



Flechtenvegetation und Stickstoffbelastung:

Zeitlich und räumlich differenzierte Datenanalyse anhand epidemiologischer Methoden

Projektbericht
zuhanden des BAFU, Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien,
Sektion Luftqualität, Bern

30. Januar 2015

Verfasst von:
Dr. Martin Urech, puls Umweltberatung, Bern

In Zusammenarbeit mit:
PD Dr. Christian Schindler, Swiss TPH, Universität Basel
PD Dr. Martin Rösli, Swiss TPH, Universität Basel
Dr. Denis Infanger, Swiss TPH, Universität Basel
Beat Rihm, Meteotest, Bern
Dr. Kathrin Peter, >Evaluationen, Bern

Projektbegleitung am BAFU:
Beat Achermann, Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien

Umweltberatung

Dr. Martin Urech
Mühlemattstrasse 45
CH-3007 Bern
Tel. +41 (0)31 372 20 28
info@pulsbern.ch
www.pulsbern.ch

Inhalt

1. Zusammenfassung	3
2. Einleitung	6
3. Ziel	8
4. Daten und Methode	9
4.1. Flechtendaten	9
4.2. Immissions- und Klimadaten	14
4.3. Auswertungsmethoden	14
5. Optimierung des Flechtenwertes zur Ammoniakanzeige	15
5.1. Validierung des bisherigen NH ₃ Score	15
5.2. Neuberechnung des NH ₃ Score	16
6. Zusammenhänge zwischen den Flechtenwerten und Umweltdaten	18
6.1. NH ₃ Score	20
6.2. Nitroindex	22
6.3. IAP18	24
6.4. Entropie	27
7. Untersuchungen der zeitlichen Zusammenhänge	29
7.1. Datenanalyse Appenzell Ausserrhoden	29
7.2. Veränderungsmodelle	31
8. Untersuchungen zu einem Critical Level für Ammoniak	32
8.1. Methoden der statistischen Auswertung	32
8.2. Identifikation nitrophober und nitrophiler Flechten	34
8.3. Vorkommen von <i>Hypogymnia physodes</i> in Abhängigkeit der NH ₃ -Konzentration	35
8.4. Vorkommen anderer nitrophober Flechten in Abhängigkeit der NH ₃ -Konzentration	36
8.5. Entropie nitrophober Flechten in Abhängigkeit der NH ₃ -Konzentration	37
8.6. Prognose des Vorkommens nitrophober Flechten bis 2030	38
8.7. Fazit zu einem Critical Level für Ammoniak	39
9. Schlussfolgerungen	41
9.1. Rahmenbedingungen und Einschränkungen	41
9.2. Fazit der Auswertungen	43
10. Literaturverzeichnis	45
Anhang 1	48
Anhang 2	56

1. Zusammenfassung

Seit 1990 zeigen Flechtenuntersuchungen in der Schweiz, dass die stickstoffliebende Flechtenvegetation stark zugenommen hat. In anderen Ländern gibt es ähnliche Beobachtungen. Mit statistischen Datenanalysen wird deshalb der Zusammenhang zwischen den Flechten und Stickstoffimmissionen sowie weiteren Umweltdaten untersucht.

In zwei Vorstudien konnte ein räumlicher Zusammenhang zwischen Flechten und modellierten Stickstoffdaten (Konzentration gasförmiger Komponenten sowie trockene und nasse Deposition) nachgewiesen werden. Diese Befunde werden anhand eines wesentlich grösseren Datenkollektivs überprüft. Zusätzlich wird untersucht, ob sich neben dem räumlichen Zusammenhang auch die zeitliche Entwicklung der Flechten mit den Immissions- und Klimadaten erklären lassen. Schliesslich wird auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse zum Vorkommen von nitrophoben Flechtenarten ein Critical Level für Ammoniak zum Schutz der Flechten hergeleitet.

Die Studie basiert auf Flechtendaten von 7068 Bäumen, welche in den Jahren 1988 bis 2010 mit der Kalibrierten Flechtenindikationsmethode im Rahmen von kantonalen und städtischen Projekten untersucht wurden. Aus diesen Daten werden die vier Flechtenwerte NH₃Score, Nitroindex, IAP18 und Entropie für drei Zeitabschnitte zwischen 1988 und 2010 berechnet, im Falle des NH₃Score auch für die gesamte Zeitperiode. Zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den Flechtenwerten und Umweltdaten werden für jeden Baumstandort verschiedene modellierte Immissions- und Klimadaten verwendet: SO₂, NH₃ (Konzentration), NH₃gas (trockene Deposition), PM10, Ozon, NO₂, Höhe, Temperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Niederschlag, Globalstrahlung, potenzielle Evaporation und Kontinentalität.

Die Untersuchungen erfolgen primär anhand multivariater Regressionsanalysen.

Mit dem für die gesamte Zeitperiode 1988 bis 2010 und für drei Zeitabschnitte innerhalb dieser Periode gebildeten Flechtenwert NH₃Score können die modellierten Ammoniakwerte gut abgebildet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Übereinstimmung in den einzelnen untersuchten Zeitperioden unterschiedlich hoch ist. Auch der für die gesamte Zeitperiode ermittelte NH₃Score zeigt eine unterschiedlich hohe Übereinstimmung mit der modellierten NH₃-Belastung bei der Anwendung auf einzelne Zeitabschnitte.

In einem weiteren Schritt wird der Einfluss weiterer Umweltparameter auf den NH₃Score untersucht. Dabei kann gezeigt werden, dass der NH₃Score hauptsächlich von der NH₃-Belastung abhängt. In einzelnen Zeitperioden erklären daneben aber weitere Umweltvariablen ebenfalls einen wesentlichen Teil der Variabilität im NH₃Score. Für die früheren Zeitperioden bestätigt sich eine zusätzliche Suppressionswirkung von SO₂ auf nitrophile Flechten und somit auf den NH₃Score und den Nitroindex. Diese Wirkung konnte allerdings bei den jüngsten Daten aus den Jahren 2002 bis 2010 nicht mehr beobachtet werden. Als Folge dieser nachgewiesenen Interaktion mit SO₂ kann aus der zeitlichen Entwicklung des NH₃Score und des Nitroindex nicht direkt auf die zeitliche Entwicklung der Immissionen mit N-haltigen Luftschadstoffen über die vergangenen Jahrzehnte geschlossen werden.

Der Nitroindex, ein aufgrund von Expertenwissen festgelegter Flechtenwert, zeigt vergleichbare Beziehungen zu den Umweltvariablen wie der NH₃Score. Quantitativ fällt der Zusammenhang zu den Umweltvariablen, insbesondere auch zum Ammoniak, geringer aus als beim NH₃Score.

Die Zusammenhänge der Umweltdaten zu den beiden andern Flechtenwerten IAP18 und Entropie sind schwieriger zu interpretieren. Es zeigen sich verschiedenen Abhängigkeiten zu den Umweltdaten, der Einfluss von Störeffekten über kofundierte Variablen konnte nicht ausgeschlossen werden.

Insgesamt bestätigen die erzielten Resultate Zusammenhänge zwischen den aus den Flechtendaten berechneten Flechtenwerten (NH₃Score, Nitroindex, IAP18, Entropie) und den Daten der Luftschadstoff-Immissionen. Die für einen bestimmten Zeitabschnitt gefundenen Zusammenhänge können aber nicht ohne weiteres auf andere Zeitabschnitte übertragen werden. Daneben zeigen vereinzelt auch Klimavariablen einen Einfluss auf die Flechtenwerte. Diese Variablen sind aber mehr oder weniger stark mit Luftschadstoffen korreliert, so dass auch hier der Effekt möglicherweise durch Luftschadstoffe mitverursacht ist. Als Folge dieser teilweise starken Korrelationen kann umgekehrt aber auch nicht ausgeschlossen werden, dass die mit Luftschadstoffen in Beziehung gesetzten Wirkungen teilweise auf Klima- und Standorteinflüsse zurückzuführen sind.

Bei der Interpretation der Daten müssen verschiedene methodische Rahmenbedingungen und Einschränkungen berücksichtigt werden. So sind die untersuchten 7068 Bäume inhomogen über den Untersuchungszeitraum verteilt, was die Resultate beeinflusst und die Interpretation erschwert.

Als weitere Einschränkung muss beachtet werden, dass die modellierten Immissionsdaten im Schweizerischen Durchschnitt zwar gut mit gemessenen Daten übereinstimmen, lokal jedoch mit beträchtlichen Unsicherheiten zu rechnen ist. Zudem können kleinräumige Schwankungen am Baumstandort (Mikroklima) die Abweichungen weiter vergrössern. Auch ist davon auszugehen, dass die Zusammenhänge zwischen Flechten, Klima und Schadstoffen sehr komplex sind und Interaktionen zwischen den Flechten und Umweltvariablen die statistischen Auswertungen erschweren. Möglicherweise spielt auch ein Hysterese-Effekt eine Rolle: Die Flechtenentwicklung kann neben den Umweltvariablen auch vom eigenen Ausgangszustand beeinflusst werden und deshalb bei gleichen Umweltbedingungen verschiedene Entwicklungswege durchschreiten.

Eine Erhöhung der Aussagekraft aktueller Flechtendaten könnte eine erneute Eichung der Flechtenwerte mit Immissionsdaten an kontinuierlich messenden Luftmessstationen bringen (NABEL-Stationen, kantonale Stationen). Diese gäbe Aufschluss darüber, wie und mit welcher Aussagekraft die Flechten unter den heute vorherrschenden Luftbelastungs- und Klimabedingungen zur Anzeige der Luftqualität, d.h. der gesamten Luftbelastung und auch zur Anzeige von Einzelschadstoffen wie Ammoniak, verwendet werden können.

Denkbar ist auch, den Ansatz der vorliegenden Studie auszubauen, indem in regelmässigen zeitlichen Abständen das Flechtenvorkommen auf einem gezielt stratifizierten Stichprobennetz erhoben und in multivariaten Analysen zusammen mit modellierten Luftschadstoffbelastungen, Klimadaten und anderen Umweltfaktoren untersucht würde, mit dem Ziel, den Einfluss von Luftschadstoffbelastungen besser von weiteren Umwelteinflüssen abgrenzen zu können.

Schliesslich wurde anhand des Vorkommens von nitrophoben Flechtenarten und den modellierten Ammoniakdaten postuliert, dass ein Critical Level für Ammoniak wesentlich unter einem Wert von $3.3 \mu\text{g NH}_3/\text{m}^3$ liegen müsste. Damit wird bestätigt, dass die von CAPE et al. (2009) geforderte Senkung des UNECE Critical Levels für Flechten und Moose von $8 \mu\text{g NH}_3/\text{m}^3$ auf $1 \mu\text{g NH}_3/\text{m}^3$ (Jahresmittelwert) in die richtige Richtung zielt.

