

AMT FÜR UMWELT FÜRSTENTUM LIECHTENSTEIN

Stickstoffdeposition in Liechtenstein

Erhebung, Modellierung und Abschätzung inländischer Anteile mit Fokus auf Schutzgebiete.



Im Auftrag des Amtes für Umwelt, Vaduz

Meteotest AG

Fabrikstrasse 14
 3012 Bern, Schweiz

S +41 31 307 26 26
▲ +41 31 307 26 10

☑ office@meteotest.ch➢ www.meteotest.ch

Impressum

Auftraggeber Kontaktperson Adresse	Amt für Umwelt AU Veronika Wolff Gerberweg 5 / Postfach 684 9490 Vaduz
Datum Aktuelle Version	21.08.2020 Bericht mit Karten
Datei	Ndep_Liechtenstein_20200821
Autoren	Beat Rihm, Meteotest Veronika Wolff, Amt für Umwelt
Modellrechnungen	Meteotest
Gewährleistung	Meteotest gewährleistet ihren Kunden eine sorgfältige und fach- gerechte Auftragsbearbeitung. Jegliche Haftung, insbesondere auch für Folgeschäden, wird im Rahmen des gesetzlich Zulässi- gen wegbedungen.

Inhalt

1	Auft	trag	5
	1.1	Hintergrund dieser Studie	5
	1.2	Studienziele	5
	1.3	Vorgehen	6
2	Мос	lellierung der NH ₃ -Konzentration	7
	2.1	Emissionskarte	7
	2.2	Konzentrationskarte	8
	2.3	Szenario ohne inländische Landwirtschaft (OLW)	10
3	Bere	echnung der Deposition	11
	3.1	Methodik	11
	3.2	Deposition in Liechtenstein	13
	3.3	Grenzüberschreitende Flüsse nach EMEP	14
	3.4	Deposition im Ruggeller Riet	16
4	Fazi	it	17
5	Lite	ratur	19
6	Beg	riffe,Abkürzungen	21

Tabellen

Tabelle 1:	NH ₃ -Emissionen in Liechtenstein gemäss Emissionskarte Version 2017 (Landwirtschaftliche Betriebszählung 2016, andere Quellen mit Bezugsjahr 2010)7
Tabelle 2:	NH_3 -Messungen in Liechtenstein und Vergleich mit modellierten Werten in $\mu g/m^3$. Zum Vergleich wird das Mittel der fünf Jahre 2012–2017 verwendet, bei RRI, wo nur 2019 gemessen wurde, wird der Messwert auf diese Periode skaliert (blaue Markierung).
Tabelle 3:	Komponenten (Rihm & Achermann 2016)
Tabelle 4:	Deposition von sieben N-Komponenten in Liechtenstein und zum Vergleich die mittlere N-Deposition pro Hektare in der Schweiz;
	Jahr 201514
Tabelle 5:	Modellierte N-Depositionen am Messstandort Ruggeller Riet (RRI) und an einem Hektarpunkt am Westrand des Naturschutzgebietes. OLW ist das modellierte Szenario ohne Liechtensteiner Landwirtschaftsquellen

Abbildungen

Hinweis: Die räumliche Auflösung der modellierten Daten beträgt 100 m. Aus Gründen des Datenschutzes wurde in den Kartendarstellungen auf 500 m bzw. 1 km-Raster generalisiert.

Abbildung 1:	Karte der NH ₃ -Emissionen in Liechtenstein und im angrenzenden Ausland. Rot eingefärbte Zellen enthalten in der Regel einen Landwirtschaftsbetrieb mit Stallemissionen
Abbildung 2:	Karte der modellierten NH_3 -Konzentration und der gemessenen Werte (Mittel 2013–2017) an den vier Liechtensteiner Stationen9
Abbildung 3:	Karte der modellierten NH ₃ -Konzentration ohne die Liechtensteiner Landwirtschaftsemissionen (Szenario OLW)11
Abbildung 4:	Karte der modellierten N-Deposition auf dem ha-Raster, Jahr 2015. Die Werte auf Schweizer Gebiet stammen vom BAFU (Rihm & Künzle 2019)13
Abbildung 5:	Binnendeposition ausgedrückt als %Depo für NHy in Abhängigkeit der Landesfläche in sieben Ländern (EMEP 2019). Die Fläche ist auf einer logarithmischen Skala dargestellt. Die blaue Regressionskurve ist inklusive Schweiz

1 Auftrag

1.1 Hintergrund dieser Studie

Schon 2001 wurde in der Grundlagenstudie Ruggeller Riet der Botanisch-Zoologischen Gesellschaft Liechtenstein-Sargans-Werdenberg e.V. (BZG 2001) festgehalten, dass Beobachtungen und Erhebungen der Vegetation und indikatorischer Tiergruppen in den letzten 25 Jahren (d.h. 1976-2001) auf eine drastische Erhöhung der Eutrophierung im Naturschutzgebiet Ruggeller Riet hinweisen. Als mögliche Ursachen der Veränderungen wurden erwähnt: ein verstärkter Nährstoffeintrag aus angrenzend landwirtschaftlich genutzten Gebieten (Direkteinwirkung oder via Gewässernetz), Mineralisierungsprozesse aufgrund eines gesunkenen Grundwasserspiegels oder der Eintrag aus der Luft.

