

# Modellierung von Stickstoffdepositionen aus der Atmosphäre in verschiedene Ökosysteme

im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU

Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und  
Limnologie (SGHL) 24.10.2024

Beat Rihm, Meteotest AG, Bern

# Übersicht

- Ziele der Kartierung
- Critical Loads für Stickstoff (CLN) → reaktiver N
- Emission und Konzentration in der Luft (Bsp. Ammoniak  $\text{NH}_3$ )
- Trockene Deposition (gas- und staubförmig)
- Nasse Deposition (im Niederschlag)
- Einige Ergebnisse

→ Überblick, Beispiele

- Publikation:  
Rihm B., Künzle T., 2023: Nitrogen deposition and exceedances of critical loads for nitrogen in Switzerland 1990–2020. Meteotest, Bern, commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN).  
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien.html>

# Ziele der Kartierungsarbeiten

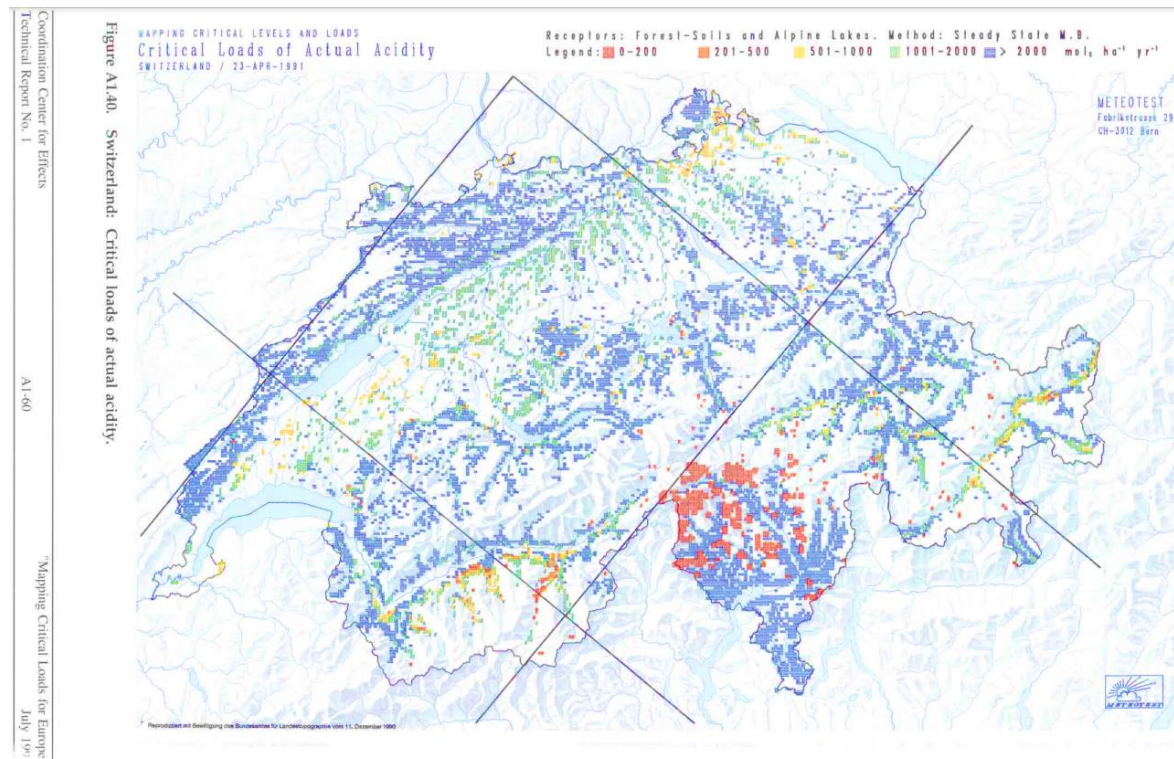
- Datenexporte für das internationale Reporting im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention von 1979 (CLRTAP)  
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/air/info-specialists/international-air-pollution-control/unece-convention-on-long-range-transboundary-air-pollution--clrt.html>
- Aktuelle Informationen zur Belastungssituation für die nationale Umweltpolitik  
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/fachinformationen/auswirkungen-der-luftverschmutzung/auswirkungen-der-luftverschmutzung-auf-die-oekosysteme.html>
- Datenanfragen von Verwaltungsstellen (Bundesämter, Kantone) sowie Forschungsinstituten.  
An: [Pascal.Blanc@bafu.admin.ch](mailto:Pascal.Blanc@bafu.admin.ch)  
BAFU Abt. Luftreinhaltung und Chemikalien

# Critical Loads (CL)

- **Definition** Critical Loads: "a quantitative estimate of an exposure to one or more pollutants below which significant harmful effects on specified sensitive elements of the environment do not occur according to present knowledge".
- Methoden: gemäss Mapping Manual, <https://www.umweltbundesamt.de/en/cce-manual> schrittweise Verbesserungen seit 1991.

Erste Karte der Schweiz mit CL für Acidity, aus dem CCE-Report 1991

<https://www.umweltbundesamt.de/en/cce-status-reports>



# Critical Loads for Nitrogen (CLN)

- Empirische Methode basierend auf Düngeexperimenten und Transsekt-Studien: Bobbink et al. 2022

<https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/review-revision-of-empirical-critical-loads-of>

- Relevante Ökosystemen in der Schweiz (Ausschnitt), kg N/(ha yr)

Ecosystem type	EUNIS code	CL <sub>emp</sub> N range	Reliability <sup>a)</sup>	Indication of exceedance
Broadleaved deciduous forest	T1	10-15	##	Changes in soil processes; nutrient imbalance; altered composition mycorrhiza and ground vegetation
Coniferous forests	T3	3-15	##	Changes in soil processes; nutrient imbalance; altered composition mycorrhiza and ground vegetation; increase in mortality with drought
Arctic and (sub-)alpine scrub habitats	S2	5-10 <sup>d)</sup>	#	Decline in lichens, bryophytes and evergreen shrubs
Permanent oligotrophic lakes, ponds and pools	C1.1	2-10 <sup>b)</sup>	##	Increased algal productivity and a shift in nutrient limitation of phytoplankton from N to P; shifts in macrophyte community
Alpine and sub-Arctic clear water lakes	C1.1	2-4	##	Increased algal productivity and a shift in nutrient limitation of phytoplankton from N to P
Raised and blanket bogs	Q1	5-10	##	Increase in vascular plants; decrease in bryophytes; altered growth and species composition of bryophytes; increased N in peat and peat water

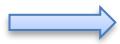
u.a. Nitrat-Auswaschung

<sup>a)</sup> The reliability is indicated by ## reliable; # quite reliable and (#) expert judgement.