2. Einleitung

Untersuchungen mit baumbewohnenden Flechten als Bioindikatoren zeigen, dass seit einigen Jahren stickstoffliebende Flechten zunehmen. Als Ursache für diese Zunahme werden stickstoffhaltige Immissionen vermutet. Im Auftrag des BAFU wurden erste Datenanalysen zum Zusammenhang zwischen der Flechtenvegetation und der Stickstoffbelastung vorgenommen (PULS & EVALUATIONEN 2006 und 2008).

Die wichtigsten Resultate dieser Untersuchungen sind:

- Die Flechtendaten zeigen einen klaren Zusammenhang zur Stickstoffbelastung. Dabei zeigte die Deposition von gasförmigem Ammoniak den grössten Zusammenhang zum Nitroindex der Flechten. Die Spezifität des Nitroindex auf die NH_3 -Deposition war aber im Jahr 1990 kleiner als im Jahr 2000. 1990 waren neben NH_3 auch mehrere andere Schadstoffe für die Ausprägung des Nitroindex mitverantwortlich, weshalb die Änderung des Nitroindex von 1990 bis 2000 nicht allein auf Änderungen der NH_3 -Belastung zurückgeführt werden konnte.
- Basierend auf modellierten Immissionsdaten für das Jahr 2000 wurden Flechtenindices für eine Gesamtstickstoffanzeige (N_{tot} Score) und eine Ammoniakanzeige (NH_3 Score) postuliert.
- Diese Werte zeigen für die Daten von 2000 eine hohe Abhängigkeit von den modellierten Stickstoffdaten und einen deutlich geringeren Zusammenhang zu anderen Immissions- und Klimadaten.

Bisher konnten nur modellierte Depositionsdaten für das Jahr 2000 in die Untersuchungen einbezogen werden. In der Zwischenzeit wurden Immissionsdaten für die Jahre zwischen 1986 und 2010 modelliert, welche neu in die Untersuchungen integriert werden können. Durch die zeitliche Erweiterung der Depositionsdaten können auch deutlich mehr Flechtendaten in die Untersuchungen einbezogen werden.

Schon 1999 hat VAN HERK den Zusammenhang zwischen der Ammoniak-Belastung der Luft und der Flechtenvegetation aufgezeigt und darauf hingewiesen, dass auch weitere Parameter (Schadstoffe, Klima, Exposition) zu berücksichtigen sind. In Deutschland haben FRAHM et al. 2009 nachgewiesen, dass Ammoniak die relevante Stickstoffquelle für Flechten ist. Sie haben auch gezeigt, dass nitrophytische Flechten nicht nur Stickstoffzeiger sondern auch Trockenheitszeiger sind, weshalb eine Zunahme der Nitrophyten nicht gleichzeitig auch eine Zunahme der Stickstoffbelastung bedeuten muss.

Verschiedene weitere Autoren weisen auf den Zusammenhang der zunehmend nitrophytischen Flechtenvegetation und der stickstoffhaltigen Immissionen hin (BARTHOLMESS et al., 2011 und 2012, KIRSCHBAUM et al., 2010). Als weitere mögliche Ursachen für die Zunahme der nitrophytischen Flechtenvegetation postulieren diese Arbeiten den Rückgang der Immissionen von SO_2 und NO_x , die Temperaturerhöhung und den Stickstoffanteil in der Feinstaubbelastung. PINHO et al. (2011) und JOHANSSON et al. (2012) zeigen einen drastischen Rückgang der nitrophoben Flechten und der Flechtendiversität bei steigender Stickstoffbelastung.

Durch den Einbezug einer breiten Palette von Umweltdaten, d. h. von Immissions- und Klimadaten, in unsere Analysen werden die Zusammenhänge zwischen der Flechtenvegetation und all diesen in der Literatur genannten sowie weiteren Einflussfaktoren geprüft. Insbesondere werden neben der räumlichen Differenzierung auch Entwicklungen in der zeitlichen Dimension untersucht.

3. Ziel

Statistische Datenanalysen sollen den Zusammenhang zwischen verschiedenen Immissions- und Klimadaten einerseits und der Flechtenvegetation andererseits aufzeigen. Insbesondere soll die beobachtete Zunahme der stickstoffliebenden Flechten untersucht werden.

Ein räumlicher Zusammenhang zwischen Flechten und modellierten Stickstoffdaten konnte für das Jahr 2000 nachgewiesen werden. Neu sind Daten für die Zeitspanne zwischen 1988 und 2010 verfügbar, der Zusammenhang kann nun auch in zeitlicher Dimension überprüft werden.

Anhand der neuen Daten soll untersucht werden,

- ob sich auch für andere Zeitpunkte, insbesondere die Jahre 1988 und 2010, ein ähnlicher Zusammenhang zwischen Flechten und Immissions- und Klimadaten nachweisen lässt und so die anhand der Daten von 2000 postulierten Flechtenindices konsolidiert werden können, und
- ob sich die zeitlichen Veränderungen der Flechtenvegetation zwischen 1988 und 2010 durch zeitliche Veränderungen in den Immissions- und Klimadaten erklären lassen.

In der Zeitspanne von 1988 bis 2010 haben sich die einzelnen Schadstoffe unterschiedlich entwickelt. So haben beispielsweise die Schwefelbelastung in der Schweiz sehr stark (Emissionsabnahme um 78%), die Belastung mit Stickoxiden mittel (Emissionsabnahme um 51%) und jene mit Ammoniak weniger ausgeprägt (Emissionsabnahme um 17%) abgenommen. Bei der Ozonbelastung haben vor allem die Spitzenbelastungen abgenommen, während bei den mittleren Belastungen kaum Veränderungen beobachtet werden konnten (FOEN 2014, BAFU 2013).

Es stellt sich die Frage, ob die Zunahme der stickstoffliebenden Flechten durch direkte Wirkungen einzelner Schadstoffe, durch Interaktionen zwischen mehreren Schadstoffen und Klimafaktoren und/oder durch das Verschwinden einer Suppressionswirkung einzelner, insbesondere SO_2 , oder mehrerer Schadstoffe verursacht wurde.

Durch den Vergleich der Daten von gegenüber Stickstoff empfindlichen (nitrophoben) Flechtenarten mit den Ammoniakdaten sollen Hinweise für einen Critical Level der Ammoniakbelastung für Flechten gewonnen werden.

4. Daten und Methode

4.1. Flechtendaten

Die Flechtendaten stammen aus Kartierungen, welche von 1988 bis 2010 mit der kalibrierten Flechtenindikationsmethode in 17 Regionen der Schweiz erfolgten. Diese Methode wurde im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms 14 „Lufthaushalt und Luftverschmutzung in der Schweiz“ an der Universität Bern entwickelt (URECH et al. 1988). Die Methode wurde mit technischen Immissionsmessdaten geeicht und wird deshalb als kalibrierte Flechtenindikationsmethode bezeichnet. Seither wurden alle Erhebungen in der Schweiz mit der identischen Methode erhoben und ausgewertet. Produkte dieser Untersuchungen sind flächendeckende Luftgütekarten des untersuchten Gebietes, welche über die Gesamtluftbelastung Auskunft geben.

Die Methode basiert auf dem Auszählen der Flechtenarten an freistehenden Laubbäumen innerhalb eines standardisierten Frequenzgitters, welches zehn gleich grosse Felder aufweist (Abb. 1).



Abb. 1: Baum mit Frequenzgitter

Die Frequenz bezeichnet die Anzahl Felder im Frequenzgitter, in welchen eine bestimmte Flechtenart oder –artengruppe auftritt. Die Frequenz einer Art kann demnach einen Wert zwischen 0 (d. h. die Art ist nicht vorhanden) und 10 (d. h. die Art ist in allen Feldern vorhanden) annehmen. Der Luftgütewert IAP18, welcher für die Erstellung der Luftgütekarten verwendet wird, berechnet sich als Summe der Frequenzen von mehr als 50 Flechtenarten.

Tabelle 1 enthält die Anzahl untersuchte Bäume pro Untersuchungsgebiet und Jahr, insgesamt konnten die Daten von 7068 untersuchten Bäumen verwendet werden.

Region	1988	1989	1990	1991	1993	1995	1996	1997	1999	2000	2001	2003	2004	2006	2008	2009	2010	Total
Aargau		193																193
Aarau		153												177				330
Appenzell				693						441							497	1631
Ausserschwyz West											150					148		298
Ausserschwyz Ost													164					164
Innerschwyz								116							121			237
Limattal AG		208				216						216						640
Luzern Land	1053																	1053
Luzern Stadt	171							143										314
Misox			138							138								276
Neuenburg				114											115			229
Solothurn						34									84		25	143
Winterthur		342					342											684
Wohlen				109														109
Zofingen				93														93
Zug					406							268						674
	1224	896	138	1009	406	250	342	259	138	441	150	484	164	177	320	148	522	7068

Tab. 1: Anzahl Bäume pro Gebiet (d.h. pro Region und Jahr); grau hinterlegt sind die Daten, welche in den Untersuchungen 2006 und 2008 verwendet wurden (vgl. Kap. 5.1)

Abbildung 2 zeigt die 7068 Baumstandorte in der Schweiz in der Karte der berechneten Ammoniakkonzentrationen des Jahres 2010.