Im Massnahmenplan Liechtensteins von 2007 wurde das Thema wieder aufgegriffen und die Einträge durch die Luft genauer diskutiert. Es lagen zu dieser Zeit keine Immissionsmessungen vor, jedoch nahm man an, dass in Liechtenstein eine vergleichbare Situation wie in der Schweiz vorlag. Für die Ostschweiz zeigten Untersuchungen von OSTLUFT, dass Stickstoff (N)-Einträge über den international definierten Belastungsgrenzen für sensible Ökosysteme lagen (Critical Loads). Neben dem Ruggeller Riet sind auch weitere Schutzgebiete in Liechtenstein potentiell von übermässigen Einträgen betroffen.

Eine wichtige Komponente der N-Einträge ist das gasförmige Ammoniak, NH₃. Mit dem Massnahmenplan wurden Massnahmen definiert, um Emissionen von NH₃ aus dem Landwirtschaftssektor (Hauptquelle von NH₃) zu verringern. Zeitgleich wurde ein Monitoring von NH₃ mit Passivsammlermessungen an drei Standorten eingeführt. Die Messpunkte befinden sich in Eschen, Schaan und Balzers – sowohl auf landwirtschaftlich genutzten Flächen wie auch im Siedlungsgebiet. Mit Jahresmitteln von 5 – 8 μ g/m³ liegen die gefundenen NH₃-Konzentrationen über den von der UNECE (2017) festgelegten kritischen Konzentrationen (Critical Levels), oberhalb derer nach dem Stand des Wissens direkte schädliche Auswirkungen auf empfindliche Vegetation vorkommen können.

2019 beteiligte sich Liechtenstein an einer schweizweiten Studie über die Gesamt N-Deposition mit einem Messstandort im Ruggeller Riet. Zum Zeitpunkt der Erarbeitung der vorliegenden Studie waren die finalen Ergebnisse noch nicht verfügbar, jedoch weisen die provisorischen Ergebnisse auf eine starke Überschreitung der für sensible Ökosysteme kritischen Eintragsgrenzen nach UNE-CE.

1.2 Studienziele

In der zurzeit überarbeiteten Version des Massnahmenplans Luft wird das Thema N-Einträge ein grosses Kapitel einnehmen. Auch in der Agrarpolitik und in der Luftreinhalte-Gesetzgebung wird das Thema immer wichtiger. Um eine gute Wissensgrundlage zu haben, hat das Amt für Umwelt Meteotest beauftragt, diverse Arbeiten zu NH₃-Konzentrationskarten, N-Deposition und Szenarien-Rechnungen durchzuführen. Unter anderem sollten damit folgende Fragen adressiert werden:

- Lässt sich die räumliche Verteilung von NH₃ Konzentration sowie von N-Deposition analog zum Vorgehen in der Schweiz auch in Liechtenstein gut modellieren?
- Wie gross ist der Anteil der Liechtensteiner Landwirtschaft am N-Eintrag im Ruggeller Riet, wieviel kommt aus dem Ausland und wieviel aus Liechtenstein selber?
- Können die Anteile der N-Emissionen, die exportiert werden, und die Anteile N-Deposition, die über die Atmosphäre importiert werden, abgeschätzt werden?

1.3 Vorgehen

Um die Fragen zu beantworten, wurden folgende Arbeiten durchgeführt.

- Modellierung der NH₃-Konzentration: Im Rahmen des Projektes Flechten-Rekalibrierung 2017 (Herzig et al. 2020) hat Meteotest eine Emissionskarte und eine Konzentrationskarte für NH₃ im Gebiet von Liechtenstein erstellt. Diese Karten wurden überprüft bzw. aktualisiert.
- NH₃-Konzentration, Szenario ohne landwirtschaftliche Quellen in Liechtenstein (OLW): Berechnung der Ausbreitung mit einer modifizierten Emissionskarte.
- Modellierung der Deposition: Die Gesamtdeposition von N wurde auf einem ha-Gitter berechnet. Dabei wurde soweit möglich die Methodik der Schweiz (Rihm & Künzle 2019) übernommen.
- Abschätzung grenzüberschreitender Flüsse: Da es keinen Country Report von EMEP für Liechtenstein gibt, wurden Daten von anderen Ländern als Vergleich herangezogen (siehe EMEP 2019).

2 Modellierung der NH₃-Konzentration

2.1 Emissionskarte

Im Rahmen der Flechtenkalibrierung (Herzig et al. 2020) wurde eine NH₃-Emissionskarte auf dem Hektarraster erstellt. Dabei wurde wir folgt vorgegangen:

- Landwirtschaftliche Quellen: Das AU stellte die Koordinaten der Betriebsstandorte mit Tierzahlen (Jahr 2016) zur Verfügung. Daraus wurde mit Hilfe der Gemeindegrenzen und der Bodennutzung (Arealstatistik 1996) eine Emissionskarte erstellt. Methodik und Emissionsfaktoren waren gleich wie für die Schweiz (Rihm & Achermann 2016). Das heisst, die Emissionen aus Ställen und Hofdüngerlager wurden der Standort-Hektare des Betriebes zugeordnet, und die Emissionen aus Düngerausbringung und Weide wurden auf entsprechende Landnutzungen innerhalb der Standortgemeinde verteilt.
- Verkehr: Die Gesamtfracht der NH₃-Verkehrsemissionen (aus den Daten-Tabellen von OE 2019) wurde proportional zu den Stickoxid-Emissionen aus dem NO₂-Modell (INFRAS/Meteotest 2012) verteilt.
- Haushalte, Industrie/Gewerbe, natürliche Quellen: Diese wurden in einem top-down Ansatz auf die entsprechenden Codes der Arealstatistik verteilt (siehe Rihm & Achermann 2016). Dabei wurden die Schweiz und Liechtenstein als eine Einheit bearbeitet und die Emissionen der Schweiz um 0.5 % erhöht. Dies entspricht ungefähr dem Verhältnis der Bevölkerung und der Fläche zwischen der Schweiz und Liechtenstein.

