000 t N

Wert für 2010 = 32'000 t N minus 2'000 t N plus 6'500 t N = 36'500 t N

Veränderung: -26%

Beurteilung: geeignet

Diese Variante charakterisiert die landwirtschaftsbedingten Einträge am besten. Sie umfasst alle landwirtschaftlich genutzten Flächen. Weiterhin werden die Verluste aus nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen, die aber ihre Ursache in der Landwirtschaft haben (NH₃-Emissionen), berücksichtigt. Andererseits wird die natürliche Hintergrundlast auf landwirtschaftlich genutzten Flächen nicht der Landwirtschaft zugeschrieben, sondern in Abzug gebracht.

Ib. N-Einträge von landwirtschaftlich genutzten Flächen inklusive alpwirtschaftlicher Nutzfläche, abzüglich natürlicher Hintergrundlast dieser Flächen mit einem Wert von 0,3 kg N/ha nach Achermann et al. (2016), plus der Anteil an N-Einträgen aus anderen Flächen, der aus der NH₃-Deposition resultiert

Wie Punkt I, aber mit einer natürlichen Hintergrundlast von 0,3 kg N/ha nach Tab. 13 gerechnet.

Wert für 1985 = 40'000 t N minus 450 t N plus 13'500 t N = 53'000 t N

Wert für 2010 = 32'000 t N minus 450 t N plus 9'000 t N = 40'500 t N

Veränderung: -24%

Beurteilung: geeignet

Diese Variante unterscheidet sich von Punkt I nur in der Höhe der veranschlagten natürlichen Hintergrundlast. Die absoluten N-Frachten sind dadurch höher, die prozentuale Verminderung von 2010 zu 1985 ist aber etwas geringer.

Tab. 14: Zusammenstellung der Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsvarianten für die landwirtschaftsbedingte N-Einträge in die Gewässer der Schweiz (NHGL = natürliche Hintergrundlast). Variante I wird empfohlen. Alle Werte sind auf 500 t N gerundet, alle Berechnungen wurden aber mit ungerundeten Zahlen durchgeführt.

		1985	2010	Abweichung	Veränderung
		(t N)	(t N)	(t N)	(%)
A	Diffus MODIFFUS	68'500	51'500	17'000	-25
B	Diffus minus NHGL MODIFFUS	50'500	33'500	17'000	-34
C	Diffus minus NHGL neu	59'500	42'500	17'000	-28
D	Diffus LN ohne Alpw.	35'500	28'000	7'000	-20
E	Diffus LN inkl. Alpw.	40'000	32'000	8'000	-20
F	Diffus LN ohne Alpw. + Depos. Landw. andere Flächen	49'500	37'000	12'500	-25
G	Diffus LN inkl. Alpw. + Depos. Landw. andere Flächen	51'500	39'000	12'500	-25
H	Diffus LN ohne Alpw. + Depos. Landw. andere Flächen minus NHGL	48'000	35'500	12'500	-26
I	Diffus LN inkl. Alpw. + Depos. Landw. andere Flächen minus NHGL LN (1,5 kg/ha)	49'000	36'500	12'500	-26
Ib	Diffus LN inkl. Alpw. + Depos. Landw. andere Flächen minus NHGL LN (0,3 kg/ha)	53'000	40'500	12'500	-24

6. Diskussion

Die gesamten diffusen N-Einträge haben um 25% abgenommen, die landwirtschaftsbedingten N-Einträge mit 26% nur leicht stärker (Tab. 14). Dieser geringe Unterschied resultiert aus der Abnahme der landwirtschaftlich genutzten Fläche. Der Anteil der landwirtschaftsbedingten N-Einträge an den gesamten diffusen N-Einträgen betrug 1985 72% und 2010 71% und hat sich somit nur geringfügig verändert. Die Ursache dafür ist in der Abnahme der landwirtschaftlich genutzten Fläche von rund 85'000 ha zu sehen. Der flächenspezifische N-Eintrag (landwirtschaftsbedingte N-Einträge bezogen auf die landwirtschaftlich genutzte Fläche) hat sich mit 31,3 kg N/ha im Jahr 1985 um 21% gegenüber 2010 reduziert (26,6 kg N/ha) und damit weniger als die absoluten Werte (26% Reduktion). Der grösste Teil der 2010 nicht mehr landwirtschaftlich genutzten Fläche wurde in Siedlungsflächen umgewandelt und trägt somit nicht mehr zu den landwirtschaftsbedingten N-Einträgen bei. Mehr als 2'000 t N wurden wegen der kleineren landwirtschaftlich genutzten Fläche 2010 weniger in die Gewässer eingetragen. Rund 5% von den 26% Reduktion der landwirtschaftsbedingten N-Einträge gegenüber 1985 beruht also nicht auf Massnahmen innerhalb der landwirtschaftlichen Nutzung, sondern auf Flächenumwandlungen in andere Nutzungen.