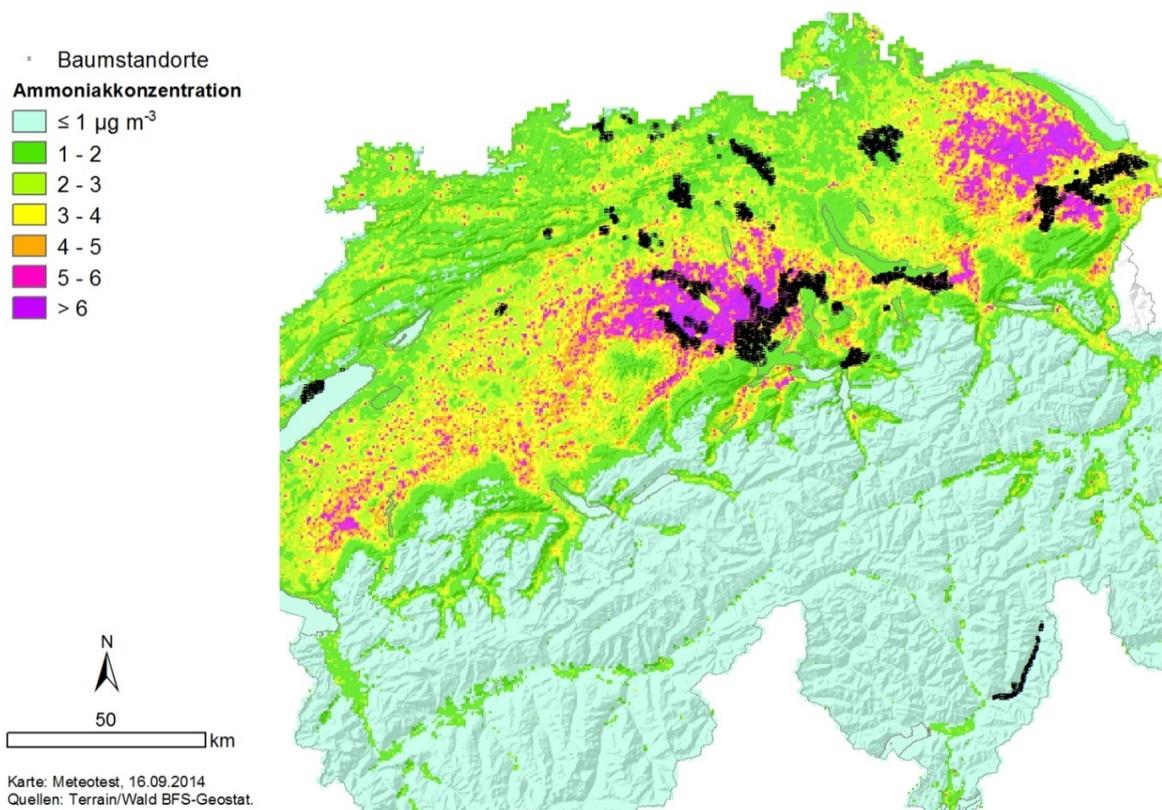


Abb. 2: Übersicht der 7'068 Baumstandorte (schwarze Punkte). Im Hintergrund ist die Ammoniakkonzentration des Jahres 2010 dargestellt.

Zur Erstellung der flächendeckenden Flechtenkarten werden die Flechtenwerte der einzelnen Bäume in Gruppen von in der Regel fünf Bäumen zu einem Mittelwert verrechnet. Die Baumgruppen wurden innerhalb von geographisch einheitlichen Räumen mit einem Durchmesser von bis einem Kilometer, so genannten **Georäumen**, gebildet. Durch die ähnlichen geographischen Bedingungen innerhalb eines Georaums wird davon ausgegangen, dass dort mit derselben Wirkung der Umweltfaktoren auf die Flechten gerechnet werden kann. Die vorliegenden Auswertungen basieren in den meisten Fällen auf den Daten dieser insgesamt 1485 Georäume (Tab. 2).

Für die Auswertungen wurden diese Georäume ihrerseits wieder zu **Grossräumen** zusammengefasst. Diese beinhalten 20 bis 50 Bäume, welche in entsprechend grösseren Räumen (bis 5 km Distanz) stehen. Insgesamt wurden 253 Grossräume gebildet. Schlussendlich wurden auch Auswertungen über ganze **Gebiete** vorgenommen. Als Gebiet wird eine Untersuchung in einem bestimmten Jahr in einer Region, in einer bestimmten geografischen Einheit, bezeichnet (Tab. 2). Für Teile der Auswertungen wurden die Daten innerhalb der drei Zeitperioden 1988 bis 1994, 1995 bis 2001 und 2002 bis 2010 zusammengefasst. Die Anzahl Bäume, Georäume, Grossräume und Gebiete pro Zeitperiode finden sich ebenfalls in Tabelle 2.

Anzahl	Bäume	Georäume	Grossräume	Gebiete
1988 bis 2010	7068	1485	253	30
1988 bis 1994	3707	756	133	13
1995 bis 2001	1546	331	57	7
2002 bis 2010	1815	398	63	10

Tab. 2: Anzahl Bäume, Georäume, Grossräume und Gebiete für die ganze Periode und für die drei Teilperioden

Flechten reagieren artspezifisch auf Immissionen. So sind einzelne Flechtenarten gegenüber stickstoffhaltigen Immissionen wenig empfindlich (nitrophile Arten, hohe Nitrotoleranz), andere indifferent, weitere dagegen sehr empfindlich (anitrophile Arten; ELLENBERG 1991 und WIRTH 1980). Auch gegenüber dem pH-Wert des Substrates, welcher wesentlich durch säurehaltige Immissionen geprägt wird, gibt es artspezifische Verhalten (säureliebende und säuremeidende Arten).

In die Untersuchung wurden nitrophile und anitrophile Arten einbezogen. In Tabelle 3 sind die untersuchten Arten und deren Nitro- und Säuretoleranz aufgeführt. Nitrotolerante Arten sind meist säuremeidend, anitrophile Arten in der Regel säuretolerant.

Flechtenart	Abkürzung	Nitrotoleranz					pH-Schwerpunkt							
		anitrophil	mässig nitrophil	ziemlich nitrophil	sehr nitrophil	extrem nitrophil	sehr acidophil	zieml. acidophil	mässig acidophil	subneutrophil	neutrophil	mässig basiphil	basiphil	
<i>Pseudevernia furfuracea</i>	pse	●	○				●	●	○					
<i>Parmelia saxatilis</i>	sax	●	●				●	●						
<i>Evernia prunastri</i>	eve	●	●				●	●	●					
<i>Hypogymnia physodes</i>	hphy	●	●				●	●	●					
<i>Phlyctis argena-Gr.</i>	phly	●	●				●	●	●					
<i>Lecanora argentata-Gr.</i>	lsub	●	●						●	○				
<i>Parmelia subrudecta</i>	subr	●	●	○				●	●					
<i>Lecanora carpinea</i>	lcar	●	●	○					●	○				
<i>Parmelia glabratula-Gr.</i>	gtul	○	●	●			●	●	●					
<i>Parmelia tiliacea-Gr.</i>	tili		●	●				○	●	●				
<i>Parmelia sulcata</i>	sul		●	●				○	●	●				
<i>Physcia aipolia-Gr.</i>	aip		●	●					●	●				
<i>Xanthoria parietina</i>	xpa		●	●						●	●	●		
<i>Pertusaria albescens</i>	palb		●	●	●			●	●	●				
<i>Physconia distorta</i>	pulv		●	●	●			○	●	●	●			
<i>Parmelia exasperatula</i>	xtul		○	●	○			●	●	●	○			
<i>Physcia adscendens-Gr.</i>	ads		●	●	●				●	●	●	●		
<i>Parmelia subargentifera</i>	suba			●	○					●	●	●		
<i>Physconia grisea</i>	gris			●	○					●				
<i>Xanthoria fallax-Gr.</i>	xfal			●	●				●	●				
<i>Phaeophyscia orbicularis-Gr.</i>	orb			○	●	○			●	●	●	●	○	

Tab. 3: Nitrotoleranz und pH-Schwerpunkt nach WIRTH (1980) der Flechtenarten, welche in die Untersuchung einbezogen wurden und welche für die Bildung des Nitroindex verwendet werden, geordnet nach ihrer Nitrotoleranz; gefüllter Kreis: bevorzugter Bereich; leerer Kreis: tolerierter Bereich

Neben diesen Einzelartendaten wurden vier aus den Flechtendaten aggregierte Flechtenindices in die Untersuchung einbezogen:

Luftgütwert IAP18:

Der Luftgütwert IAP18 basiert auf dem Vorkommen aller baumbewohnenden Flechtenarten. Er berechnet sich als Summe der Frequenzen von mehr als 50 Flechtenarten und -artengruppen. Bei der Entwicklung der kalibrierten Flechtenindikationsmethode wurde der IAP18 mit technischen Immissionsdaten geeicht (URECH et al. 1988, LIEBENDÖRFER et al. 1988).

Die Eichung erfolgte Ende der 1980er Jahre im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP14 unter Berücksichtigung der Jahresmittelwerte von acht Luftschadstoffen (SO₂, NO₃⁻, Cl⁻, Staubniederschlag, sowie Pb, Cu, Zn und Cd im Staubniederschlag), die an Messstationen im Raum Biel erhoben wurden. In einem zweiten Schritt wurde die Flechtenmethode für das Schweizer Mittelland validiert. Der Vergleich mit Jahresmittelwerten von SO₂, NO, NO₂, und O₃ an 18 Immissionsmessstationen ergab eine hohe Übereinstimmung zwischen den Flechtenwerten und diesen technisch gemessenen Luftbelastungen. Der IAP18 gilt deshalb als Wirkungsmass der Gesamtluftbelastung und wird für die Erstellung der Luftgütekarten verwendet. Je besser die Luftqualität, desto mehr Flechten und desto höher der IAP18.

Nitroindex:

Basierend auf der artspezifischen Reaktion der Flechten gegenüber stickstoffhaltigen Immissionen wurde der Nitroindex auf der Basis von Expertenwissen festgelegt. Je mehr nitrophile Arten vorkommen, desto höher der Nitroindex; je mehr anitrophile Arten vorkommen, desto tiefer der Nitroindex. Zu erwarten ist deshalb, dass hohe Stickstoffbelastungen zu einem hohen Nitroindex führen.

Der Nitroindex berechnet sich pro Baum wie folgt:

$$\text{Nitroindex} = \frac{(\text{orb} + \text{xfal} + \text{gris} + \text{ads} + \text{xpa}) - (\text{pse} + \text{hphy} + \text{eve} + \text{sax})}{\text{IAP18}}$$

NH₃Score:

Die Berechnung des NH₃Score aus den Flechtendaten wird im Kapitel 5 dargelegt.

Entropie:

Aus den Flechtendaten wurde ein Entropiemass berechnet nach folgendem Ansatz:

$$\text{Entropie} = - \sum_{i=1}^n p_i * \log_2(p_i)$$

mit p_i als relative Häufigkeit der einzelnen Flechtenarten und log₂ als Logarithmus zur Basis 2. Die Entropie ist ein Mass für den Informationsgehalt in einem System. Dieses Mass wird in der Ökologie zur Charakterisierung der Biodiversität verwendet (BAUR 2010). Es beschreibt die Vielfalt betrachteter Daten und berücksichtigt dabei sowohl die Artenzahl als auch die Anzahl der Individuen je Art. Höhere Entropiewerte bedeuten eine grössere Vielfalt.

4.2. Immissions- und Klimadaten

Für jeden Baumstandort wurden von METEOTEST Bern verschiedene Immissions- und Klimadaten berechnet (Tab. 4). Die Beschreibung der Datenmodellierung findet sich in **Anhang 1**.