Tabelle 1 zeigt die resultierenden Emissionen pro Quellengruppe. Die Landwirtschaft hat einen Anteil von 91%, die Gesamtemission beträgt 193.7 t NH₃-N. Die Prozentanteile sind mit den Verhältnissen in der Schweiz für 2015 (Rihm & Künzle 2019) vergleichbar.

Quellengruppe	t NH ₃ -N	Anteil
Verkehr	4.5	2.3%
Industrie/Gewerbe	4.2	2.2%
Haushalte	4.3	2.2%
Abfall/Abwasser	1.3	0.7%
Natürliche Quellen	3.1	1.6%
Total nicht-Landwirtschaft	17.3	9.0%
Landwirtschaft	176.4	91.0%
Total	193.7	100.0%

Tabelle 1: NH₃-Emissionen in Liechtenstein gemäss Emissionskarte Version 2017 (Landwirtschaftliche Betriebszählung 2016, andere Quellen mit Bezugsjahr 2010).

Die Ergebnisse stimmen gut mit den Zahlen aus den Datentabellen (NFR) des Informative Inventory Report (OE 2019) überein, mit Ausnahme von Industrie/Gewerbe und der Haushalte, welche in den NFR-Tabellen fast fehlen. Die natürlichen Quellen (v.a. Wildtiere) werden im NFR nicht rapportiert.

Für die Ausbreitungsmodellierung werden auch die ausländischen Emissionen bis 50 km Distanz benötigt. Im Gebiet der Schweiz kann die Emissionskarte 2015 des BAFU (Rihm & Künzle 2019) verwendet werden, welche ebenfalls im Hektarraster vorliegt. Abklärungen des AU ergaben, dass für Österreich/Vorarlberg keine räumlich hoch aufgelösten Daten vorhanden sind. Deshalb wurden für das Gebiet von Österreich und Deutschland die EDGAR-Daten (JRC 2017) verwendet, welche als 0.1°-Raster vorliegen. Um die räumliche Zuordnung der Emissionen in Österreich und Deutschland zu verbessern, wurde zudem das Siedlungsund das Waldgebiet als emittierende Fläche ausgeschlossen, wie in Abbildung 1 ersichtlich ist.



Abbildung 1: Karte der NH₃-Emissionen in Liechtenstein und im angrenzenden Ausland. Rot eingefärbte Zellen enthalten in der Regel einen Landwirtschaftsbetrieb mit Stallemissionen.

2.2 Konzentrationskarte

Die Parametrisierung des Ausbreitungsmodelles PolluMap wurde von der Schweizer Modellierung (Rihm & Künzle 2019) übernommen. Das Modell arbeitet mit Transfer-Funktionen, welche eine Emission in Konzentrationen in der Umge-

bung der Quelle umlegen. Es wurden Transfer-Funktionen für verschiedene Regionen erstellt, wie Mittelland, Alpen sowie für die grossen Alpentäler, wo kanalisierte Windrichtungen vorherrschen. Anschliessend wurden die berechneten Werte mit rund 150 gemessenen Werte verglichen und aus den Differenzen eine statistische Korrektur (Kalibration) mit der relativen Höhe über Meer hergeleitet.

Das Schweizer Modell von 2019 enthält im süd-westlichen Teil von Liechtenstein eine Region mit Hauptwindrichtung 210°, im restlichen Teil eine Transfer-Funktion mit gleichmässig verteilten Windrichtungen. Das Ausbreitungsmodell könnte wahrscheinlich für das Gebiet von Liechtenstein durch weitere Differenzierungen verbessert werden. Dies war jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Das Ergebnis der Ausbreitungsrechnung auf dem ha-Raster ist in Abbildung 2 dargestellt. Im östlichen, höher gelegenen Landesteil sind die Konzentrationen unter 0.5 μ g/m³, in der Nähe von Landwirtschaftsbetrieben in der Ebene des Rheintals steigen sie auf über 6 μ g/m³ an.



Abbildung 2: Karte der modellierten NH₃-Konzentration und der gemessenen Werte (Mittel 2013–2017) an den vier Liechtensteiner Stationen.

In Liechtenstein existieren vier NH₃-Messstationen, die mit der modellierten Karte verglichen werden können (Tabelle 2). Die Messungen schwanken von Jahr zu Jahr, je nach Witterung. Insbesondere sind die Messwerte 2018 und 2019 relativ hoch (Seitler und Meier 2020). Da das Modell die Witterungsunterschiede von einem Jahr zum anderen nicht berücksichtigt, sollte für den Vergleich ein mehr-jähriges Mittel verwendet werden. Tabelle 2 zeigt das 5-Jahresmittel 2012–2017,

bzw. für das Ruggeller Riet (RRI), wo nur 2019 gemessen wurde, ein mithilfe der anderen Stationen auf die Periode skalierter Wert. Im Mittel lagen die Stationen Balzers, Eschen und Schaan im Jahr 2019 26 % über der Periode 2012–2017.