Die nach den verschiedenen Definitionen berechneten landwirtschaftsbedingten N-Einträge in die Gewässer der Schweiz unterscheiden sich in ihren absoluten Werten je nach Verfahren erheblich (35'500 t N bis 68'500 t N für 1985). Bei Betrachtung der Veränderung dieser N-Einträge zwischen 1985 und 2010 sind die Unterschiede allerdings nicht mehr so gross. Im schlechtesten Fall (Variante E) beträgt die Reduktion 20%, im besten Fall (Variante B) 34%. Bei der empfohlenen Variante I liegt die Reduktion mit 26% in der Mitte der Werte. Mit allen Berechnungsvarianten wird das Ziel einer 50-prozentigen Reduzierung aber klar verfehlt. Wenn man den von Achermann et al. (2016) vorgeschlagenen Wert der natürlichen Hintergrundlast für Auswaschung und Abschwemmung mit 0,3 kg N/ha für 1985 und 2010 rechnet, ergibt sich für die Variante Ib zwar ein höherer absoluter Wert für 1985 und 2010, die relative Abnahme ist aber mit 24% noch geringer (Tab. 14). Die Höhe der natürlichen Hintergrundlast bzw. die Art der Berechnung der natürlichen Hintergrundlast spielt für die Höhe der prozentualen Abnahme der landwirtschaftsbedingten N-Einträge zwischen 1985 und 2010 nur eine untergeordnete Rolle, da sich die natürliche Hintergrundlast nicht verändert und für 1985 und 2010 der gleiche Wert verwendet wurde.

Die 1985 aus NH₃-Emissionen resultierenden 11'500 t N Auswaschungs- und Abschwemmungsverluste aus nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen haben sich bis 2010 um 5'000 t N auf 6'500 t N reduziert (= 42% Reduktion). Achermann et al. (2016) kommen bei der gesamten Auswaschung unter Wald auf eine Reduktion von ebenfalls 42% für den gleichen Zeitraum. Die N-Einträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen haben sich gemäss Berechnungen nach Variante I im gleichen Zeitraum mit knapp 8'000 t N nur um 20% reduziert. Die Reduktion der NH₃-Emissionen in die Luft von 18% hat also zu einem wesentlichen Teil zur Verringerung der landwirtschaftsbedingten N-Einträge in die Gewässer beigetragen.

Die mit Variante I berechneten landwirtschaftsbedingten N-Einträge in die Gewässer der Schweiz belaufen sich für 1985 auf 49'000 t N. In BUWAL (1993) wurde für 1985 mit 45'000 t N ein leicht niedrigerer Wert der Landwirtschaft zugeschrieben, in BUWAL & BLW (1996) für 1994 mit 37'000 t N ein deutlich geringerer Wert. In BUWAL & BLW (1996, S.37) wurde als ökologische Zielsetzung eine Fracht von 15'000 – 20'000 t N gewünscht. Die Ziellücke im Jahr 1994 wurde entsprechend mit 14'000 – 19'000 t N angegeben. Die im vorliegenden Bericht ermittelte Reduktion von 12'500 t N zwischen 1985 und 2010 ist deutlich geringer. Nach Modellrechnungen von Prasuhn et al. (2016) ist bis 2020 mit einer weiteren Reduktion der N-Einträge von rund 1'500 t zu rechnen. Somit dürfte das oben angestrebte Ziel bis 2015 mit Sicherheit nicht erreicht werden. Auch das in BUWAL (1993, S. 46) berechnete Verminderungspotential für N-Verluste aus der Landwirtschaft von 15'000 t N für den Zeitraum

von 1985 bis 2010 konnte nicht erreicht werden. Ein weiterer Rückgang der Nitratverluste zeichnet sich gemäss BAFU (2014, S. 26) zurzeit nicht ab.

Für die Beurteilung der Zielerreichung des allgemeinen Umweltziels - Reduktion der gesamten N-Einträge in die Gewässer um 50% - konnten die Frachtmessungen über Pegeldaten im Rhein sowie die Modellberechnungen mit MODIFFUS für das Rheineinzugsgebiet herangezogen werden (Kap. 5.1.4). Danach konnte auch dieses Ziel mit einer Reduktion von rund 33% nicht erreicht werden.