# Critical Loads for Nitrogen (CLN)

- Umsetzung für die Schweiz (Ausschnitt): kg N/(ha yr)  
 Datenquellen Gewässer: Hegg-Atlas, Posch et al. 2007 (ca. 100 Seen)  
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/air/publications-studies/publications/Critical-Loads-of-Nitrogen-and-their-Exceedances.html>

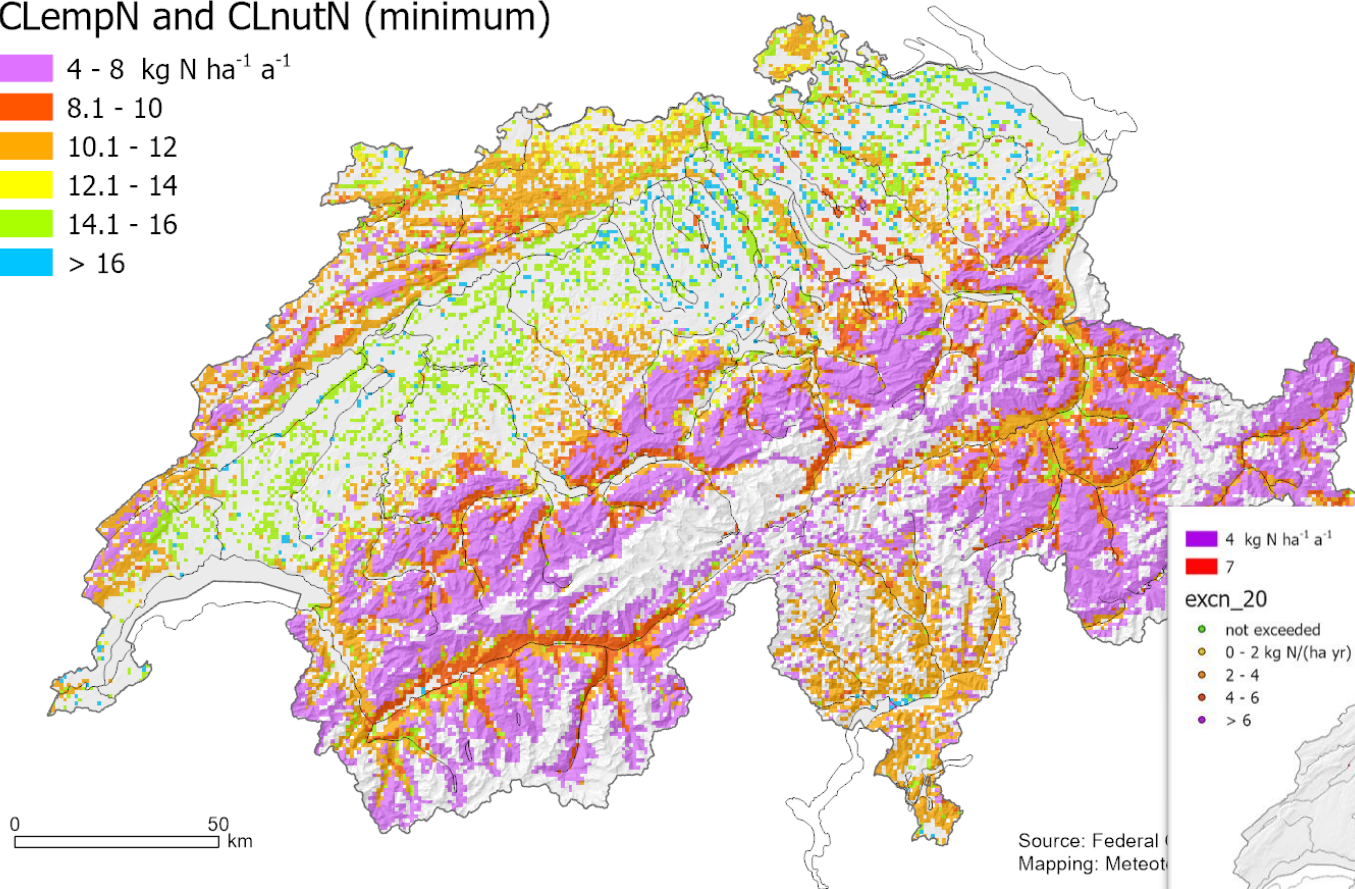
Ecosystem type	CL <sub>emp</sub> N range	Relevant vegetation types in Switzerland	EUNIS code	CL <sub>emp</sub> N
(sub)-alpine grassland	5-10	Chrysopogonetum grylli ( <i>Goldbart-Halbtrockenrasen</i> )	R43	10
		Seslerio-Bromion (Koelerio-Seslerion) ( <i>Blaugras-Trespen-Halbtrockenrasen</i> )	R4431	10
		Stipo-Poion molinerii ( <i>Engadiner Steppenrasen</i> ), sub-alpine	R44	10
		Elynion ( <i>Nacktriedrasen</i> ), alpine	R4421	7
Permanent oligotrophic lakes, ponds and pools	2-10	Littorellion ( <i>Strandling-Gesellschaften</i> )	C1.1	7
Alpine and sub-Arctic clear water lakes	2-4	Sensitive alpine lakes in Southern Switzerland	C1.1	4
Raised and blanket bogs	5-10	Sphagnion fusci ( <i>Hochmoor</i> )	Q11	7



# Map of Critical Loads for Nitrogen

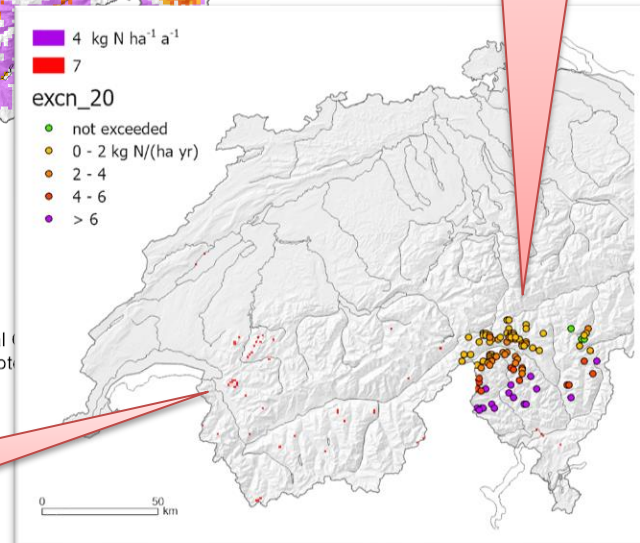
- Empirische Methode (CLempN) und SMB-Methode für Wald (CLnutN)

CLempN and CLnutN (minimum)