Zum Vergleich mit dem Modell eignet sich die Station Schaan nicht, weil sie stark verkehrsgeprägt und sehr quellennah ist, was im 100 m-Raster des Modells nur bedingt dargestellt werden kann (Rihm & Künzle, 2019, haben deshalb Messstationen, die näher als 150 m bei einem Betrieb lagen, für die Kalibration wegge-lassen). Ohne die Station Schaan liegt das Modell im Durchschnitt 34 % unter den gemessenen Werten (Tabelle 2, orange Markierung). Da die NH₃-Konzentrationen räumlich sehr heterogen und die Quellen oft nur näherungsweise bekannt sind, ist diese Übereinstimmung befriedigend. Sie weist aber darauf hin, dass die Modellergebnisse im Gebiet von Liechtenstein eher zu niedrig sein könnten.

Tabelle 2: NH₃-Messungen in Liechtenstein und Vergleich mit modellierten Werten in µg/m³. Zum Vergleich wird das Mittel der fünf Jahre 2012–2017 verwendet, bei RRI, wo nur 2019 gemessen wurde, wird der Messwert auf diese Periode skaliert (blaue Markierung).

Name	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2012- 2017	Modell	Bemerkung
Balzers	5.3	6.5	5.6	6.0	5.3	6.0	8.2	8.6	5.8	4.1	Wiese/Weide, 60 m Hauptstr.
Eschen	5.1		5.6	6.2	5.8	5.6	7.6	7.1	5.7	3.5	Wiesen, Ried
Schaan 1	5.4	5.5	5.2	5.7	5.3	5.3	5.9	5.5	5.4	2.1	verkehrsbelastet
Ruggeller Ried RRI								5.9	4.7	3.0	Naturschutzgebiet
Mittel ohne RRI				7.1	5.6		2019 ist 26% höher				
Mittel ohne Schaan									5.4	3.5	Modell ist 34% tiefer

2.3 Szenario ohne inländische Landwirtschaft (OLW)

Es wurde eine Ausbreitungsrechnung für Ammoniak durchgeführt, bei welcher die inländischen Emissionen der landwirtschaftlichen Quellen (176.4 t NH₃-N, siehe Tabelle 1) weggelassen wurden (Szenario OLW). Das Ergebnis ist in Abbildung 3 dargestellt. Damit kann der aus der Liechtensteiner Landwirtschaft stammende Anteil an den NH₃-Konzentrationen flächendeckend ermittelt werden. Die Konzentrationen bleiben in diesem Szenario landesweit unter 3 μ g/m³.

Durch die Anwendung von Depositionsgeschwindigkeiten (Vdep) wurden die aufgrund der Konzentration zu erwartenden gasförmigen NH₃-Depositionen berechnet. Die Vdep für NH₃ variieren je nach Landnutzung zwischen 5 und 30 mm/s (siehe Kapitel 3.1). Damit konnte der Anteil an der gasförmigen NH₃-Deposition im RRI aber auch in anderen empfindlichen Ökosystemen (z.B. Wald) abgeschätzt werden (siehe Kapitel 3.2). Im Landesdurchschnitt liegen die gasförmigen NH₃-Depositionen im OLW-Szenario 53 % tiefer als im Referenzszenario. Ein bedeutender Teil des Ammoniaks wandelt sich in der Atmosphäre in Ammonium um, deshalb führen NH₃-Emissionen zu trockener und nasser Deposition von partikulären bzw. gelösten Ammoniumverbindungen. In der Form von Ammonium kann der Stickstoff über sehr grosse Distanzen transportiert werden. Der Anteil der Ammonium-Deposition, der beim OLW-Szenario innerhalb des Landes wegfällt, liesse sich aufgrund der komplexen physischen und chemischen Prozesse nur sehr aufwendig modellieren. Im Kapitel 3.3 wird mit Hilfe von EMEP-Modellierungen für Nachbarländer eine grobe Abschätzung hierfür gemacht.



Abbildung 3: Karte der modellierten NH₃-Konzentration ohne die Liechtensteiner Landwirtschaftsemissionen (Szenario OLW).

3 Berechnung der Deposition

3.1 Methodik

Die Berechnung erfolgt nach der Methodik, die für die Schweiz verwendet wurde (Rihm & Künzle 2019), für sieben N-Komponenten. Die Depositionsgeschwindigkeiten für Gase und Aerosole wurden aus dem Schweizer Bericht (Rihm & Achermann 2016) übernommen; Tabelle 3 zeigt die Werte für Gase. Die noch fehlenden Input-Daten wurden pragmatisch wie folgt ergänzt:

 Die Deposition des Stickstoffdioxids (NO₂) kann mit der NO₂-Konzentrationskarte 2015 von Ostluft (INFRAS/Meteotest 2012) abgeschätzt werden.

- Die trockene Aerosol-Deposition von Ammonium und Nitrat kann mit der f
 ür die Schweiz verwendeten PM10-Karte (Rihm & Achermann 2016) berechnet werden, da diese Karte auch das Gebiet von Liechtenstein abdeckt.
- Für die Konzentration von Salpetersäure (HNO₃) in µg/m³ wurde eine empirische Funktion mit der Höhe über Meer (H, in km) erstellt. Die Höhenfunktion wurde aus der Schweizer HNO₃-Verteilung im Rheintal abgeleitet: [HNO₃] = 1.32 – 0.493 • H
 Als Grundlage diente die HNO₃-Karte von Rihm & Achermann (2016), welche jedoch mit Messungen des Jahres 2014 (Thimonier et al. 2018) neu kalibriert wurde.
- Die nasse Deposition kann mit der Methode Schweiz im Gebiet von Liechtenstein berechnet werden. Die Niederschlagskarte von MeteoSchweiz deckt auch Liechtenstein ab. Die räumliche Interpolation der Ammonium- und Nitrat-Konzentration im Regen (Rihm & Künzle 2019) wurde auf Lichtenstein ausgedehnt.