7. Literatur

- Aber, J.D. (1989): Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience* 39, 378–86.
- Achermann, B., Meier, R., Rihm, B. (2016): Durch atmosphärische Stickstoff-Deposition induzierte Stickstoff-Auswaschung aus Waldökosystemen in der Schweiz. Unveröffentlichter Bericht, Bern, 9 S.
- BAFU (2012a): Switzerland's Informative Inventory Report 2012 (IIR): Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Submission of March 2012 to the United Nations ECE Secretariat. Federal Office for the Environment FOEN
- BAFU (2012b): Switzerland's greenhouse gas inventory 1990-2010: National Inventory Report 2012, Including reporting elements under the Kyoto Protocol, Submission of 13 April 2012 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. Federal Office for the Environment FOEN
- BAFU (2014): Grundlagenpapier zur Stickstoffproblematik. Luft, Boden, Wasser, Biodiversität und Klima. Bundesamt für Umwelt, Bern, 31 S.
- BAFU & BLW (2008): Umweltziele Landwirtschaft. Hergeleitet aus bestehenden rechtlichen Grundlagen. Umwelt-Wissen Nr. 0820. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt BAFU und vom Bundesamt für Landwirtschaft BLW.
- BFS: Arealstatistik. Bundesamt für Statistik, Neuenburg.
- Bobbink, R. & Hettelingh, J.-P. (ed.) (2011): Review and revision of empirical critical loads and dose–response relationships, Proceedings of an expert workshop, Noordwijkerhout, 23-25 June 2010. UNECE Coordination Centre for Effects (CCE), National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, The Netherlands.
- Bobbink, R., Ashmore, M., Braun, S., Flückiger, W., Van Den Wyngaert, I.J.J. (2003): Empirical nitrogen critical loads for natural and semi-natural ecosystems: 2002 update. *Environmental Documentation No. 164 Air*, pp. 43-170. Swiss Agency for Environment, Forest and Landscape SAEFL, Berne.
- Borken, W. & Matzner, E. (2004): Nitrate leaching in forest soils: an analysis of long-term monitoring sites in Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167, 277–283.
- 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. (2013): Untersuchungen über die Zusammensetzung der Bodenlösung. Bericht 2012. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP), Schönenbuch.
- Braun, S., Flückiger, W. (2013): Wie geht es unserem Wald? 29 Jahre Walddauerbeobachtung. Interkantonales Walddauerbeobachtungsprogramm der Kantone AG, BE, BL, BS, FR, SO, TG, ZG, ZH und des BAFU. Ergebnisse von 1984 bis 2012 Bericht 4, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP) Schönenbuch.
- Braun, S., Rihm, B., Flückiger, W. (2012): Stickstoffeinträge in den Schweizer Wald: Ausmass und Auswirkungen. *Schweiz. Z. Forstwes.* 163/9, 355-362.
- Bühlmann, T. (2014): Durch Stickstoffdeposition induzierte Emissionen von Stickoxiden und Lachgas aus (semi-)natürlichen Ökosystemen. Analyse der schweizerischen Situation mit Vorschlägen zur Umsetzung im Schweizerischen Emissionsinventar (EMIS). Bericht im Auftrag des BAFU, 40 S.
- Bühlmann, T., Hiltbrunner, E., Körner, C., Rihm, B., Achermann, B. (2015): Induction of indirect N₂O and NO emissions by atmospheric nitrogen deposition in (semi-)natural ecosystems in Switzerland. *Atmospheric Environment* 103, 94-101.