Variable	Beschreibung	Einheiten
SO ₂	Schwefeldioxid-Konzentration, Jahresmittelwert	µg m ⁻³
NH ₃	Ammoniak-Konzentration, Jahresmittelwert	µg m ⁻³
NH ₃ gas	Stickstoff-Deposition in Form von gasförmigem Ammoniak	kg N ha ⁻¹ Jahr ⁻¹
PM10	Feinstaub-Konzentration, Jahresmittelwert	µg m ⁻³
Ozon	Ozon-Exposition ausgedrückt als Dosis AOT40f	ppm·h
NO ₂	Stickstoffdioxid-Konzentration, Jahresmittelwert	µg m ⁻³
Höhe	Höhe über Meer	m
Temperatur	Lufttemperatur, Jahresmittel	°C
Luftfeuchte	Relative Luftfeuchtigkeit, Jahresmittel	%
Windgeschwindigkeit	Windgeschwindigkeit 10 m über Boden, Jahresmittelwert	m s ⁻¹
Niederschlag	Niederschlag, Jahressumme	mm Jahr ⁻¹
Globalstrahlung	Globalstrahlung, Jahresmittelwert	W m ⁻²
Potentielle Evaporation	Potentielle Verdunstung, Jahressumme	mm Jahr ⁻¹
Kontinentalität	Temperaturdifferenz zwischen den Monatsmittelwerten von Juli und Januar	°C

Tab. 4: Pro Baumstandort berechnete Immissions- und Klimadaten

Bezüglich der Stickstoffimmissionen stehen die beiden Variablen NH₃ und NO₂ zur Verfügung. Für die Validierung der früheren Modelle NH₃Score (siehe Kapitel 5.1) wird zusätzlich der Parameter NH₃gas gebraucht, der die Trockendeposition des gasförmigen Ammoniaks widerspiegelt. NH₃gas wird mit einer Konstante aus der NH₃-Konzentration berechnet:

$$NH_{3gas} = 3.116 * NH_3$$

Der Faktor 3.116 ergibt sich bei Annahme einer Depositionsgeschwindigkeit von 12 mm/s, was einem mittleren Wert für die Deposition auf eine Landwirtschaftsfläche entspricht.

4.3. Auswertungsmethoden

Die statistischen Auswertungen wurden vom Swiss TPH, Universität Basel, vorgenommen. Die Methodenbeschreibungen und die Detailresultate sind in Anhang 2 zu finden. In den folgenden Kapiteln wird jeweils auf die entsprechenden Kapitel in diesem Anhang hingewiesen.

5. Optimierung des Flechtenwertes zur Ammoniakanzeige

Im ersten Teil der Analysen wird untersucht, wie weit sich die Daten der einzelnen Flechtenarten zur Anzeige einer Ammoniakbelastung eignen. Dazu wird aus den Flechtendaten ein neuer Flechtenwert NH_3 Score gesucht, welcher der berechneten NH_3 -Belastung am besten entspricht.

Die Berechnung erfolgt anhand einer linearen Regression, mit der NH_3 -Belastung als abhängige Variable und dem NH_3 Score als unabhängige Grösse.

$$NH_3gas = \alpha_0 + \alpha_1 * NH_3Score$$

Der NH_3 Score wiederum wird über eine multivariate Regression aus den einzelnen Flechtenarten hergeleitet:

$$NH_3Score = \beta_0 + \beta_1 * Flechte_1 + \beta_2 * Flechte_2 + \dots + \beta_z * Flechte_z$$

Als Qualitätsmass bezüglich Übereinstimmung zwischen den Flechtendaten und der modellierten NH_3 -Belastung wird das korrigierte Bestimmtheitsmass R^2 der erstgenannten Regression verwendet¹. Je grösser das R^2 , desto besser wird das modellierte NH_3 gas durch den neuen Flechtenwert NH_3 Score geschätzt.

5.1. Validierung des bisherigen NH_3 Score

Die Detailauswertungen zu diesem Kapitel sind im Anhang 2, Kapitel 3, zu finden.

In den vorangehenden Analysen (PULS & EVALUATIONEN 2006 und 2008) wurde ein erster NH_3 Score zur Ammoniakanzeige entwickelt. Das Ziel damals war zu untersuchen, ob überhaupt ein Zusammenhang zwischen den Flechten und der modellierten Stickstoffbelastung besteht. Die Analyse wurden deshalb auf wenige Gebiete mit grossen Differenzen in der Stickstoffbelastung beschränkt: Limmattal AG, Zug und Ausserschwyz Ost. Die Flechtendaten stammten aus den Jahren 2003 und 2004 und beinhalteten total 648 Trägerbäume (grau hinterlegte Daten in Tab. 1). Diese konnten mit den vorliegenden modellierten Daten von NH_3 gas aus dem Jahr 2000 verglichen werden.

Der bisherige NH_3 Score berechnet sich wie folgt (basierend auf den Georäumen):

$$NH_3Score (bisher) =$$

$$7.4 + (0.2 * orb + 0.1 * ads + 0.5 * phly) - (0.6 * gris + 0.3 * gtul + 0.7 * aip + 0.8 * xfal + 0.4 * sul)$$

In einem ersten Schritt wird untersucht, ob dieser bisherige NH_3 Score auch mit den Daten aller Flechtenuntersuchungen (7068 Bäume) eine gute Übereinstimmung zu den modellierten NH_3 -Daten zeigt.

¹ Das korrigierte R^2 berücksichtigt (im Unterschied zum unkorrigierten R^2) die Anzahl der erklärenden Variablen

Tabelle 5 enthält das korrigierte Bestimmtheitsmass R^2 für die Regression:

$$NH_3gas = \alpha_0 + \alpha_1 * NH_3Score$$

Aufgeführt sind die Werte für die Gebiete Limmattal AG, Zug und Ausserschwyz Ost (Entwicklung des NH_3 Score, PULS & EVALUATIONEN 2008), und für die neue Analyse über alle in die Untersuchung einbezogenen Gebiete. Analysiert wurden die Daten auf der Basis von Georäumen, Grossräumen und Gebieten (jeweilige Anzahl Beobachtungen siehe Tab. 2).

Korrigiertes R^2	Limmattal AG, Zug, Ausserschwyz Ost	Alle Gebiete
	648 Bäume	7068 Bäume
Georäume	0.45	0.17
Grossräume	0.75	0.40
Gebiete	0.94	0.48

Tab. 5: Korrigiertes R^2 für die Gebiete aus PULS & EVALUATIONEN 2008 und für alle Gebiete

Das korrigierte Bestimmtheitsmass R^2 liegt in den Modellen, welche alle Gebiete beinhalten, deutlich tiefer als in den entsprechenden Modellen, welche nur die drei Gebiete Limmattal AG, Zug und Ausserschwyz Ost berücksichtigen. Der anhand dieser drei Gebiete entwickelte NH_3 Score zeigt damit einen deutlich geringeren Zusammenhang zwischen der Flechtenvegetation und der Ammoniakbelastung. Er lässt sich somit nicht direkt auf die andern Gebiete übertragen. Deshalb wird im folgenden Kapitel der NH_3 Score neu anhand der Daten aller Gebiete berechnet.

5.2. Neuberechnung des NH_3 Score

Die Detailauswertungen zu diesem Kapitel sind im Anhang 2, Kapitel 6.1 und 6.2, zu finden. Da sich der in den drei Gebieten Limmattal AG, Zug und Ausserschwyz Ost entwickelte NH_3 Score nicht direkt auf die andern Gebiete übertragen lässt, wird der NH_3 Score neu auf der Basis aller Daten berechnet. Die Zusammensetzung der Flechtenvegetation und die Umweltdaten haben sich im Laufe der Jahre verändert. Deshalb wird der neue NH_3 Score für vier Zeitperioden berechnet:

- für die gesamte Zeitperiode 1988 bis 2010
- für die drei Zeitperioden 1988 bis 1994, 1995 bis 2001 und 2002 bis 2010 (siehe Tab. 2)

Exemplarisch ist hier das resultierende Modell für die Periode 1988 bis 2010, basierend auf den Georäumen², aufgeführt:

$$NH_3Score (1988 - 2010, Georäume) = 8.99 + (0.32 * tili + 0.68 * ads + 0.62 * phly) - (0.22 * xfal + 0.24 * hphy + 0.65 * aip + 0.49 * orb + 0.32 * gtul + 1.17 * gris + 0.59 * sul)$$

² In dieser gesamten Zeitperiode sind für mehrere Regionen die identischen Georäume mehrmals enthalten, jeweils zu anderen Untersuchungszeitpunkten.

In den vier resultierenden Modellen werden nicht immer die gleichen Flechten aufgenommen. Bei allen Flechten, welche durch die Regression berücksichtigt werden, haben deren Koeffizienten immer das gleiche Vorzeichen, d. h. jede Flechtenart hat entweder eine durchwegs positive oder negative Assoziation zum Ammoniak (Tab. 6).

Auch wenn bei multivariaten Regressionen die Vorzeichen wegen allfälligen Korrelationen zwischen den einzelnen Flechtenarten mit Vorsicht zu interpretieren sind, so weist diese Konstanz der Vorzeichen auf eine klare artspezifische Bindung der Flechten an die Ammoniakbelastung hin.

Flechtenart	1988-2010	1988-1994	1995-2001	2002-2010
ads	+	+	+	+
aip	-	-	-	-
orb	-	-	-	.
phly	+	+	+	+
sul	-	-	-	-
subr
tili	+	+	+	.
xfal	-	-	-	.
gtul	-	-	-	-
xtul	.	-	.	.
lsub	.	.	+	.
hphy	-	-	-	-
gris	-	-	-	-
pse	.	.	.	+

Tab. 6: Vorzeichen der Flechtenkoeffizienten in den vier Zeitperioden, basierend auf den Georäumen

Tabelle 7 enthält das korrigierte Bestimmtheitsmass R^2 für die vier Zeitperioden, basierend auf den Georäumen, und zusätzlich basierend auf den Grossräumen und Gebieten für die ganze Periode.

Korrigiertes R^2	1988-2010	1988-1994	1995-2001	2002-2010
Georäume	0.40	0.55	0.55	0.40
Grossräume	0.62	—	—	—
Gebiete	0.74	—	—	—

Tab. 7: Korrigiertes R^2 für die gesamte Zeitperiode und die drei Teilperioden

Für den neu berechneten NH_3 Score resultiert in allen Kollektiven ein deutlich höheres korrigiertes Bestimmtheitsmass R^2 als für den in den drei Gebieten Limmattal AG, Zug und Ausserschwyz Ost entwickelten NH_3 Score bei dessen Anwendung auf alle Gebiete (vgl. Tab. 5). Deshalb wird in den folgenden Auswertungen der neu auf der Basis aller vorliegenden Flechtenuntersuchungen berechnete NH_3 Score verwendet. Die drei periodenspezifischen Modelle zeigen eine gleich gute oder bessere Übereinstimmung zwischen dem aus den Flechtenwerten berechneten NH_3 Score und dem modellierten Ammoniakwert. Bei den folgenden Auswertungen stehen deshalb die periodenspezifischen Modelle im Vordergrund.