Pollutant	Land-use type	Vdep	Remarks
		mm s ⁻¹	
NH ₃	coniferous forest	30	>90% coniferous trees
	mixed forest	26	11–90% coniferous trees
	deciduous forest	22	>90% deciduous trees
	unproductive vegetation	20	includes wetlands (fens, bogs)
	meadows, pastures	12	includes dry grassland (TWW)
	cropland, grassland	10	intensely managed, fertilized
	settlements	8	buildings/surroundings, transportation areas
	surface water	8	lakes, rivers
	bare land	5	rocks, sand, glaciers
NO ₂	coniferous forest	4	>50% coniferous trees
	deciduous forest	3	>50% deciduous trees
	non-forest	1.5	
HNO ₃	all	15	

Tabelle 3:	Depositionsgeschwindigkeiten (Vdep) gasförmiger N-Komponenten
	(Rihm & Achermann 2016).

Die Depositionen wurden auf den 16'046 Gitterpunkten eines ha-Rasters berechnet. Die Landnutzung pro Hektare (Arealstatistik 1996) sowie der Waldmischungsgrad zur Unterscheidung von Nadel-, Misch- und Laubwald stammen aus einer früheren Datenlieferung des Amtes für Umwelt (AU 2002).

3.2 Deposition in Liechtenstein

Das Bezugsjahr der verschiedenen Datensätze ist etwas heterogen. Insgesamt kann man davon ausgehen, dass die Depositionskarte im Mittel dem Jahr 2015 entspricht, wobei für die Nassdeposition das Mittel der Periode 2013-2017 berechnet wurde.

Die gesamte N-Deposition beträgt 266.5 t N (Abbildung 4). Davon sind 174.7 t reduzierte N-Verbindungen (NHy-N) und 91.9 t oxidierte N- Verbindungen (NOy-N); die gasförmige NH₃-Deposition hat einen Anteil von 34 % (Tabelle 4). Typische jährliche Depositionswerte in der Ebene des Rheintals liegen zwischen 20 und 40 kg N/ha. Mit der Höhe nehmen die Depositionen ab und liegen auf 2500 m Höhe bei etwa 5 kg N/ha. Die mittlere jährliche Deposition ist mit 16.6 kg N/ha rund 10 % höher als in der Schweiz, was unter Berücksichtigung der geografischen Lage (kleinerer Anteil alpiner Flächen über 2000 m) realistisch ist. Abbildung 4 zeigt auch die Deposition im angrenzenden Gebiet der Schweiz, welche ebenfalls auf einem ha-Gitter berechnet wurde. Die Depositionen beidseits der Grenze scheinen konsistent zu sein.

Abbildung 4: Karte der modellierten N-Deposition auf dem ha-Raster, Jahr 2015. Die Werte auf Schweizer Gebiet stammen vom BAFU (Rihm & Künzle 2019).

2013.				
Komponente	t N	Anteil	kg N/ha	CH: kg N/ha
NH₄ ⁺ nass	67.7	25%	4.2	3.9
NH4 ⁺ trocken	15.4	6%	1.0	0.7
NH ₃ gasförmig	91.6	34%	5.7	5.5
Total NH _y -N:	174.7	66%	10.9	10.1
NO ₃ ⁻ nass	42.2	16%	2.6	2.5
NO ₃ ⁻ trocken	6.2	2%	0.4	0.3
NO ₂ gasförmig	30.3	11%	1.9	1.5
HNO ₃ gasförmig	13.2	5%	0.8	0.5
Total NO _y -N:	91.9	34%	5.7	4.8
Total N	266.5	100%	16.6	15.0

Tabelle 4: Deposition von sieben N-Komponenten in Liechtenstein und zum Vergleich die mittlere N-Deposition pro Hektare in der Schweiz; Jahr 2015.

Im OLW-Szenario (Abbildung 3) beträgt die gasförmige NH_3 -Deposition noch 43.2 t N, d.h. 53 % weniger als im Referenzzustand 2015.

3.3 Grenzüberschreitende Flüsse nach EMEP

Der Anteil der Liechtensteiner Landwirtschaft an der gasförmigen NH₃-Deposition konnte durch die Modellierung des OLW-Szenarios (siehe Kapitel 2.3) abgeschätzt werden. Jedoch kann der Beitrag der landwirtschaftlichen NH₃-Quellen Liechtensteins zur nassen und trockenen Ammoniumdeposition mit dem vorhandenen Ansatz (Rihm & Künzle 2019) nicht modelliert werden: Da diese Komponenten direkt durch Depositionsmessungen erfasst und räumlich interpoliert wurden, ist die Zurückverfolgung zu den Quellen nicht möglich. Um die Umwandlung des emittierten Ammoniaks zu Ammonium und andere Prozesse in der Atmosphäre zu berechnen, werden komplexe Chemie-Transport-Modelle (CTM) benötigt. Es wird deshalb auf Ergebnisse des europäischen CTM-Modells von EMEP (2019) zurückgegriffen, um die ausländischen Anteile der Ammoniumdeposition abzuschätzen.