Source: Federal Office for the Environment  
Mapping: Meteoest

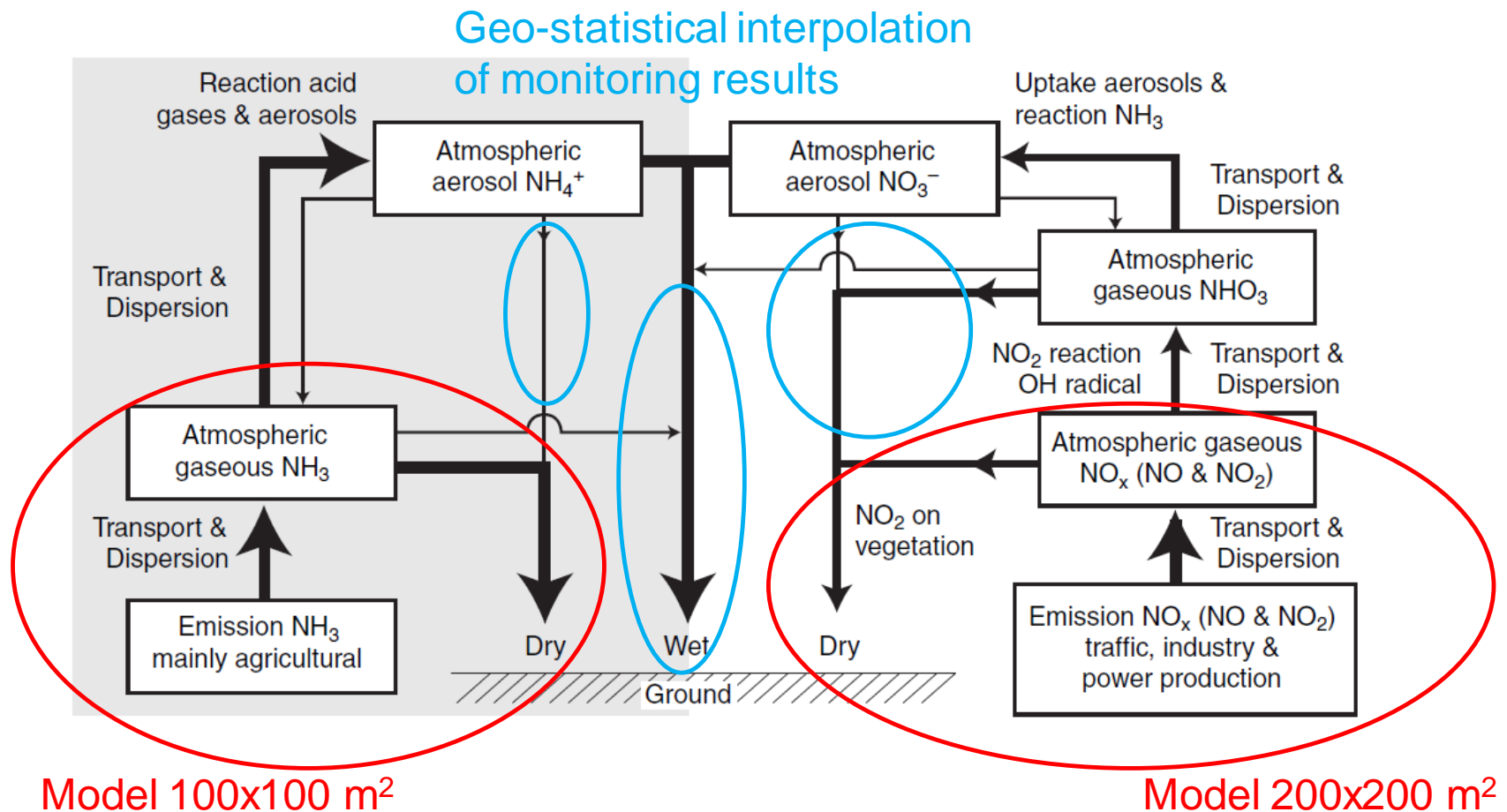
Alpine lakes



Littorellion

# Stickstoff in der Atmosphäre

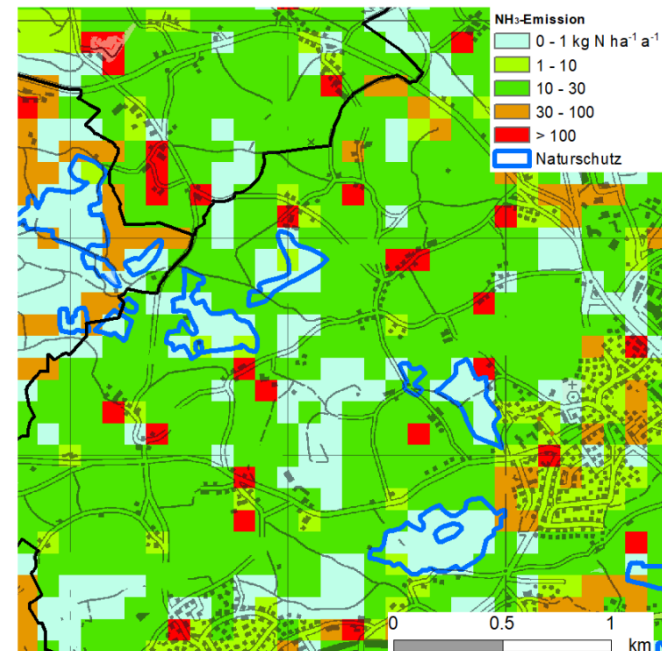
- Deposition modelling scheme (based on a figure by Hertel et al. 2006)



# Beispiel NH<sub>3</sub>-Emission, ha-Raster

## Landwirtschaftliche Quellen: Total 41.5 kt N

- Emissionsfaktoren von HAFL (Kupper et al. 2022), 24 Tierkategorien
- für die 4 Stufen:  
Stall, Hofdüngerlagerung → Punktquellen  
Hofdüngerausbringung, Weide → Flächenquellen
- Tierzahlen und Sömmerung pro Betrieb mit Hektar-Koordinaten (BFS).

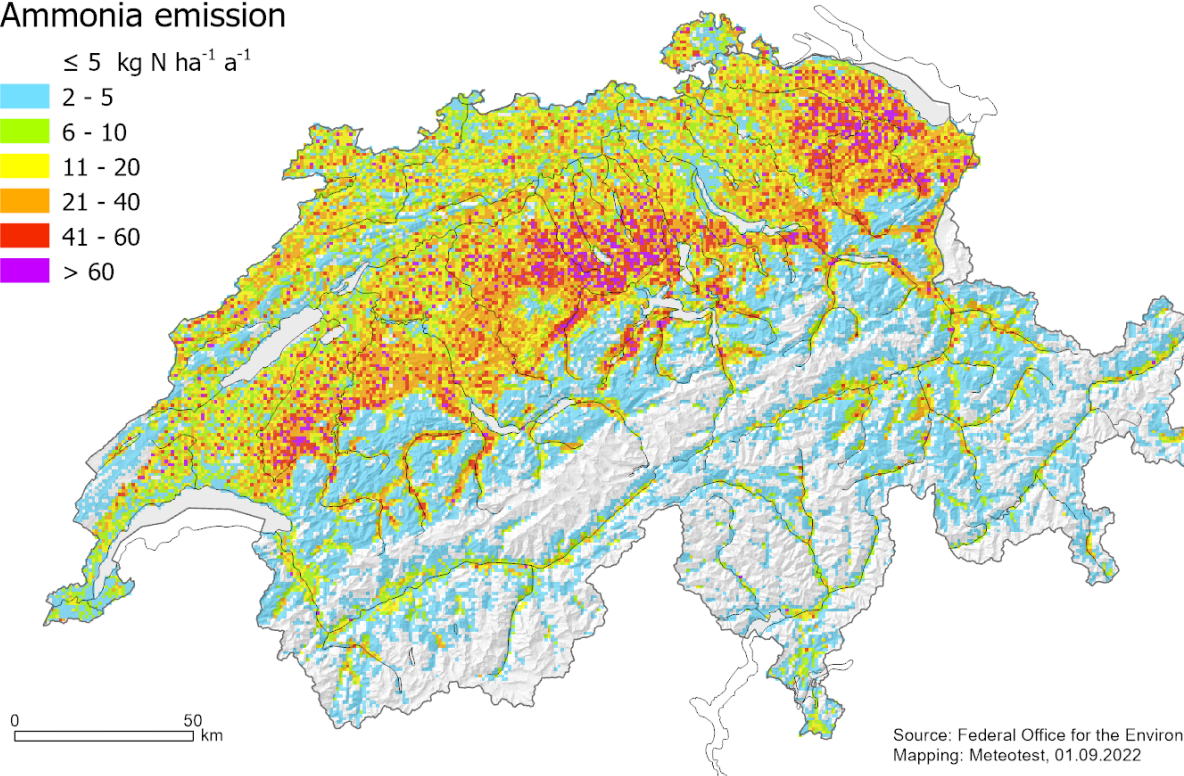
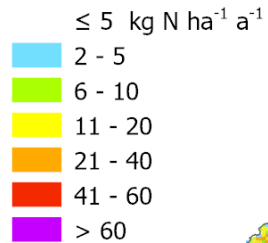