6. Zusammenhänge zwischen den Flechtenwerten und Umweltdaten

Im Folgenden stellt sich die Frage, wie weit sich die Variabilitäten der Flechtenwerte durch verschiedene Umweltdaten erklären lassen. Untersucht wird diese Fragestellung anhand von linearen Regressionsrechnungen mit den Flechtenwerten als abhängige Grössen und den Umweltdaten als unabhängige Grössen:

$$\text{Flechtenwert} = \beta_0 + \beta_1 * \text{Umweltvariable}_1 + \beta_2 * \text{Umweltvariable}_2 + \dots + \beta_z * \text{Umweltvariable}_z$$

Als Flechtenwerte werden der NH₃Score (Kap. 6.1), der Nitroindex (Kap.6.2), der IAP18 (Kap. 6.3) und die Entropie (Kap. 6.4) untersucht. Als erklärende Umweltdaten fliessen alle Immissions- und Klimadaten, wie sie in Kapitel 4.2 beschrieben sind, in die Untersuchung ein.

Die Analysen basieren auf den Werten der 1485 Georäume. Für die erklärenden Umweltvariablen wurden jeweils Dreijahresdurchschnitte³ der Variablen verwendet. Mittels einer Faktorenanalyse mit drei Faktoren wurde festgestellt, dass einige Umweltvariablen eine hohe Multikollinearität aufweisen, d. h. die Umweltvariablen sind untereinander korreliert. Dies führt zu Redundanzen im Regressionsmodell, was die Schätzung der Regressionskoeffizienten ungenau macht und die Modellinterpretation erschwert.

Deshalb wurde aus jeder Gruppe von stark miteinander korrelierten Umweltvariablen diejenige Variable, die den höchsten Zusammenhang mit den Flechtenwerten zeigte, als Stellvertreter für diese Gruppe im Modell berücksichtigt (Tab. 8):

Stellvertreter	Gruppe	gleich- oder gegenläufig
SO ₂	SO ₂ , PM10 und NO ₂	gleichläufig
Globalstrahlung	Globalstrahlung und Niederschlag	gleichläufig ⁴
Temperatur	Temperatur und Höhe	gegenläufig
Luftfeuchte	Luftfeuchte und Potentielle Evaporation	gegenläufig

Tab. 8: Gruppen und Stellvertreter als Resultat der Faktorenanalyse

Bei der Interpretation ist zu berücksichtigen, dass gewisse Variablen gleich- resp. gegenläufig miteinander korreliert sind.

Zusätzlich wurden die weiteren Umweltvariablen Kontinentalität, Windgeschwindigkeit, Ozon und NH₃gas ins Modell einbezogen, so dass das Modell insgesamt acht Umweltvariablen beinhaltet. Um die Effekte der verschiedenen Umweltfaktoren auf den NH₃-Score unverfälscht schätzen zu können, wurde NH₃gas ebenfalls ins Modell aufgenommen, obschon dieser Parameter zur Berechnung des NH₃-Score verwendet wurde. Andernfalls wäre ein Teil der Effekte von NH₃gas auf

³ Durchschnittswerte der drei der Flechtenerhebung vorangehenden Jahre

⁴ Gleichläufig in den Zeitperioden 1988-1994 und 2002-2010, gegenläufig in der Periode 1995-2001

den NH₃-Score fälschlicherweise denjenigen Faktoren zugeordnet worden, welche mit NH₃gas korreliert sind.

Aus den Modellen werden folgende Grössen interpretiert:

- **Korrigiertes Bestimmtheitsmass R²**: Mass für den Anteil der Varianz der Flechtenwerte, welche durch die acht Umweltvariablen erklärt wird.
- **Vorzeichen** des Koeffizienten b₁ bis b₂: Positive Vorzeichen weisen auf einen gleichläufigen Zusammenhang mit dem Flechtenwert hin, negative Vorzeichen bedeuten einen gegenläufigen Zusammenhang zum Flechtenwert.
- **Signifikanz** (p-Wert) der Koeffizienten b₁ bis b₂: Vier Gruppen von Signifikanzen werden unterschieden:
 - p < 0.001
 - p < 0.05
 - p < 0.1
 - nicht signifikant mit p ≥ 0.1

Vorzeichen und Signifikanz der Koeffizienten werden kombiniert dargestellt (Tab 9): Je kleiner der p-Wert resp. je grösser die Signifikanz desto grösser der Kreis. Gleichläufige Zusammenhänge werden mit grünen Kreisen und einem Pluszeichen dargestellt, gegenläufige Zusammenhänge werden mit roten Kreisen und einem Minuszeichen abgebildet.

Darstellung	Bedeutung
	p < 0.001, gleichläufig
	p < 0.05, gleichläufig
	p < 0.1, gleichläufig
	p < 0.001, gegenläufig
	p < 0.05, gegenläufig
	p < 0.1, gegenläufig
	nicht signifikant, p ≥ 0.1

Tab. 9: Darstellung von Signifikanzen und Vorzeichen der einzelnen Koeffizienten

6.1. NH₃Score

Für den Vergleich mit den Umweltdaten werden die drei periodenspezifischen Werte (1988-1994, 1995-2001, 2002-2010) des NH₃Score verwendet (vgl. dazu Kapitel 5.2 und Tabelle 7). Die Detailresultate zur Beziehung des NH₃Score mit den weiteren Umweltvariablen finden sich in Anhang 2, Kapitel 6.3.1 für den umfassenden NH₃Score und Kapitel 6.3.2 für die periodenspezifischen NH₃Score.

Tabelle 10 enthält die statistischen Kenngrößen des Zusammenhangs zwischen dem NH₃Score und den Umweltdaten.

		1988 bis 1994	1995 bis 2001	2002 bis 2010
Korrigiertes R ²		0.61	0.67	0.53
Stellvertreter	Gruppe	1988 bis 1994	1995 bis 2001	2002 bis 2010
Temperatur	Temperatur und Höhe (gegenläufig)	○	○	○
Kontinentalität	---	+	-	-
Luffeuchte	Luffeuchte und pot. Evaporation (gegenläufig)	○	○	-
Windgeschwindigkeit	---	+	+	○
Globalstrahlung	Globalstrahlung und Niederschlag	-	○	○
SO ₂	SO ₂ , PM10 und NO ₂	-	-	○
Ozon	---	-	○	-
NH ₃ gas	---	+	+	+

Tab. 10: Statistische Kenngrößen für den Zusammenhang zwischen dem NH₃Score und den Umweltvariablen

Für alle drei Perioden ergeben sich hohe korrigierte Bestimmtheitsmasse R² von 0.53 bis 0.67, die auch deutlich höher sind als jene ohne Berücksichtigung der weiteren Umweltvariablen (vgl. Tab. 7). Der höchste Wert resultiert in der Periode 1995 bis 2001, der tiefste in der Periode 2002 bis 2010. Die Umweltdaten erklären demnach einen wesentlichen Teil der Variabilität im NH₃Score.

Die Signifikanzen der einzelnen Umweltvariablen unterscheiden sich deutlich. Erwartungsgemäss zeigt NH₃gas, welches zur Berechnung des NH₃Score verwendet wurde, in allen drei Perioden einen hoch signifikanten Zusammenhang zum NH₃Score.

Auch weitere Umweltvariablen wie die Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit, die Globalstrahlung, SO₂ und Ozon zeigen in einzelnen Perioden einen hoch signifikanten Zusammenhang zum NH₃Score. Aber keine der Variablen zeigt in allen drei Perioden einen signifikanten Zusammenhang – mit Ausnahme des NH₃gas.

SO₂ (als Stellvertreter von SO₂, PM10 und NO₂) weist in der ersten Zeitperiode einen hochsignifikanten negativen Zusammenhang zum NH₃Score auf. In der zweiten Periode ist der Zusammenhang immer noch signifikant, wenn auch etwas weniger deutlich. In der dritten Periode wird dann kein signifikanter Zusammenhang zwischen den SO₂ und dem NH₃Score mehr ausgewiesen. Der Einfluss von SO₂ auf den NH₃Score nimmt im Laufe der Zeit ab und aktuell ist kein signifikanter Zusammenhang feststellbar.

Dies kann mit der deutlichen Abnahme der SO₂-Konzentration in den letzten Jahrzehnten zusammenhängen. In der ersten Periode waren die SO₂-Konzentrationen am höchsten, sie zeigen hier einen klaren negativen Zusammenhang zum NH₃Score. Mit abnehmender SO₂-Konzentration wird der negative Einfluss kleiner und fehlt in der jüngsten Zeitperiode gänzlich. In den früheren Perioden kann deshalb von einer Suppressionswirkung von SO₂ auf die Flechtenvegetation ausgegangen werden, welche aktuell nicht mehr feststellbar ist.

Interessant ist auch die Feststellung, dass in der letzten Zeitperiode die Luftfeuchte einen signifikant negativen Zusammenhang zum NH₃Score zeigt. Dies könnte darauf hinweisen, dass die in letzter Zeit vermehrt vorkommenden und nicht mehr durch SO₂ supprimierten nitrophilen Flechten gleichzeitig auch Trockenheitszeiger (Xerophyten) sind. Auf Zusammenhänge dieser Art haben auch FRAHM et al. 2009 hingewiesen.

Fazit

Wie aufgrund der Berechnung des NH₃Score zu erwarten ist, hat NH₃gas einen grossen Einfluss auf den NH₃Score. Weitere Umweltvariablen zeigen nur in einzelnen Zeitperioden einen signifikanten Zusammenhang. Der in der ersten Zeitperioden vorhandene negative Einfluss von SO₂ ist in der jüngsten Zeitperiode nicht mehr feststellbar.

Der NH₃Score ist damit entscheidend durch NH₃gas bestimmt. Über alle Perioden konstante Einflüsse von weiteren Umweltvariablen sind nicht feststellbar. In einzelnen Zeitperioden dagegen erklären verschiedene Umweltvariablen ebenfalls einen wesentlichen Teil der Variabilität im NH₃Score.

6.2. Nitroindex

In Anhang 2, Kapitel 6.3.5 sind die Detailresultate für den Nitroindex aufgeführt.

Je höher der Anteil nitrophiler Flechten am Gesamtflechtenwert ist, desto höher fällt der Nitroindex aus. Hohe Ammoniakbelastungen führen demnach zu einem hohen Nitroindex. Es ist daher zu erwarten, dass die beiden Faktoren positiv korreliert sind.

Tabelle 11 enthält die statistischen Kenngrößen des Zusammenhangs zwischen dem Nitroindex und den Umweltdaten.