- BUWAL (1993a): Der Stickstoffhaushalt der Schweiz. Schriftenreihe Umwelt 209, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 74 S.
- BUWAL (1993b): Der Stickstoffhaushalt der Schweiz. Anhänge.
- BUWAL & BLW (1996): Strategie zur Reduktion von Stickstoffemissionen. Bericht der Projektgruppe Stickstoffhaushalt Schweiz. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Landwirtschaft (BLW). BUWAL, Schriftenreihe Umwelt Nr. 273, Bern, 142 S.
- De Vries, W., van der Salm, C., Reinds, G.J., Erisman, J.W. (2007): Element fluxes through European forest ecosystems and their relationships with stand and site characteristics. *Environ. Pollut.* 148, 501–513.
- De Vries, W., H. Kros, G. J. Reinds, W. Wamelink, J. t Mol, H. van Dobben, R. Bobbink, B. Emmett, S. Smart, C. Evans, A. Schlutow, P. Kraft, S. Belyazid, H. Sverdrup, A. van Hinsberg, M. Posch, J.-P. Hettelingh, (2007): Developments in deriving critical limits and modeling critical loads of nitrogen for terrestrial ecosystems in Europe. Alterra, Alterra-rapport 1382, 206 pp.
- Dise, N.B., Rothwell, J.J., Gauci, V., van der Salm, C., de Vries, W. (2009): Predicting dissolved inorganic nitrogen leaching in European forests using two independent databases. *Sci. Total Environ.* 407, 1798–1808.
- Durner, W., Hopp, L., Buczko, U., Peiffer, S. (2004): Durchführung von Säulenversuchen, Elutionen, Lysimeterversuchen und Stofftransportmodellierungen im Hinblick auf die Verfahrensoptimierung zur Sickerwasserprognose. Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Bayreuth, 95440 Bayreuth, 273 S.
- DVWK (1990): Gewinnung von Bodenwasserproben mit Hilfe der Saugkerzen-Methode, DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft Heft 217, Verlag Paul Parey, Hamburg.
- EKL (2014): Ammoniak-Immissionen und Stickstoffeinträge. Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL), Bern, 62 S.
- Flückiger, W., Braun, S., Mainiero, R., Schütz, K., Thomas, V. (2011): Auswirkung erhöhter Stickstoffbelastung auf die Stabilität des Waldes. IAP Schönenbuch, Synthesebericht im Auftrag des BAFU, 87 S.
- Grossmann, J., Quentin, K.-E., Udluft, U. (1987): Sickerwassergewinnung mittels Saugkerzen – eine Literaturstudie. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 150, 258-261.
- Gundersen, P., Callesen, I., de Vries, W. (1998): Nitrogen leaching in forest ecosystems is related to forest floor C/N ratios. *Environ. Pollut.* 102, 403-407.
- Gundersen, P., Schmidt, I.K., Raulund-Rasmussen, K. (2006): Leaching of nitrate from temperate forests - effects of air pollution and forest management. *Environ. Rev.* 14, 1–57.
- Hegg, C., Jeisy, M., Waldner, P. (2004): Wald und Trinkwasser. Eine Literaturstudie. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL, 60 Seiten.
- Hörmann, G., Scherzer, J., Suckow, F., Müller, J., Wegehenkel, M., Lukes, M., Hammel, K., Kniess, A., Meesenburg, M. 2003. Wasserhaushalt von Waldökosystemen: Methodenleitfaden zur Bestimmung der Wasserhaushaltskomponenten auf Level II-Flächen. BMVEL, Referat 533, 92 S. <http://www.wasklim.de/download/Methodenband.pdf>
- Hürdler, J., Prasuhn, V., Spiess, E. (2015): Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Gewässer der Schweiz. MODIFFUS 3.0. Bericht z.H. BAFU, 117 S.
- Kiese, R., C. Heinzeller, C. Werner, S. Wochele, R. Grote, K. Butterbach-Bahl, (2011): Quantification of nitrate leaching from German forest ecosystems by use of a process oriented biogeochemical model. *Environmental Pollution* 159, 3204-3214.
- MacDonald, J.A., Dise, N.B., Matzner, E., Armbruster, M., Gundersen, P., Forsius, M. (2002): Nitrogen input together with ecosystem nitrogen enrichment predict nitrate leaching from European forests. *Glob. Chang. Biol.* 8:1028-1033
- Meteotest (2015): Karten von Jahreswerten der Luftbelastung in der Schweiz. Dokumentation zu Datengrundlagen, Berechnungsverfahren und Resultaten der Karten bis zum Jahr 2014. Bericht im Auftrag des BAFU, Bern, 43 S.
- Nieminen, T. (Ed.) 2011: Soil Solution Collection and Analysis. Manual Part XI, 30pp. In: UNECE and ICP Forests (2011). Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Hamburg. ISBN: 978-3-926301-03-1. <http://www.icp-forests.org/Manual.htm>