## Nicht-landwirtschaftliche Quellen: Total 3.3 kt N

- Daten von EMIS (BAFU) für Industrie, Verkehr, Haushalte, Abfall/Abwasser
- Natürliche Emissionen (0.6 kt N)

# Emissionskarte NH<sub>3</sub> 2020

Ammonia emission

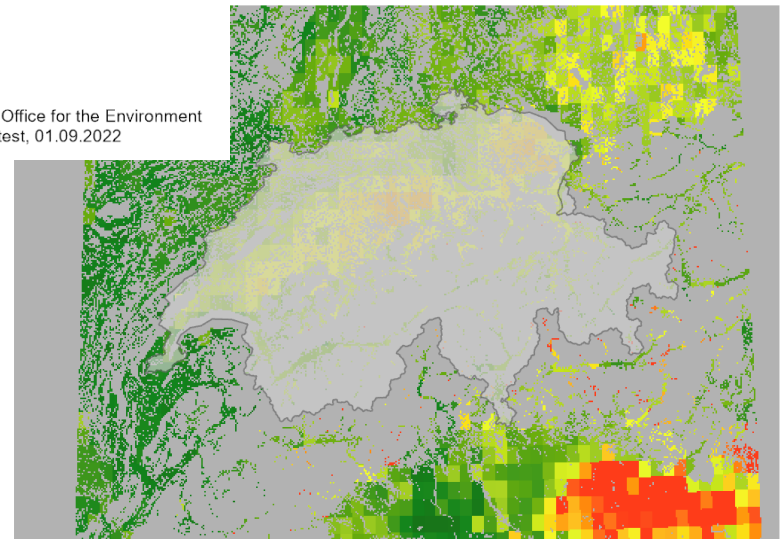
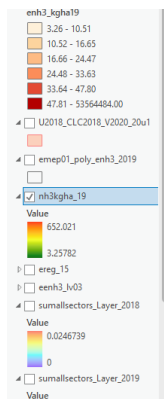


Source: Federal Office for the Environment  
Mapping: Meteotest, 01.09.2022

**Ausland: EMEP**

Modell mit 0.1 Grad Auflösung

[https://emep.int/mscw/mscw\\_moddata.html](https://emep.int/mscw/mscw_moddata.html)

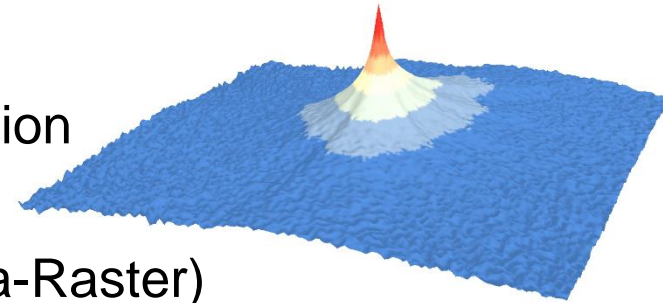


# Ammoniak-Konzentration

## Statistisches Ausbreitungsmodell (PolluMap):

1) Die Konzentration infolge einer Standardquelle ( $1 \text{ kg NH}_3 \text{ a}^{-1}$ ) wird mit einem Ausbreitungsmodell (Gauss, Distanzprofil Asman, AUSTAL) in der Umgebung (bis 50 km Entfernung) berechnet:

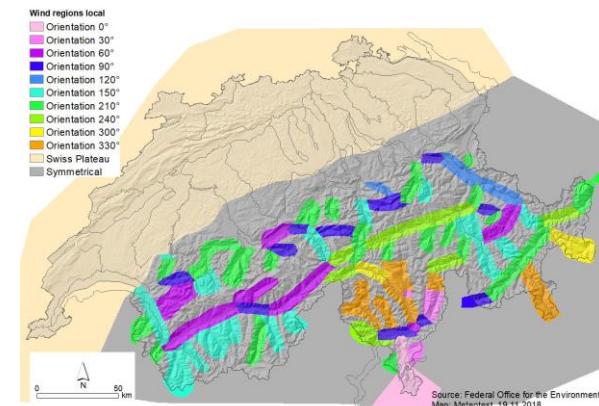
Transfer-Funktion Emission  $\rightarrow$  Konzentration



2) Die Transfer-Funktion wird auf alle Quellen (ha-Raster) angewendet und mit der jeweiligen Emissionsstärke multipliziert.

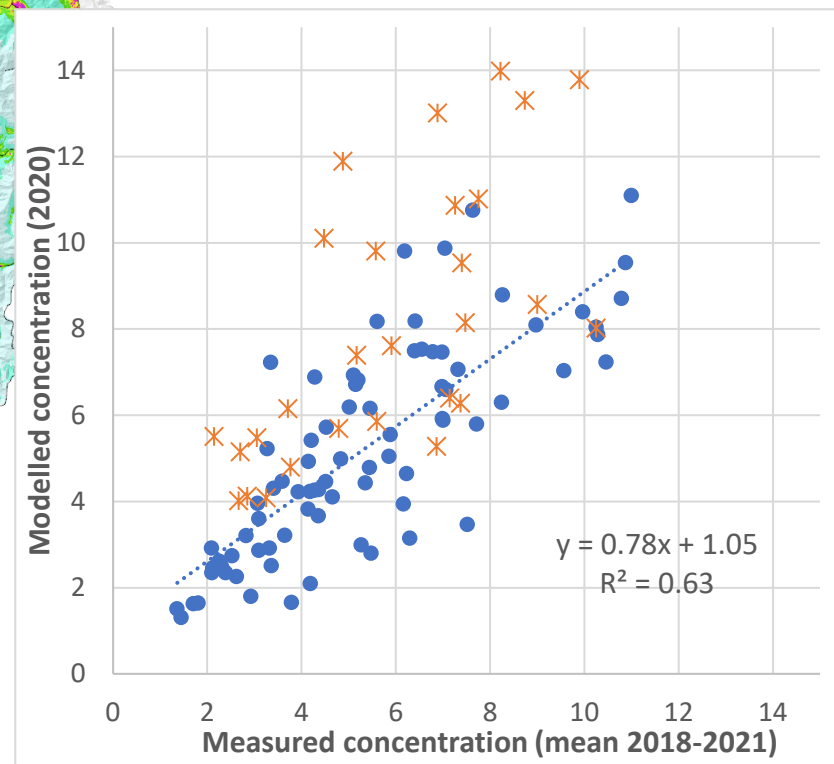
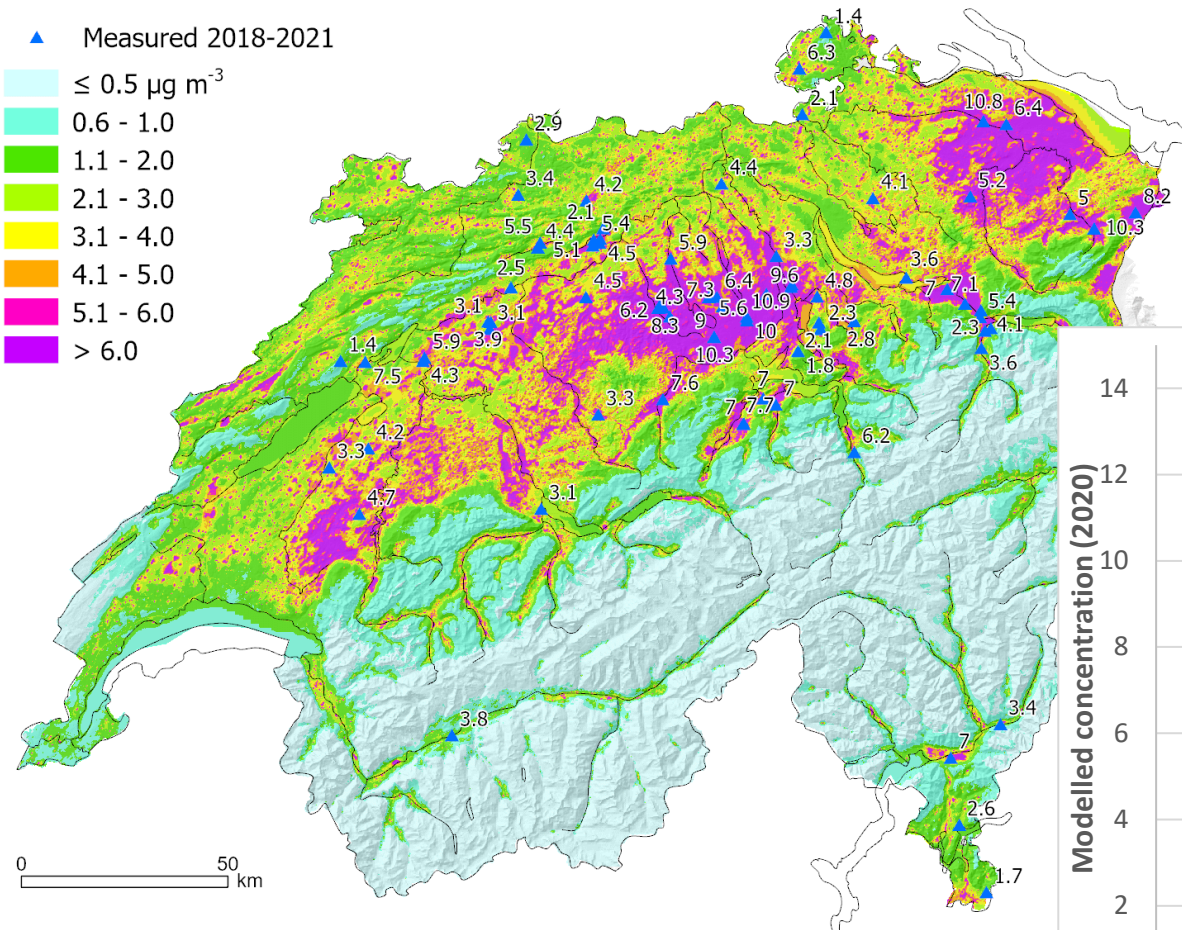
3) Verschiedene Transfer-Funktionen für klimatische Regionen, z.B. je nach Orientierung von Alpentälern.