		1988 bis 1994	1995 bis 2001	2002 bis 2010
Korrigiertes R ²		0.37	0.40	0.29
Stellvertreter	Gruppe	1988 bis 1994	1995 bis 2001	2002 bis 2010
Temperatur	Temperatur und Höhe (gegenläufig)	○	⊕	○
Kontinentalität	---	○	○	⊖
Luftfeuchte	Luftfeuchte und pot. Evaporation (gegenläufig)	○	○	⊖
Windgeschwindigkeit	---	○	○	⊕
Globalstrahlung	Globalstrahlung und Niederschlag	○	⊕	○
SO ₂	SO ₂ , PM10 und NO ₂	⊖	⊖	⊕
Ozon	---	○	○	⊖
NH ₃ gas	---	⊕	⊕	⊕

Tab. 11: Statistische Kenngrößen für den Zusammenhang zwischen dem Nitroindex und den Umweltvariablen

Die korrigierten Bestimmtheitsmasse R² sind insgesamt deutlich tiefer als jene aus dem Vergleich zwischen dem NH₃Score und den Umweltdaten. Der tiefste Wert erscheint mit 0.29 auch hier in der jüngsten Zeitperiode.

Der Nitroindex weist in allen drei Zeitschnitten einen signifikanten Zusammenhang zu einzelnen Umweltdaten auf. Wie der NH₃Score weist auch der Nitroindex nur zum NH₃gas eine gleichbleibende hohe Beziehung auf. Damit wird die Definition des Nitroindex, welche basierend auf der artspezifischen Reaktion der Flechten gegenüber stickstoffhaltigen Immissionen erfolgte, bestätigt.

SO₂ (als Stellvertreter von SO₂, PM10 und NO₂) zeigt in den ersten beiden Zeitperioden einen hochsignifikanten negativen Zusammenhang zum Nitroindex, in der jüngsten Periode jedoch ist ein positiver signifikanter Zusammenhang erkennbar. Damit weist die Umweltvariable einen ähnlichen

Einfluss auf wie beim NH_3 Score. Wie beim NH_3 Score kann in den früheren Perioden deshalb von einer Suppressionswirkung von SO_2 auf die Flechtenvegetation ausgegangen werden, welche aktuell nicht mehr feststellbar ist.

Fazit

Der Nitroindex ist in seinen Beziehungen zu den Umweltvariablen vergleichbar mit dem NH_3 Score. Die tieferen Bestimmtheitsmasse zeigen, dass die Umweltdaten insgesamt jedoch deutlich weniger Varianz erklären als dies beim NH_3 Score der Fall ist.

Sowohl der Nitroindex als auch der NH_3 Score zeigen einen klaren Zusammenhang mit der NH_3 -Belastung. Während in den älteren Zeitschnitten ein deutlich negativer Zusammenhang mit SO_2 feststellbar ist, fällt diese Beziehung in der jüngsten Zeitperiode nicht mehr signifikant aus. Wie der NH_3 Score scheint der Nitroindex primär von NH_3 beeinflusst zu sein, über alle Perioden konstante Einflüsse anderer Umweltfaktoren sind nicht feststellbar.

6.3. IAP18

Die Detailergebnisse für den IAP18 sind in Anhang 2, Kap 6.3.3 aufgeführt.

Der IAP18 ist ein Mass für die Artenvielfalt und die Anzahl Flechten je Art. Zum Zeitpunkt seiner Entwicklung und Kalibrierung Ende der 1980er Jahre wurde festgestellt, dass bei höherer Luftqualität an einem Standort mehr Flechten optimale Lebensbedingungen finden. Entsprechend höher fällt der IAP18 an einem solchen Standort aus. Es ist daher zu erwarten, dass Luftschadstoffe negativ mit dem IAP18 gekoppelt sind.

Tabelle 12 enthält die statistischen Kenngrössen des Zusammenhangs zwischen dem IAP18 und den Umweltdaten.

		1988 bis 1994	1995 bis 2001	2002 bis 2010
Korrigiertes R ²		0.44	0.60	0.45
Stellvertreter	Gruppe	1988 bis 1994	1995 bis 2001	2002 bis 2010
Temperatur	Temperatur und Höhe (gegenläufig)			
Kontinentalität	---			
Luftfeuchte	Luftfeuchte und pot. Evaporation (gegenläufig)			
Windgeschwindigkeit	---			
Globalstrahlung	Globalstrahlung und Niederschlag			
SO ₂	SO ₂ , PM10 und NO ₂			
Ozon	---			
NH ₃ gas	---			

Tab. 12: Statistische Kenngrössen für den Zusammenhang zwischen dem IAP18 und den Umweltvariablen

Das korrigierte Bestimmtheitsmass R² ist insgesamt ebenfalls geringer als jenes des NH₃Score, aber höher als das des Nitroindexes.

Auch der IAP18 hat in allen drei Zeitschnitten signifikante Zusammenhänge zu einzelnen Umweltdaten. Konstant hohe signifikante Beziehungen über alle Zeitschnitte hat er, im Unterschied zum NH₃Score und dem Nitroindex, zu mehreren Faktoren: zum Ozon, zum SO₂ und zur Kontinentalität.

Eine deutlich negative Beziehung weist der IAP18 zu SO₂ (als Stellvertreter von SO₂-PM10-NO₂) aus: Je höher die Schadstoffbelastung ist, desto tiefer fällt der IAP18 aus. Dieser Zusammenhang ist aufgrund der Definition des IAP18 als Mass für die Gesamtluftbelastung und seiner Eichung mit Immissionsdaten zu erwarten. Erstaunlich ist, dass die Bindung zum SO₂ in der letzten Periode immer noch hoch und sogar noch höher ist als in der ersten Periode, obschon die SO₂-Belastungen in dieser letzten Periode am weitaus tiefsten waren. SO₂ ist auch in dieser Zeitperiode hoch korreliert mit dem Primärschadstoff NO₂ und mit dem teilweisen Sekundärschadstoff PM10 (Anhang 2, Kap. 4.3). Beeinflussen diese (und weitere) Luftschadstoffe die Flechten und korrelieren daher deutlich mit dem IAP18, so kann auch SO₂ einen hohen Zusammenhang zum IAP18 aufweisen, obschon seine Werte sehr tief sind und eine direkte Schädwirkung kaum mehr anzunehmen ist – die anderen Luftschadstoffe wirken dann als „Confounding Variables“⁵.

Der durchwegs stark positive Zusammenhang zwischen dem IAP18 und der Kontinentalität lässt sich als „Höheneffekt“ interpretieren, da die Kontinentalität erwartungsgemäss stark negativ mit der Höhe und damit auch stark positiv mit der Temperatur korreliert ist (siehe Korrelationsmatrizen im Anhang 2, Kap. 4.1 bis 4.3). Aufgrund des vorliegenden Datensets ist es kaum möglich zu unterscheiden, auf welche Weise der Höheneffekt zustande kommt, d.h. ob die absoluten Temperaturen, die Temperaturdifferenz Sommer-Winter (Kontinentalität) oder andere Einflüsse entscheidend sind. Die Höhe ist aber auch stark negativ mit SO₂, PM10 und NO₂ korreliert (Anhang 2, Kap. 4.1 bis 4.3). So sind wahrscheinlich diese Luftschadstoffe entscheidend für den IAP18, welcher ja bei seiner Entwicklung mit Luftschadstoffen geeicht wurde, d.h. die Luftschadstoffe wirken potenziell auch beim Zusammenhang zwischen IAP18 und Höhe als „Confounding Variables“. Dieses Confounding kann je nach Zeitperiode unterschiedlich stark ausfallen, da ja nicht nur die Schadstoffbelastungen zwischen den Zeitperioden ändern, sondern jeweils auch andere Gebiete untersucht wurden und somit unterschiedliche Standortbedingungen bezüglich Exposition, Klima und meteorologischen Parametern zugrunde liegen. Als Folge dieser teilweise starken Korrelationen zwischen Luftschadstoffdaten und Klimavariablen kann umgekehrt aber auch nicht ausgeschlossen werden, dass die mit Luftschadstoffen in Beziehung gesetzten Wirkungen teilweise auf Klima- und Standorteinflüsse zurückzuführen sind.

Obschon Ozon nachweislich flechtenschädigend wirkt (NASH et al. 1980, ROSS et al. 1983), weist der hochsignifikante positive Zusammenhang darauf hin, dass schweizweit in Gebieten mit höheren Ozon-Belastungen tendenziell mehr Flechten vorkommen. Entsprechend ist Ozon negativ korreliert mit SO₂, PM10 und NO₂, und zwar in allen Zeitperioden (Anhang 2, Kap. 4.1 bis 4.3).

Eine mögliche Erklärung für diesen Widerspruch ist der Umstand, dass in Gebieten mit vielen primären Schadstoffen (SO₂, NO₂) und PM10 die für den IAP18 relevante Gesamtbelastung höher ist als in den von (wenigen) Sekundärschadstoffen (wie beispielsweise Ozon) dominierten Gebieten. Dieses Phänomen wurde bereits bei der Entwicklung des IAP18 festgestellt (URECH et al. 1988). Da die negative Korrelation von Ozon mit SO₂, PM10 und NO₂ über die Zeitperioden leicht zuge-

⁵ Eine „Confounding Variable“ ist eine Variable, welche sowohl mit der abhängigen wie mit der (oder den) unabhängigen Variable(n) korreliert. Aufgrund dieses Störfaktors (Confounder) zeigt das Modell Korrelationen zwischen der abhängigen und unabhängigen Variable an, welche keinen ursächlichen Zusammenhang haben müssen.

nommen hat und heute am stärksten ist (Anhang 2, Kap. 4.1 bis 4.3), muss davon ausgegangen werden, dass dieses Phänomen auch heute noch relevant ist. Nicht leicht zu interpretieren ist diese Korrelation aber vor dem Hintergrund, dass sich die mittleren Ozonbelastungen in den letzten Jahrzehnten zwischen städtischen und ländlichen Gebieten im Mittelland deutlich angeglichen haben, weil aufgrund des starken Rückgangs der Primärschadstoffe in städtischen Gebieten der Ozonabbau nicht mehr im gleichen Ausmass wie früher stattfindet.

Als Messgrösse für Ozon wurde die Dosis AOT40⁶ verwendet (Kap. 4.2). Dieser Dosis-Wert zeigt eine höhere Gegenläufigkeit gegenüber SO₂, PM10 und NO₂ als der Ozon-Jahresmittelwert (mündliche Mitteilung B. Rihm), da er hohe Ozonkonzentrationen mehr gewichtet werden als tiefe Konzentrationen.

Ob AOT40f eine auch für Flechten relevante Messgrösse darstellt und wie weit die Wahl dieser Messgrösse für Ozon die Resultate beeinflusst, kann nicht abgeschätzt werden.