In den Country Reports von EMEP (2019) sind folgende Modellergebnisse betreffend grenzüberschreitende Flüsse von reduziertem Stickstoff (NHy) für einzelne Länder angegeben:

- **NHy %Depo**: Prozentanteil der NHy-Depositionen im Land, welche aus dem Land selbst stammen (Binnendeposition).
- NHy %Emis: Prozentanteil der NHy-Emissionen des Landes, welche im Inland deponiert werden (Binnendeposition).

Dabei handelt es sich absolut gesehen (in t NHy-N/Jahr) zweimal um die gleiche N-Menge (hier Binnendeposition genannt), welche einmal in Prozent der Deposi-

tion und einmal in Prozent der Emission ausgedrückt wird. Da EMEP leider für Liechtenstein keinen Country Report publiziert, wurden die Reports anderer Länder ausgewertet. Es ist zu erwarten, dass die Binnendeposition unter anderem von der Landesfläche abhängt, da im Allgemeinen die durch eine bestimmte Quelle erzeugte Deposition in der Nähe der Quelle am grössten ist.

Dies wurde bei der Auswertung von Luxemburg (LU), Slowenien (SL), Schweiz (CH), Tschechien (CZ), Österreich (AT), Polen (PL) und Deutschland (DE) bestätigt (siehe Abbildung 5): Es gibt einen klaren linearen Zusammenhang von NHy %Depo (ähnlich auch von %Emis) mit der Landesfläche (R²=0.44), wobei die Schweiz über dem erwarteten Wert liegt. Ohne die Schweiz steigt R² auf 0.94. Der überproportional hohe Binnenanteil der Schweiz kann wahrscheinlich mit der grossen Gebirgsfläche und mit der topografischen Abgeschlossenheit des Mittellandes, wo die meisten Emissionen stattfinden, erklärt werden.

Für NOy sind die Ergebnisse ähnlich; NOy ist jedoch in der Atmosphäre mobiler und der Ferntransport ist bedeutender als bei NHy, da die Depositionsgeschwindigkeiten für NO₂ viel kleiner sind als für NH₃ (siehe Tabelle 3). Zum Beispiel beträgt NOy %Depo für die Schweiz nur 31 % gegenüber 67 % für NHy %Depo.

Abbildung 5: Binnendeposition ausgedrückt als %Depo für NHy in Abhängigkeit der Landesfläche in sieben Ländern (EMEP 2019). Die Fläche ist auf einer logarithmischen Skala dargestellt. Die blaue Regressionskurve ist inklusive Schweiz.

Die lineare Regression inklusive Schweiz aus Abbildung 5 ergibt für Liechtenstein (Fläche 160 km²) einen %Depo-Wert von 40 %. Die Regressions-Variante ohne Schweiz ergibt für Liechtenstein 32 %. Der höhere Wert von 40 % erscheint plausibel, wenn man annimmt, dass in Liechtenstein der Topografie-Effekt der Tallage analog zur Schweiz eine gewisse Rolle spielt. Zudem ergibt allein schon der Beitrag der gasförmigen NH₃-Deposition, welcher aus dem OLW-Szenario berechnet werden kann, einen Wert von mindestens 30 % für NHy %Depo¹.

Die 40 % der NHy-Depositionen in Liechtenstein, welche demnach aus inländischen Quellen stammen (%Depo), entsprechen bei einer gesamten NHy-Deposition von 174.7 t N/Jahr (Tabelle 4) einer Binnendeposition von 69.9 t NHy-N. Die restlichen Depositionen von 104.8 t NHy-N/Jahr stammen aus dem Ausland. Die Binnendeposition von 69.9 t NHy-N entspricht 36 % der Liechtensteiner Emissionen (193.7 t N/Jahr, siehe Tabelle 1); die 36 % sind der Wert für %Emis.

Im Szenario OLW betragen die jährlichen Emissionen (nur nicht-landwirtschaftliche Quellen) in Liechtenstein noch 17.3 t NHy-N und die Binnendeposition %Emis von 36% entspricht 6.3 t NHy-N. Zusammen mit der unveränderten importierten Deposition von 104.8 t NHy-N ergibt sich eine Soll-NHy-Deposition von 111.1 t N für den OLW-Zustand. Davon werden 43.2 t N gasförmig als NH₃ deponiert (Kapitel 3.2) und somit bleibt für die partikuläre und nasse Ammonium-Deposition noch 67.9 t N. Im Referenz-Zustand 2015 beträgt die Ammonium-Deposition 83.1 t N (Summe NH_4^+ nass und trocken aus Tabelle 4). Im OLW-Szenario wird also die Ammonium-Deposition gegenüber der Referenz um den Faktor 0.82 reduziert (=67.9/83.1).

3.4 Deposition im Ruggeller Riet

Das Naturschutzgebiet (NSG) Ruggeller Riet liegt an der Nordspitze von Liechtenstein, direkt an der Grenze zu Österreich. Tabelle 5 zeigt die modellierten Werte für 2015 und für das Szenario ohne landwirtschaftliche Quellen in Liechtenstein (OLW) an zwei verschiedenen Punkten im NSG. Punkt A befindet sich direkt an der Grenze zu Österreich bei der Messstation RRI. Punkt B befindet sich am westlichen Rand des NSG, also näher bei den Liechtensteiner Ammoniakquellen.