4) Kalibrierung mit Messungen/Höhenkorrektur.



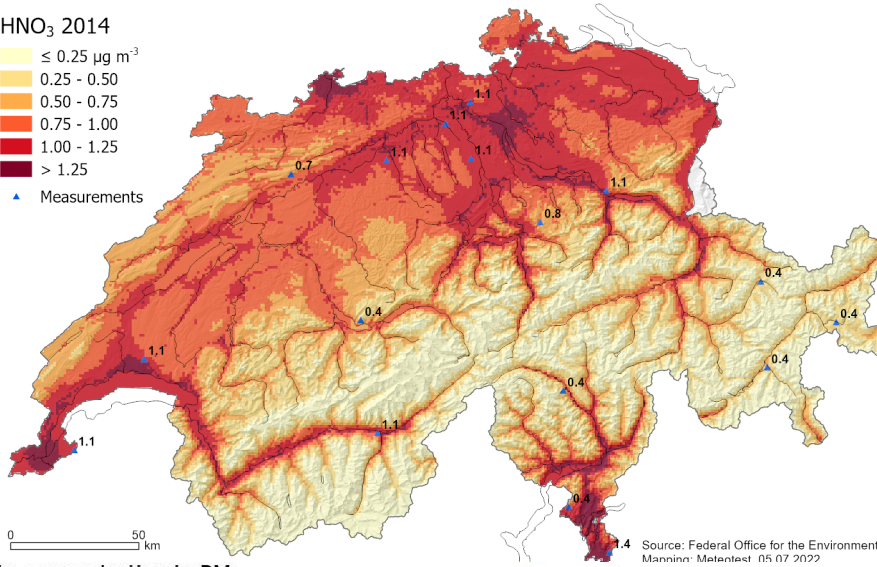
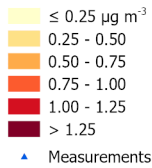
# NH<sub>3</sub>-Konzentration 2020

- Werte 2020 rund 25% höher als 2015, wegen warmen Sommern



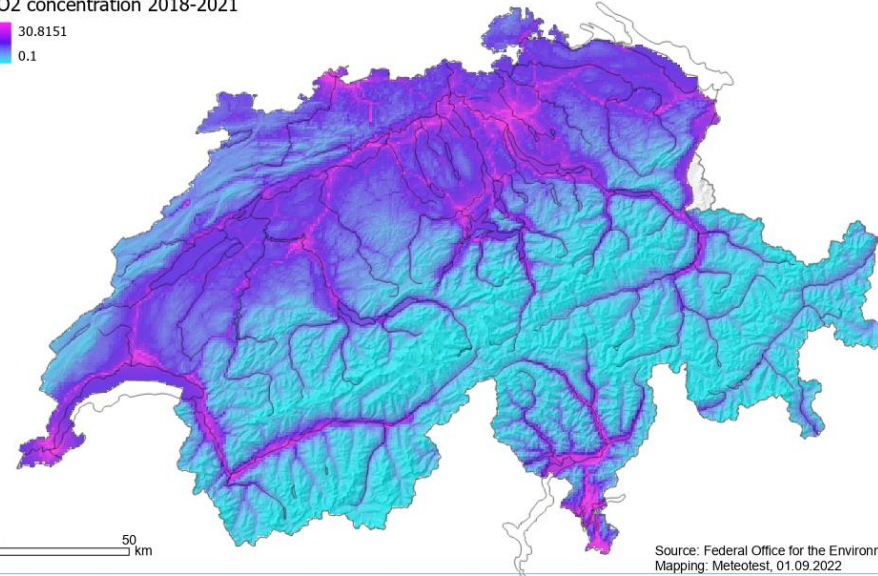
# Weitere Konzentrationskarten

HNO<sub>3</sub> 2014



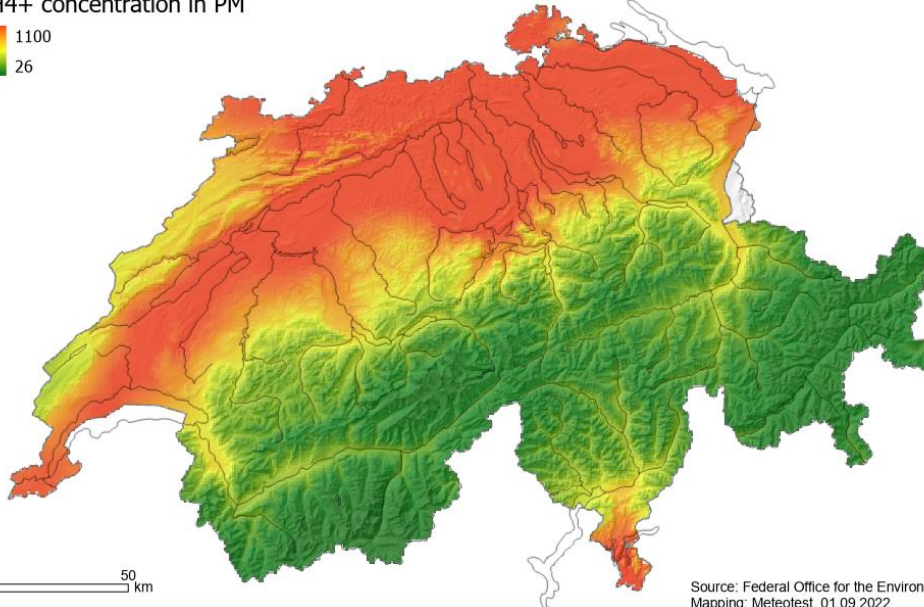
Source: Federal Office for the Environment  
Mannin: Meteotest 05.07.2022