Auffallend ist die Beziehung des IAP18 im jüngsten Zeitschnitt mit sämtlichen Umweltdaten. Neu ist insbesondere der signifikant negative Zusammenhang mit NH₃gas. Dies könnte allenfalls als Hinweis darauf gedeutet werden, dass NH₃ als Schadfaktor im Vergleich zu anderen Schadstoffen relativ an Bedeutung gewonnen hat.

Auffallend ist weiter auch, dass – im Gegensatz zu den Zusammenhängen beim NH₃Score – die Luftfeuchte beim IAP18 im letzten Zeitabschnitt einen signifikant positiven Zusammenhang zum Flechtenwert zeigt. Hinweise aus der Fachliteratur deuten darauf hin, dass bei höherer Humidität das Flechtenvorkommen insgesamt begünstigt wird (FRAHM et al. 2007, JOVAN & McCUNE 2005).

Fazit

Erwartungsgemäss zeigt der IAP18 einen hauptsächlichen und negativen Zusammenhang zu SO₂ als Vertreter der primären Luftschadstoffe. Vermutlich haben andere Luftschadstoffe als das im Modell verwendete SO₂ einen entscheidenden Einfluss als „Confounding Variables“ auf den IAP18. Ozon ist zu den Primärluftschadstoffen SO₂ und NO₂, aber auch zu PM10 negativ korreliert und zeigt möglicherweise deshalb einen signifikanten positiven Zusammenhang zum IAP18. Gleiches gilt für den Kontinentalitätswert: Auch er ist mit den Luftschadstoffen negativ korreliert. Klimaeinflüsse können deshalb als „Confounding Variables“ ebenfalls nicht ausgeschlossen werden. Über alle Perioden konstante Einflüsse anderer Umweltfaktoren als jene der Luftschadstoffe und der Höhe (Kontinentalität, Temperatur) sind nicht vorhanden.

Die Interpretation zu den Zusammenhängen zwischen dem IAP18 und den Umweltfaktoren sind mit einigen Unsicherheiten behaftet; die Abhängigkeiten des IAP18 sind offensichtlich komplexer und weniger eindeutig interpretierbar als diejenigen des NH₃Score und des Nitroindex.

⁶ **AOT40**: Kumulierte Ozonbelastung oberhalb des Grenzwertes von 40 ppb (**A**ccumulated **O**zone **E**xposure over a threshold of 40 ppb); Dosismass zur Bewertung der ökotoxikologischen Wirkung von Ozon auf die Vegetation.

6.4. Entropie

In Anhang 2, Kap 6.3.4 sind die Detailresultate für die Entropie aufgeführt. Die Entropie ist ein Mass für die Artenvielfalt, höhere Entropiewerte bedeuten damit eine grössere Vielfalt.

Bei hohen Luftbelastungen können nur wenige an die Belastungen angepasste und spezialisierte Flechtenarten überleben. So nimmt die Artenzahl mit zunehmender Luftbelastung ab. Zudem beeinflussen auch Standortfaktoren (z.B. Exposition, Höhe ü.M.) und Klimaeinflüsse (z.B. Temperatur, Humidität, Trockenheit) die Artenzahl.

Auch die Veränderung eines Einzelschadstoffs kann die Artenzahl beeinflussen. Bei zunehmender Stickstoffbelastung beispielsweise nehmen die stickstoffliebenden Flechten zu, die stickstoffmeidenden Flechten ab. An den von uns untersuchten Bäumen kommen potenziell mehr stickstoffmeidende als stickstoffliebende Flechtenarten vor. So beobachten wir bei einer Zunahme der stickstoffliebenden Flechten gleichzeitig eine offensichtliche Abnahme der Flechtenartenvielfalt. So erwarten wir bei zunehmender Stickstoffbelastung bei sonst gleich bleibenden Umwelt- und Standortbedingungen eine Abnahme der Entropie als Mass der Vielfalt.

Tabelle 13 enthält die statistischen Kenngrössen des Zusammenhangs zwischen der Entropie und den Umweltdaten.

		1988 bis 1994	1995 bis 2001	2002 bis 2010
Korrigiertes R ²		0.38	0.40	0.34
Stellvertreter	Gruppe	1988 bis 1994	1995 bis 2001	2002 bis 2010
Temperatur	Temperatur und Höhe (gegenläufig)			
Kontinentalität	---			
Luftfeuchte	Luftfeuchte und pot. Evaporation (gegenläufig)			
Windgeschwindigkeit	---			
Globalstrahlung	Globalstrahlung und Niederschlag			
SO ₂	SO ₂ , PM10 und NO ₂			
Ozon	---			
NH ₃ gas	---			

Tab. 13: Statistische Kenngrössen für den Zusammenhang zwischen der Entropie und den Umweltvariablen

Das korrigierte Bestimmtheitsmass R^2 ist für die Entropie leicht geringer als für den IAP18, aber immer noch leicht grösser als für den Nitroindex. Wie bei den Flechtenwerten NH_3 Score und Nitroindex ist R^2 für die Entropie im jüngsten Zeitschnitt am tiefsten.

SO_2 (als Stellvertreter von SO_2 , PM10 und NO_2) ist der einzige Faktor, mit welchem die Entropie einen konstant signifikanten Zusammenhang über alle Zeitperioden zeigt. Erwartungsgemäss ist die Beziehung gegenläufig.

Wie beim IAP18 ist die Bindung der Entropie zum SO_2 in der letzten Periode immer noch hoch, obschon die SO_2 -Belastungen in dieser Periode am weitaus tiefsten waren. Auch hier wirken möglicherweise die Primärschadstoffe als „Confounding Variables“ (siehe Kap. 6.3)

Wie der IAP18 zeigt die Entropie im jüngsten Zeitschnitt einen neuen, hochsignifikanten negativen Zusammenhang zu NH_3 gas. Dies könnte ebenfalls als Hinweis darauf gedeutet werden, dass NH_3 als Schadfaktor im Vergleich zu anderen Schadstoffen relativ an Bedeutung gewonnen hat.

Fazit

Der Entropiewert zeigt einen klaren Zusammenhang zum primären Luftschadstoff SO_2 (als Stellvertreter von SO_2 , PM10 und NO_2). Auch hier haben möglicherweise andere Primärschadstoffe als das im Modell verwendete SO_2 einen entscheidenden Einfluss als „Confounding Variables“ auf den IAP18. Auch Klimafaktoren als „Confounding Variables“ können als Folge von deren Korrelationen mit SO_2 nicht ausgeschlossen werden.

Über alle Perioden konstante Einflüsse anderer Umweltfaktoren sind nicht feststellbar.

7. Untersuchungen der zeitlichen Zusammenhänge

Die bisherigen Untersuchungen basieren auf allen Flechtenuntersuchungen in insgesamt 30 Gebieten mit 7068 Bäumen. Sie enthalten damit sowohl eine räumliche Komponente – durch die Berücksichtigung der verschiedenen Gebiete – wie eine zeitliche: Die Daten wurden als Gesamtkollektiv wie auch unterteilt in drei Zeitperioden analysiert. Diese drei Zeitperioden beinhalten aber nicht die gleichen Gebiete, so können Unterschiede zwischen diesen Perioden nicht allein die Auswirkung einer zeitlichen Entwicklung sein, sondern auch durch die unterschiedliche Gebietszusammensetzung bedingt sein.

Deshalb wurden zwei weitere Analysen durchgeführt, welche gezielt die zeitlichen Zusammenhänge untersuchen:

- Analyse der Daten aus dem Kanton Appenzell Ausserrhoden (drei räumlich identische Flechtenuntersuchungen in den Jahren 1991, 2000 und 2010)
- Analysen anhand von Veränderungs-Modellen; diese basieren auf den Differenzen der Variablen zwischen den Zeitperioden.

7.1. Datenanalyse Appenzell Ausserrhoden

Im Kanton Appenzell Ausserrhoden wurden Flechtenuntersuchungen in den Jahren 1991 (693 Bäume), 2000 (441 Bäume) und 2010 (497 Bäume) durchgeführt (kurz: Appenzeller Daten). Verwendet wurden für die Analyse nur die in allen drei Untersuchungen identischen 441 Bäume, respektive 91 Georäume. Der Vergleich dieser räumlich identischen Daten ermöglicht Rückschlüsse auf die zeitliche Komponente des Zusammenhangs zwischen den Flechten- und Umweltdaten. Die Detailauswertungen zu den Appenzeller Daten sind im Anhang 2, Kapitel 7, zu finden.

Für dieses Kollektiv wurden wiederum die NH_3 Score für die ganze Periode und die drei einzelnen Zeitperioden berechnet (Anhang 2, Kap. 7.1 bis 7.3). Die Tabelle 14 enthält das korrigierte Bestimmtheitsmass R^2 für die vier Zeitperioden, basierend auf den 91 Georäumen.

Korrigiertes R^2	1988-2010	1988-1994	1995-2001	2002-2010
Georäume	0.36	0.46	0.44	0.45

Tab. 14: Korrigiertes R^2 für die gesamte Zeitperiode und die drei Teilperioden

Die korrigierten Bestimmtheitsmasse R^2 liegen in der gleichen Grössenordnung wie bei den Modellen für alle Flechtendaten (vgl. Tab. 7). In der Tendenz sind die Appenzeller Werte sogar etwas tiefer, mit Ausnahme der neusten Periode.

Dieser Appenzeller NH₃Score wurde anschliessend für die Berechnung der Zusammenhänge zwischen den Flechtenwerten und den Umweltdaten verwendet (Anhang 2, Kap. 7.4). Die Berechnungen erfolgten analog zu den Berechnungen für alle Flechtendaten im Kapitel 6.

Für alle vier Flechtenwerte NH₃Score, Nitroindex, IAP18 und Entropie sind die korrigierten Bestimmtheitsmasse R² der Appenzeller Modelle zwar in einer ähnlichen Grössenordnung, tendenziell aber kleiner als bei den gleichen Modellen, welche über alle Flechtendaten gerechnet wurden. Die Einschränkung auf die drei räumlich identischen Untersuchungen im Appenzell zeitigt also weniger klare Zusammenhänge zwischen den Flechten- und den Umweltdaten. Diese werden deshalb im folgenden nur summarisch beurteilt.

NH₃Score

Der periodenspezifische NH₃Score (Anhang 2, Kap. 7.4.2) zeigt einzig zum NH₃gas in allen Zeitperioden einen signifikanten Zusammenhang. Auch im Appenzell ist der NH₃Score entscheidend durch NH₃gas bestimmt, über alle Perioden konstante Einflüsse von weiteren Umweltvariablen sind auch hier nicht feststellbar, mit Ausnahme des durchwegs negativen Zusammenhangs mit der Luftfeuchte (signifikant in der ersten und letzten Zeitperiode), was ein Hinweis darauf sein könnte, dass nitrophile Flechten gleichzeitig auch Xerophyten (Trockenheitszeiger) sind.