- OSPAR (2008): Towards the 50% reduction target for nutrients; Assessment of Implementation of PARCOM Recommendations 88/2 and 89/4. London, 2008.
- 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. & Hurni, P. (1999): Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer im Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der Seen (Stand 1996). Bericht z.H. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), IUL-Liebefeld, 31 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. & Sieber, U. (2005): Changes in diffuse phosphorus and nitrogen inputs into surface waters in the Rhine watershed in Switzerland. *Aquatic Science* 67, 363-371
- 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 im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Hrsg. Agroscope INH, Zürich, 76 S.
- Rihm, B. (2016): N-Deposition 2010 über 2000 m Höhe. Unveröffentlichte Daten, Meteotest.
- Rihm, B. & Kurz, D. (2001): Deposition and critical loads of nitrogen in Switzerland. *Water, Air and Soil Pollution* 130, 1223-1228.
- Rihm, B. & Achermann, B. (2007): Indirect leaching of nitrate and emissions of nitrous oxide from agricultural activities – Considerations for Switzerland. – TFIAM/COST729 Workshop on Integrated Modelling of Nitrogen. Laxenburg, Austria.
- Schaap, M., Wichink Kruit, R., Banzhaf, S., Scheuschner, T., Hendriks, C., Kranenburg, R., Segers A., Bultjes, P. (2015): Atmospheric deposition to German natural and semi-natural ecosystems during 2009. Report to PINETI II Project (Project No. FKZ 371263240-1), UBA, Dessau.
- Schleppi, P. (2005): Nitrate leaching and nitrogen saturation of a subalpine forest after 10 year of experimentally-increased N deposition. 3rd Swiss Geoscience Meeting, Zürich.
- Schleppi, P., Waldner, P., Hegg, C. (2003): Einfluss des Waldes auf Nitrat-Gehalte im Wasser. *Bündnerwald* 4, 27-30.
- Thimonier, A., Graf Pannatier, E., Schmitt, M., Waldner, P., Walthert, L., Schleppi, P., Dobbartin, 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.
- Thimonier, A., Graf Pannatier, E., Schmitt, M., Waldner, P., Schleppi, P., Braun, S. (2012): Dépôts atmosphériques azotés en forêt: un bilan des sites d'observation à long terme. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 163(9):343–354.
- UNECE (1992). Critical Loads for Nitrogen. UN-ECE-Workshop Report Lökeberg, Sweden, 6.-10. April 1992.
- 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.
- van der Salm, C., de Vries, W., Reinds, G.J., Dise, N.B. (2007): N leaching across European forests: derivation and validation of empirical relationships using data from intensive monitoring plots. *For. Ecol. Manag.* 238, 81–91.
- Waldner, P., Braun, S., Kurz D., Thimonier, A., Rihm, B. (2016): Nährstoffflüsse im Wald mit Fokus auf Stickstoff und basische Kationen. In: *Wald im Klimawandel*, in press
- Waldner, P., Marchetto, A., Thimonier, A., Schmitt, M., Rogora, M., Granke, O., Mues, V., Hansen, K., Pihl Karlsson G., Žlindra, D., Clarke, N., Verstraeten, A., Lazdins, A., Schimming, C., Iacoban, C., Lindroos, A.-J., Vanguelova, E., Benham, S., Meesenburg, H., Nicolas, M., Kowalska, A., Apuhtin, V., Napa, U., Lachmanová, Z., Kristoefel, F., Bleeker, A., Ingerslev, M., Vesterdal, L., Molina, J., Fischer, U., Seidling, W., Jonard, M., O'Dea, P., Johnson, J., Fischer,

- R., Lorenz, M., (2014): Detection of temporal trends in atmospheric deposition of inorganic nitrogen and sulphate to forests in Europe. *Atmospheric Environment* 95, 363-374.
- Walthert, L., Scherler, M., Stähli, M., Huber, M., Baltensweiler, A., Ramirez-Lopez, L., Papritz, A., (2015): Böden und Wasserhaushalt von Wäldern und Waldstandorten der Schweiz unter heutigem und zukünftigem Klima (BOWA-CH). Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Zürich, Eidg. Technische Hochschule ETH. 117 S.
- Wang, Q., Cameron, K., Buchan, G., Zhao, L., Zhang, E.H., Smith, N., Carrick, S. (2012): Comparison of lysimeters and porous ceramic cups for measuring nitrate leaching in different soil types, *New Zealand Journal of Agricultural Research* 55/4, 333-345.
- Weihermüller, L., Siemens, J., Deurer, M., Knoblauch, S., Rupp, H., Gottlein, A., Putz, T. (2007): In situ soil water extraction: a review. *Journal of Environmental Quality* 36, 1735-1748.
- Wilson, N. (1995): *Soil Water and Ground Water Sampling*, Lewis Publishers, London.