NO<sub>2</sub> concentration 2018-2021



Source: Federal Office for the Environment  
Mapping: Meteotest, 01.09.2022

NH<sub>4</sub><sup>+</sup> concentration in PM



Source: Federal Office for the Environment  
Mapping: Meteotest, 01.09.2022

NO<sub>2</sub> und PM<sub>10</sub>:

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zustand/daten/luftbelastung-historische-daten/karten-jahreswerte.html>

# Gasförmige N-Deposition

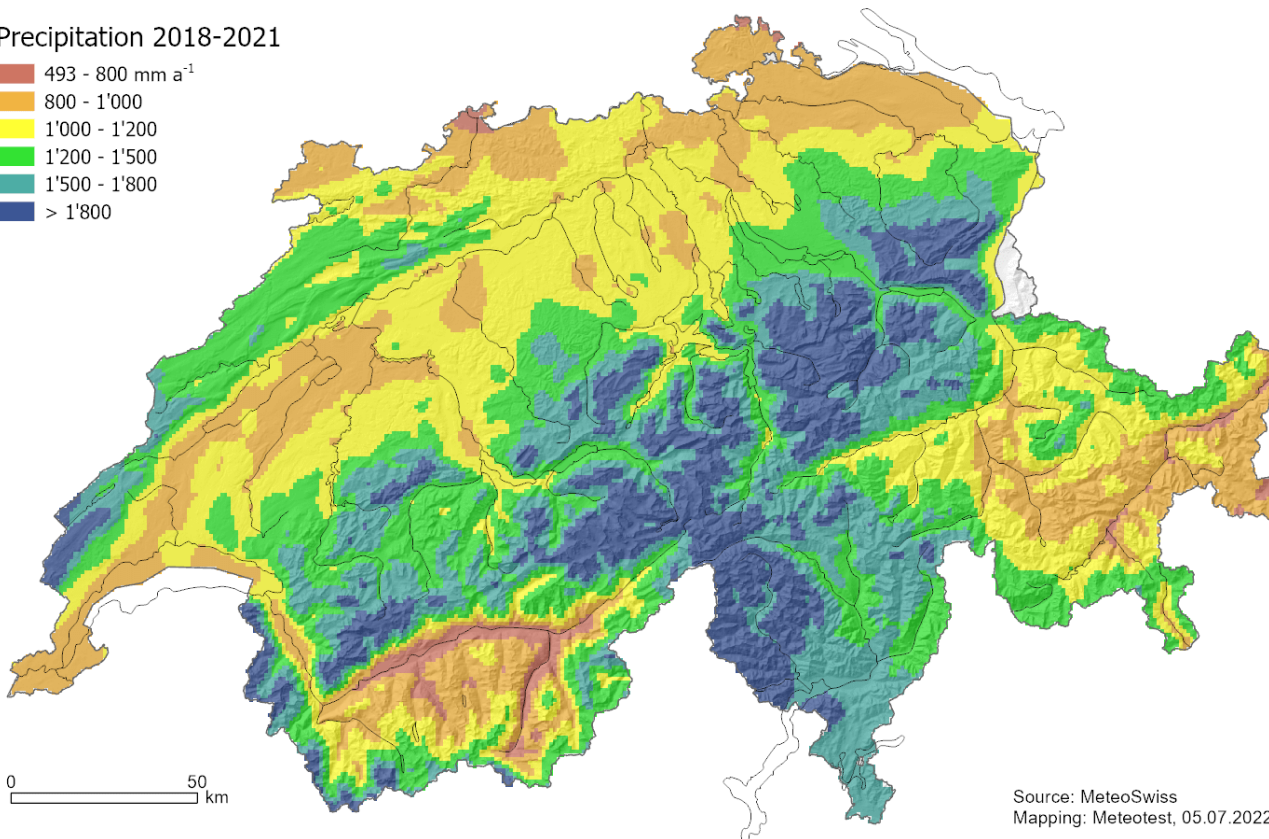
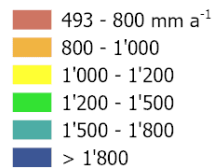
- $DN(\text{gas}) = \text{Konzentration}(\text{gas}) \bullet V_{\text{dep}}(\text{gas, Land-use})$ , wobei:  $V_{\text{dep}}$  "effektiv" aus Literatur, Landuse aus Arealstatistik. Vorgehen analog auch für Aerosole (PM10-Karten).

Land use ID	Land use description	$V_{\text{dep}} \text{NH}_3$	$V_{\text{dep}} \text{NO}_2$	$V_{\text{dep}} \text{HNO}_3$
11	Coniferous forest, >90% coniferous trees	25	4	25
12	Mixed forest, 11–90% coniferous trees	20	3.5	20
13	Deciduous forest, >90% deciduous trees	18	3	18
21	Cropland and grassland (fertilised)	4-10	1.5	15
22	Perennial crops (vineyards, fruit trees)	12	1.5	15
31	Pastures, meadows (alps, dry grassland TWW)	12	1.5	15
41	Unproductive vegetation (wetlands, scrub forest)	15	1.5	15
51	Settlements	8	1.5	15
61	Bare land (rocks, glaciers)	5	1	15
62	Surface water (lakes, streams)	8	1	15

# Nasse N-Deposition

- DNwet = Niederschlag • Konzentration\_im\_Niederschlag, wobei: Niederschlag von MeteoSchweiz, Konzentrations-messungen "wet only" von NABEL und Kanton Tessin.