Die im OLW-Szenario reduzierten NHy-Depositionen sind in Tabelle 5 als Faktoren angegeben, also 0.82 für die Ammonium-Deposition (nass und trocken) gemäss Kapitel 3.3. Die modellierte Konzentration mit OLW (siehe Abbildung 3) beträgt bei Punkt A 2.1 μ g/m³, also 30 % weniger als im Modell 2015. Bei Punkt B ist die OLW-Konzentration 56 % tiefer, d.h. die Liechtensteiner Landwirtschaftsquellen tragen dort 56 % zur gasförmigen NH₃-Deposition bei.

Somit wird die gesamte NHy-Deposition im OLW-Szenario um 27 % bis 48 % reduziert, und bei unverändertem NOy der Gesamteintrag von Stickstoff um 21 % bis 39 %.

¹ Der Wert von 30% ist das Verhältnis der durch inländische Emissionen erzeugten NH₃-Deposition zur gesamten NHy-Deposition (174.7 t N, Tabelle 4). Die inländisch erzeugte NH₃-Deposition ist die Differenz der gasförmigen NH₃-Deposition im Referenz- und im OLW-Szenario (48.4 t N) plus den Anteil der nicht-landwirtschaftlichen Quellen (4.8 t N), welcher näherungsweise berechnet wurde (ohne Ausbreitungsmodell).

Tabelle 5: Modellierte N-Depositionen am Messstandort Ruggeller Riet (RRI) und an einem Hektarpunkt am Westrand des Naturschutzgebietes. OLW ist das modellierte Szenario ohne Liechtensteiner Landwirtschaftsquellen.

Komponenten	A: Messstation RRI B: Westrand NSG					3
Einheiten: kg N/(ha Jahr)	Modell 2015	Modell OLW	Faktor OLW/2015	Modell 2015	Modell OLW	Faktor OLW/2015
NH4 ⁺ nass	4.3	3.5	0.82	4.3	3.5	0.82
NH4 ⁺ trocken	0.6	0.5	0.82	0.6	0.5	0.82
NH ₃ gasförmig	15.6	10.9	0.70	20.0	8.9	0.44
Total NH _y -N	20.5	14.9	0.73	24.9	12.9	0.52
NO ₃ ⁻ nass	2.7	2.7	1.00	2.7	2.7	1.00
NO ₃ ⁻ trocken	0.2	0.2	1.00	0.2	0.2	1.00
NO2 gasförmig	2.0	2.0	1.00	2.1	2.1	1.00
HNO3 gasförmig	1.2	1.2	1.00	1.2	1.2	1.00
Total NO _y -N	6.1	6.1	1.00	6.2	6.2	1.00
Total N	26.5	21.0	0.79	31.0	19.0	0.61

4 Fazit

Die aus Emissions- und Höhendaten mit einem auf die Schweiz kalibrierten Modell berechneten Konzentrationskarten zeigen eine realistische NH₃ Konzentrationsverteilung mit höheren Werten in der Nähe von Emittenten und niedrigeren Werten im östlichen, gebirgigen Landesteil. Verglichen mit gemessenen Immissionen scheint das Modell jedoch die Konzentrationen um 34 % zu unterschätzen. Nichtsdestotrotz wurde die berechnete Konzentrationskarte als Referenzszenario verwendet und mit dem Szenario ,ohne Liechtensteiner Landwirtschaft' verglichen.

Modelliert man die NH₃ Konzentrationen analog zum Referenzszenario jedoch ohne die landwirtschaftlichen Quellen, ergeben sich landesweit Konzentrationen unter 3 μ g/m³. Als N-Deposition ausgedrückt, wäre die durch Ammoniak allein verursachte NH₃-N-Deposition 53 % kleiner als im Referenzszenario.

Im Referenzszenario ergibt sich eine mittlere jährliche N-Deposition von 16.6 kg N/ha. Dabei ist der Anteil der reduzierten N-Verbindungen bei 2/3; alleine das gasförmige NH_3 steuert 34 % bei (vergleiche Tabelle 4).

Zur Abschätzung der Deposition von partikulärem Ammonium im Szenario ohne Liechtensteiner Landwirtschaft wurde anhand der EMEP Modellierungen für be-

nachbarte vergleichbare Länder ein Binnenanteil für reduzierte Stickstoffverbindungen (NH_y-N) von 40 % angenommen. Die so gewonnenen Ergebnisse des Szenarios OLW (ohne NH₃- Emissionen der Liechtensteiner Landwirtschaft) zeigen mit 111.1 t NHy -N gegenüber 174.7 t NHy-N, eine im Mittel um 36 % verringerte NHy-Deposition in Liechtenstein. Die Gesamt-N Deposition verringert sich im Mittel um 24 %.

Für das Ruggeller Riet wurden zwei Standorte genauer betrachtet: Zum einen die Modellergebnisse für den Standort der Messstation von 2019 und einen Punkt am Westrand des Naturschutzgebietes. Die mittlere jährliche Deposition an den beiden Orten entsprechend des Referenzszenarios betragen 26.5 und 31.0 kg-N/ha. Im Szenario OLW verringern sich diese Depositionen auf 21.0 und 19.0 kg-N/ha. Dies deutet darauf hin, dass die Emissionen der Liechtensteiner Landwirtschaft für bis zu 39 % der N-Einträge im Ruggeller Riet verantwortlich sind.

Die Auswertung der EMEP-Ergebnisse betreffend Import und Export der Luftschadstoffe hat gezeigt, dass ungefähr 36% der Liechtensteiner NH₃-Emissionen als Binnendeposition innerhalb des Landes deponiert werden, demnach werden 64% der Emissionen exportiert. Umgekehrt stammen 60% der NHy-Depositionen in Liechtenstein aus dem Ausland. Sowohl bei NHy wie auch bei NOx ist Liechtenstein ein Netto-Exporteur, d.h. die Differenz von Emission minus Deposition innerhalb des Landes ist positiv.

Daher ist eine Emissionsreduktion in Liechtenstein nicht nur hinsichtlich inländischer Ökosysteme sinnvoll, sondern ebenso in Bezug auf den Schutz der Ökosysteme im Ausland. Dies ist der Grund, warum die UNECE Konvention zur weiträumigen, grenzüberschreitenden Luftverunreinigung ins Leben gerufen wurde.

5 Literatur

AU 2002: Arealstatistik 1996 und Waldmischungsgrad 1992 für das Fürstentum Liechtenstein. Pers. comm. Datenlieferung von Manfred Nipp, Amt für Umwelt (AU), 5.4.2002 Vaduz, an Beat Rihm, Meteotest, Bern.

BZG 2001: Grundlagenstudie zur Hydrologie, Bodenbeschaffenheit und Agrarnutzung im Naturvorranggebiet des Ruggeller Rietes. Botanisch-Zoologische Gesellschaft Liechtenstein-Sargans-Werdenberg e.V. (BZG), in Zusammenarbeit mit RENAT AG, OePlan GmbH und Klaus Büchel Anstalt.

EMEP 2019: Transboundary air pollution by main pollutants (S, N, O₃) and PM in 2017 – Switzerland. MSC-W Data Note 1/2019 Individual Country Reports. <u>https://www.emep.int/mscw/mscw_publications.html</u>

Herzig R., Schindler C., Urech M., Rihm B., Lötscher H.P., Thomann G. 2020 (accepted): Recalibration and validation of the Swiss Lichen Bioindication Methods for air quality assessment. Environmental Science and Pollution Research, ESPR-D-19-06112R2.

INFRAS/Meteotest 2012: NO₂-Immissionen Ostluft / Liechtenstein. Modell und Resultate 2005–2020. Schlussbericht im Auftrag von OSTLUFT. <u>https://www.ostluft.ch/fileadmin/intern/LZ_Information/Publikationen/Fachberichte</u> /BE_NO2_Ostluft_Modell_PT_20121127.pdf

INFRAS/Meteotest 2013: Feinstaubimmissionen Ostluft / Liechtenstein. Modell und Resultate 2005–2020. Schlussbericht im Auftrag von OSTLUFT. <u>https://www.ostluft.ch/fileadmin/intern/LZ_Information/Publikationen/Fachberichte</u> /BE_PM_Ostluft_Modell_PT_20130215.pdf

JRC 2017: EDGAR – Emissions Database for Global Atmospheric Research. EU Joint Research Centre (JRC). Download of NH3 data from <u>http://edgar.jrc.ec.europa.eu/gallery.php?release=v431_v2&substance=NH3&sec</u> <u>tor=TOTALS</u>

OE 2019: Liechtenstein's Informative Inventory report 2019. Submitted under the UNECE Convention on Long Range Transboundary Air Pollution, CLRTAP. Office of Environment (OE), Vaduz.

https://www.ceip.at/ms/ceip home1/ceip home/status reporting/2019 submissions

Rihm B., Achermann B. 2016: Critical Loads of Nitrogen and their Exceedances. Swiss contribution to the effects-oriented work under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE). Federal Office for the Environment, Bern. Environmental Studies no. 1642: 78p. <u>https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/air/publications-</u> <u>studies/publications/Critical-Loads-of-Nitrogen-and-their-Exceedances.html</u> **Rihm, B., Künzle T., 2019**: Mapping Nitrogen Deposition 2015 for Switzerland. Technical Report on the Update of Critical Loads and Exceedance, including the years 1990, 2000, 2005 and 2010. Meteotest, Bern, commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN).

https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/air/publicationsstudies/studies.html

Seitler E., Meier M., 2020: Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz 2000 bis 2019, Messbericht. FUB – Forschungsstelle für Umweltbeobachtung, Rapperswil. <u>https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien.html</u>

Thimonier A., Kosonen Z., Braun S., Rihm B., Schleppi P., Schmitt M., Seitler E., Waldner P., Thöni L. 2018: Total deposition of nitrogen in Swiss forests: Comparison of assessment methods and evaluation of changes over two decades. Atmospheric Environment 198 (2019) 335–350. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.051

UNECE 2017: Manual for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels. Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE). <u>https://www.umweltbundesamt.de/en/manual-for-modelling-mapping-critical-loads-levels</u>

6 Begriffe, Abkürzungen

AU: Amt für Umwelt Liechtenstein, Vaduz

BAFU: Bundesamt für Umwelt, Bern

CLN: Critical Load für Stickstoff

EDGAR: Emissionsdatenbank des JRC (2017)

HNO₃: Salpetersäure

N: (reaktiver) Stickstoff

NFR: Nomenclature for Reporting; Tabellen zur Berichterstattung von Emissionen

- NH₃: Ammoniak (Gas)
- NH₄⁺: Ammonium
- **NHy**: reduzierte Stickstoff-Komponenten (NH₃, NH₄⁺)
- NOy: oxidierte Stickstoff-Komponenten (NO₂, NO₃⁻, HNO₃)
- **NO₂:** Stickstoffdioxid (Gas)

NO₃⁻: Nitrat

- RRI: Ruggeller Riet, Messstation für Ammoniak und N-Einträge
- Vdep: Depositionsgeschwindigkeit