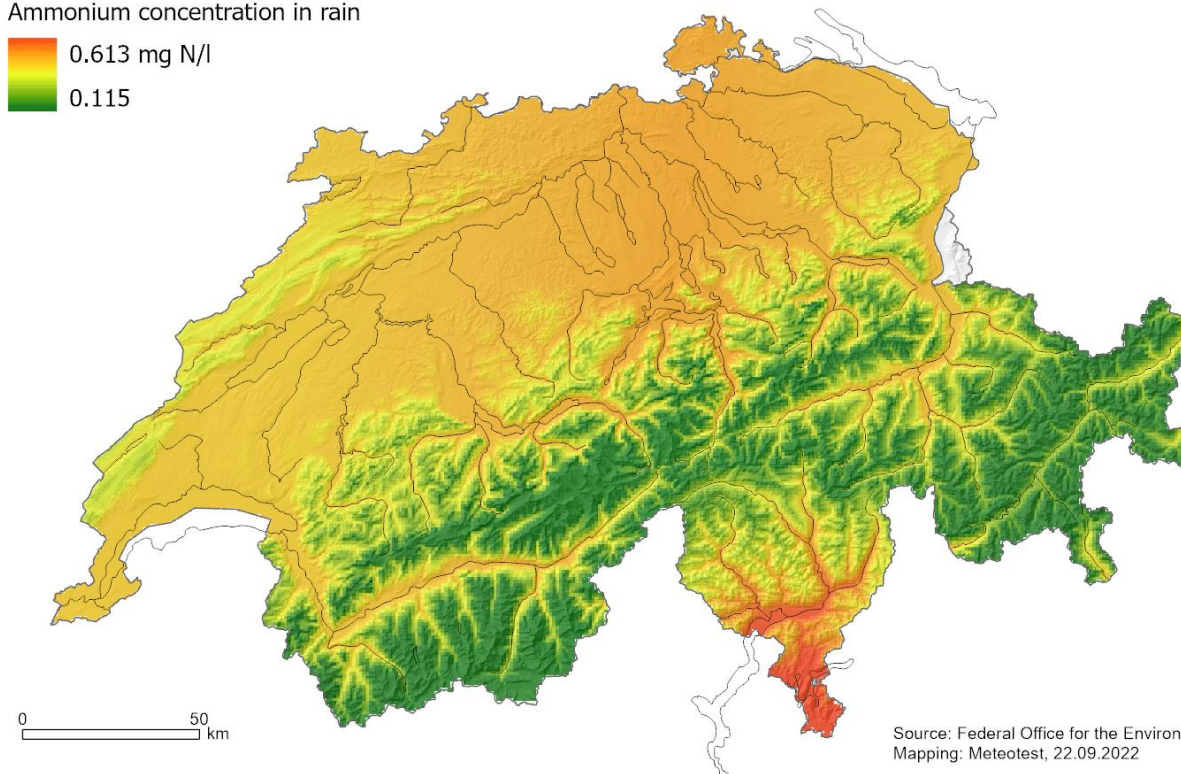
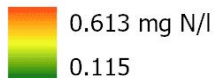
Precipitation 2018-2021



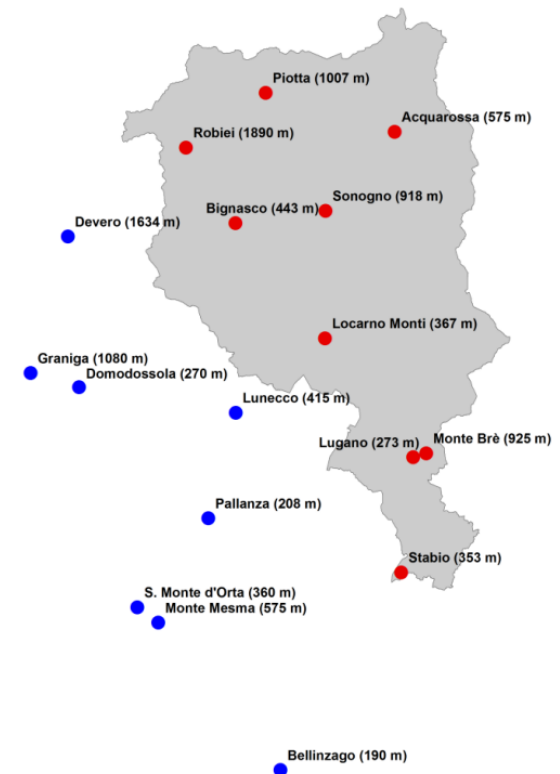
# Ammonium im Niederschlag

- Tessin: Messnetz wet-only und Kartierung (Steingruber 2018/2022)
- Übrige Schweiz: NABEL, Annahmen zu Höhenabhängigkeit

Ammonium concentration in rain



Source: Federal Office for the Environment  
Mapping: Meteotest, 22.09.2022

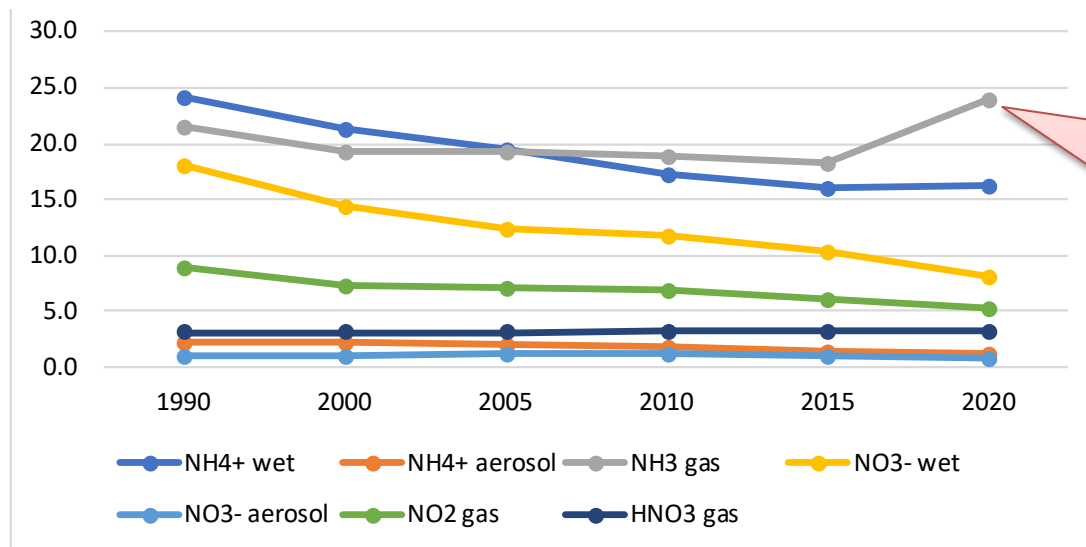


Konzentration von  $\text{NH}_y\text{-N}$  im  
Regenwasser 2018-2021

# N-Deposition 1990 bis 2020

kt N/yr	1990	2000	2005	2010	2015	2020	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> wet	24.2	21.3	19.4	17.3	16.1	16.4	28%
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> aerosol	2.2	2.2	2.0	1.8	1.5	1.2	2%
NH <sub>3</sub> gas	21.6	19.3	19.3	19.0	18.3	23.9	40%
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> wet	18.2	14.5	12.4	11.9	10.4	8.2	14%
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> aerosol	1.1	1.1	1.2	1.3	1.1	0.9	1%
NO <sub>2</sub> gas	9.0	7.3	7.1	6.8	6.1	5.3	9%
HNO <sub>3</sub> gas	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	6%
NH <sub>y</sub> total	47.9	42.8	40.8	38.1	35.8	41.5	70%
NO <sub>y</sub> total	31.5	26.2	24.0	23.3	20.8	17.7	30%
N total	79.5	69.0	64.7	61.4	56.7	59.2	100%
Difference to 1990	---	-13%	-19%	-23%	-29%	-26%	

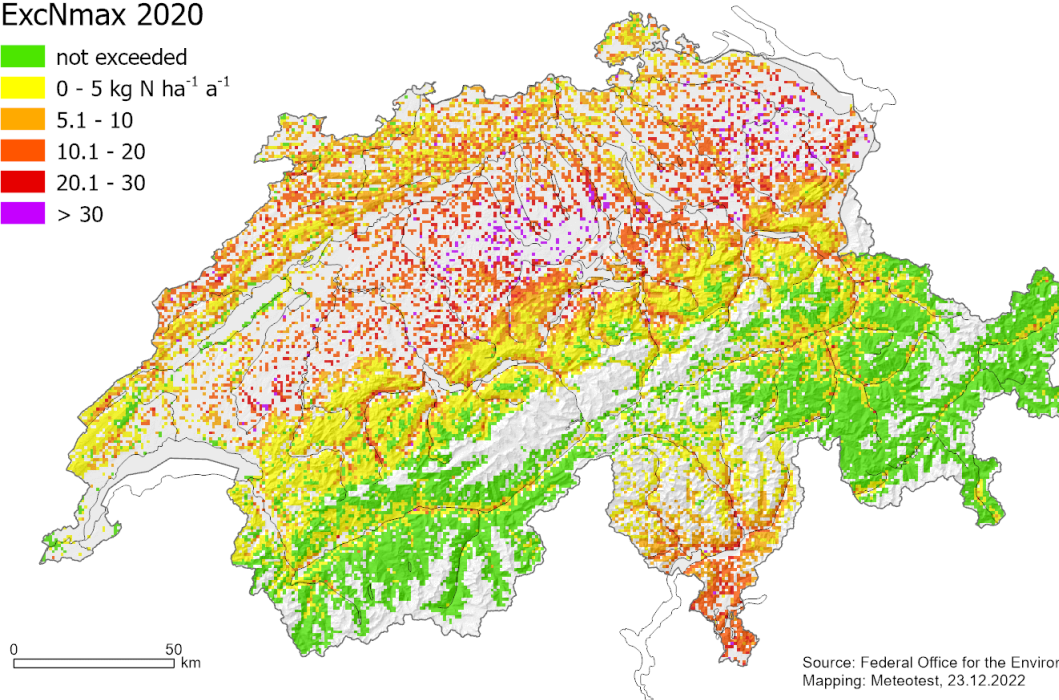
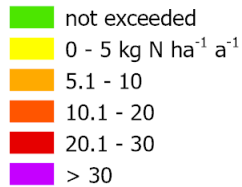
Landwirtschaft ist bedeutend



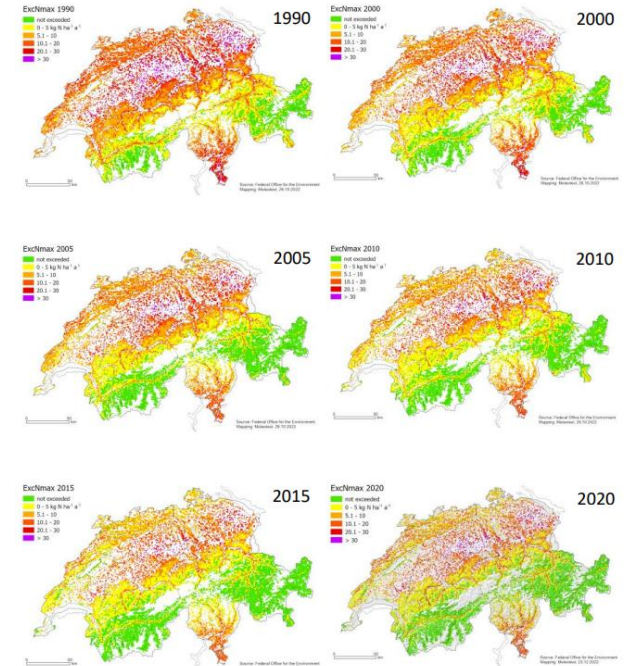
Zunahme NH<sub>3</sub> infolge hoher Temperaturen 2018-2021 und Rückgang NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, siehe Studie: Grange S.K. et al., 2023. → mehr lokale Deposition

# Überschreitung der Critical Loads

ExcNmax 2020



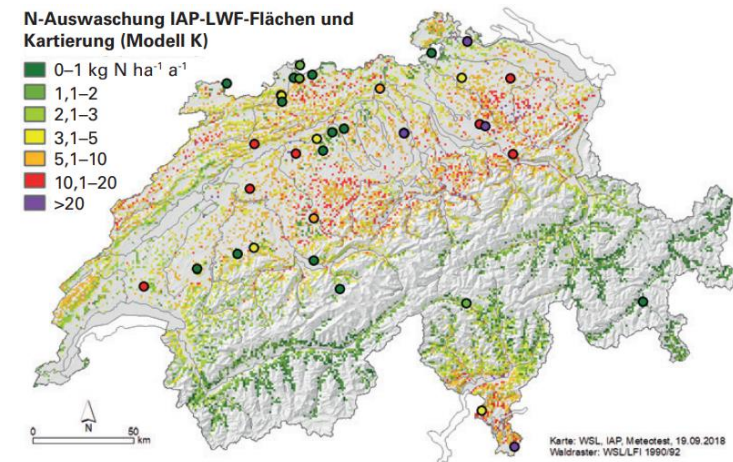
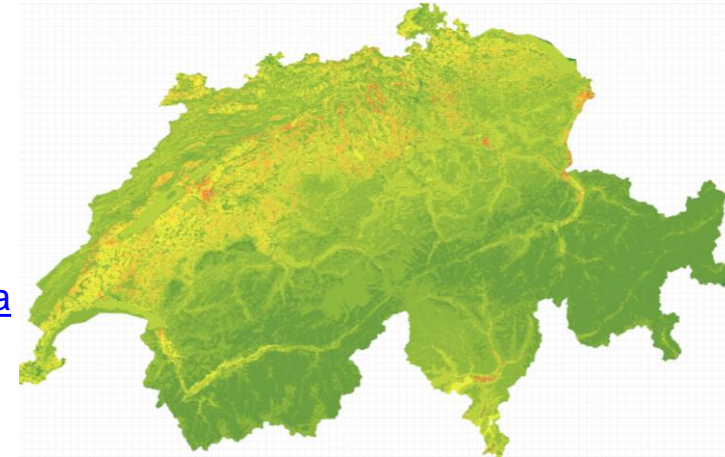
Source: Federal Office for the Environment  
Mapping: Meteotest, 23.12.2022



	<sup>a</sup> Area (km <sup>2</sup> )	1990	2000	2005	2010	2015	2020
<i>Percentage of area exceeded</i>							
Exceedance of CLempN, (semi-) natural ecosystems	17'359	78%	69%	61%	60%	52%	54%
Exceedance of CLsmbN, productive forest	10'461	96%	93%	89%	89%	85%	87%
Maximal (combined) exceedance per km <sup>2</sup>	23'090	85%	78%	72%	72%	66%	67%

# Anwendungsbeispiele, Gewässer

- Input für das Modell MODIFFUS (Agroscope, Hutchings et al. 2023): Diffuse Gesamt-Stickstoffeinträge in die Gewässer. Rund 48 kt N.  
[https://map.geo.admin.ch/#/map?lang=de&layers=ch.bafu.gewasserschutz-diffuse\\_eintraege\\_stickstoff](https://map.geo.admin.ch/#/map?lang=de&layers=ch.bafu.gewasserschutz-diffuse_eintraege_stickstoff)
- Modellierung der Nitrat-Auswaschung ins Grundwasser aus Wäldern: Waldner et al. 2022.  
0 bis 35 (im Mittel 4.25) kg N/(ha yr)  
<https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl%3A32006>



# Fazit

Die N-Depositionen können eingesetzt werden für:

- Überschreitungen von Critical Loads
- Nationale Übersichten, Stoffflüsse/-Bilanzen (z.B. MODIFFUS)
- Grundlagen in kantonalen oder regionalen (Massnahmen-) Plänen
- ökologische Transekt-Studien (z.B. Biodiversität, Waldzustand)
- (Wald-)Wachstumsmodelle (z.B. WSL/LFI)
- Auswahl generalisierter Daten sind auf <https://map.geo.admin.ch/> (wähle Thema BAFU, Luft)

Entwicklung:

- Deutliche Abnahme der Depositionen und CLN-Überschreitungen 1990 bis 2015, aber 2020 immer noch viele Überschreitungen.
- Es gibt inneralpine Ökosysteme, die nie überschritten waren.

**Danke für Ihre Aufmerksamkeit!**