Nitroindex

Auch die Resultate zum Nitroindex (Anhang 2, Kap. 7.4.5) sind mit denjenigen der Analyse in allen Gebieten (Kap. 6.2) vergleichbar. Das korrigierte Bestimmtheitsmass R² liegt tiefer als beim NH₃Score, der Nitroindex zeigt einen klaren Zusammenhang mit der NH₃-Belastung, wie beim NH₃Score aber auch einen durchwegs negativen Zusammenhang mit der Luftfeuchte.

IAP18

Der IAP18 zeigt im Appenzell nur vereinzelt signifikante Zusammenhänge zu den Umweltdaten (Anhang 2, Kap. 7.4.3). Wie bei der Analyse aller Gebiete zeigt Ozon einen durchwegs signifikant positiven Zusammenhang. Nur in einzelnen Zeitperioden und ohne Konstanz zeigen SO₂ und NH₃gas signifikante Zusammenhänge zum IAP18.

Entropie

Für die Entropie ergeben sich ähnliche Zusammenhänge wie für den IAP18 (Anhang 2, Kap. 7.4.4): Ozon zeigt einen durchwegs signifikant positiven Zusammenhang, über alle Perioden konstante Einflüsse von weiteren Umweltvariablen sind nicht feststellbar.

Die Resultate aufgrund der Appenzeller Daten sind mit denjenigen aller Flechtendaten vergleichbar, die Flechtenwerte zeigen insgesamt ähnliche Zusammenhänge zu den Umweltdaten. Die Modellgüten sind tendenziell tiefer, d. h. die Modelle sind weniger stabil. Dafür sind zwei Ursachen denkbar:

- Die Appenzeller Analysen basieren auf nur 441 Bäumen gegenüber 7068 Bäumen bei den Analysen über alle Gebiete. Die wesentlich tiefere Anzahl Beobachtungen kann zu instabileren Resultaten führen.

- Die Appenzeller Daten decken für die meisten Flechten- und Umweltdaten kleinere Wertebereiche ab als alle Gebiete zusammen (Beispiel: Entropie- und IAP18 im Anhang 2, Kap. 5.1 und 5.2), was ebenfalls ein Grund für weniger aussagekräftigeren Resultate sein kann.

Die Appenzeller Analysen bestätigen zwar in der Tendenz die Zusammenhänge zwischen den Flechten- und den Umweltdaten, wie sie mit anhand aller Flechtendaten gefunden wurden. Weil die Appenzeller Daten insgesamt weniger stabil sind und die verschiedenen Modelle insbesondere für den Zeitraum 2003-2010 relativ schwache Zusammenhänge zeigen, ist eine ausführlichere Interpretation des zeitlichen Zusammenhanges zwischen Flechten- und Umweltdaten kaum möglich.

7.2. Veränderungmodelle

In Veränderungsmodellen werden für die Flechten- und Umweltdaten nicht die Werte zu einem konkreten Zeitpunkt eingesetzt, sondern die Daten-Differenzen zwischen den Werten zweier Zeitpunkte. Für unsere Untersuchungen sind dies die Differenzen der Flechten- und Umweltdaten zweier Flechtenuntersuchungen im gleichen Gebiet.

Diese Veränderungsmodelle brachten keine neuen Erkenntnisse, zudem sind die erhaltenen Ergebnisse schwierig interpretierbar (vgl. dazu Anhang 2, Kap. 8). Diese werden deshalb nicht weiter ausgeführt.

8. Untersuchungen zu einem Critical Level für Ammoniak

Critical Levels und Critical Loads wurden im Rahmen der Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (CLRTAP) entwickelt. Sie sind ein Mass für die Empfindlichkeit der Ökosysteme und der menschlichen Gesundheit gegenüber Einträgen und Konzentrationen von Luftschadstoffen. Als Critical Levels werden Konzentrationen von Luftschadstoffen in der Atmosphäre definiert, oberhalb derer nach dem Stand des Wissens direkte schädliche Auswirkungen auf Rezeptoren, wie Menschen, Pflanzen, Ökosysteme oder Materialien, zu erwarten sind. Belastungen oberhalb dieser Grenzen sind auch gemäss Luftreinhalte-Verordnung als übermässige Immissionen zu beurteilen (BAFU und BLW, 2011; BAFU, 2014).

Zum Schutz der gesamten Vegetation vor direkten Einwirkungen wurde im Rahmen der UNECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung 1992 ein Critical Level für Ammoniak von $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittel vorgeschlagen und ins UNECE Mapping Manual aufgenommen (Ashmore & Wilson, 1992; UBA, 1996). Dieser Critical Level wurde von der WHO im Jahre 2000 auch in die „Air Quality Guidelines for Europe“ aufgenommen (WHO, 2000). Anlässlich eines Workshops im Jahre 2006 unter der UNECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung wurde dieser Critical Level auf der Grundlage von CAPE et al. (2009) revidiert. Für Flechten und Moose wurde ein Wert von $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Jahresmittel festgelegt (UNECE, 2007).

Die Blattflechtenart *Hypogymnia physodes* (Blasenflechte) beispielsweise ist gegenüber Stickstoffbelastungen sehr empfindlich (vgl. Tab. 3). Sie war bis vor 20 Jahren an den Bäumen des Schweizer Mittellandes weit verbreitet und kommt heute nur noch sporadisch vor. Dies ist insofern erstaunlich, als Ende der 1980er Jahre die Luftbelastung sowohl mit S- als auch mit N-haltigen Komponenten deutlich höher war als heute. Denkbar ist deshalb, dass die „acidophile“ Eigenschaft von *Hypogymnia physodes* früher als Folge der durchwegs tieferen pH-Werte über die Eigenschaft „nitrophob“ dominierte. Deshalb wird im folgenden der Zusammenhang zwischen dem Vorkommen von *Hypogymnia physodes* und anderer nitrophober Flechten und der NH_3 -Belastung näher untersucht.

8.1. Methoden der statistischen Auswertung

Um den Einfluss der NH_3 -Belastung auf das Vorkommen von *Hypogymnia physodes* und anderer nitrophober Flechten zu untersuchen, wurden zunächst logistische Regressionsmodelle entwickelt. In allen Modellen wurde der Einfluss des Gebiets als fixer und der Einfluss des Grossraums als zufälliger Effekt berücksichtigt. Zudem enthielten die Modelle entweder:

- nur noch die NH_3 -Belastung am Standort des Baums sowie deren Quadrat oder
- zusätzlich weitere Umweltvariablen (PM10, NO_2 , AOT40f, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Niederschlagsmenge, potentielle Evaporation, Globalstrahlung und Kontinentalität).

Die Belastung eines Baums durch einen bestimmten Umweltfaktor wurde dabei aufgrund des Mittelwerts der betreffenden Variable in den drei Jahren vor der jeweiligen Flechtenbestimmung quantifiziert. Zusätzlich wurde geprüft, ob das betreffende Modell durch Quadratterme der Umweltvariablen und/oder durch Interaktionen zwischen diesen Variablen und NH_3 verbessert werden konnte. Als Kriterium für die Güte des Modells wurde dabei das Akaike-Informationskriterium (AIC) verwendet.

In einem zweiten Schritt wurde unter Annahme eines kontrafaktischen Szenarios einer über alle Standorte konstanten NH_3 -Belastung anhand des jeweiligen Modells der Prozentsatz der Bäume geschätzt, an denen die betreffende Flechte noch zu beobachten wäre. Dieser Prozentsatz wurde als Durchschnitt aller baumspezifischen Vorkommenswahrscheinlichkeiten bestimmt. Die übrigen Umweltvariablen wurden bei diesen Berechnungen auf ihren ursprünglichen baumspezifischen Werten belassen.

In ähnlicher Weise wurde auch der Einfluss der NH_3 -Belastung auf die Entropie nitrophober Flechten untersucht. Dabei wurden jedoch aufgrund der quantitativen Natur der Variable „Entropie“ gemischte lineare Regressionsmodelle verwendet. Vorgängige Analysen hatten folgende Flechten als eindeutig nitrophob identifiziert: *Hypogymnia physodes* (hphy), *Parmelia saxatilis* (sax), *Pseudevernia furfuracea* (pse), *Evernia prunastri* (eve), *Parmelia glabratula* (gtul), *Parmelia sulcata* (sul) und *Parmelia subrudecta* (subr).

Die Entropie dieser Gruppe nitrophober Flechten wurde dann für jeden einzelnen Baum definiert als

$$\text{Entropie} = - \sum_{i=1}^7 p_i \cdot \text{ld}(p_i)$$

wobei p_i die relative Häufigkeit der Flechte i am betreffenden Baum und ld den Logarithmus zur Basis 2 bezeichnet. Bei Bäumen, an denen keine dieser sieben Flechten vorkommt, ist die Entropie gleich Null.

Schliesslich wurden prognostische Modelle für das Vorkommen mindestens einer der 7 nitrophoben Flechten in den Jahren 2010 – 2030 gerechnet. Zu diesem Zweck wurden zusätzlich die beiden Variablen „Kalenderjahr (t)“ und die Variable „Jahre nach 2000 (t2000+)“ ins Modell aufgenommen. Die Variable t2000+ hat für alle Kalenderjahre vor 2000 den Wert 0. Damit können für die Perioden „vor Jahr 2000“ und „nach Jahr 2000“ unterschiedliche Regressionskoeffizienten geschätzt werden.

Zudem wurden auch die Produkte dieser beiden Variablen mit den Umweltvariablen (inkl. NH_3) geprüft. Dies erfolgte nach dem Verfahren der Rückwärtss Selektion. Variablen, deren Entfernung aus dem Modell zu einer Verschlechterung des Modells (d.h. zu einer Erhöhung des AIC-Werts) geführt hätte, wurden im Modell belassen. Für die Vorhersage der Vorkommenswahrscheinlichkeiten wurden alle Umweltvariablen (inkl. NH_3) auf ihre Werte in der dritten Beobachtungsperiode gesetzt, wobei die Variable „Kalenderjahr“ in Fünfjahresschritten sukzessive von 2010 auf 2030 erhöht wurde.

Zusätzlich wurde auch noch ein Szenario mit reduzierten NH_3 -Werten gerechnet. Dabei wurde angenommen, dass NH_3 nach 2010 überall um 20 Prozent gesenkt werden könnte. Die Vorkommensprognosen für die Jahre 2015 – 2030 werden nicht in absoluten Prozentzahlen, sondern als Veränderung gegenüber dem Prozentwert im Jahr 2010 ausgewiesen.

8.2. Identifikation nitrophober und nitrophiler Flechten

Als Grundlage für die weiteren Untersuchungen wurden die einzelnen Flechtenarten bezüglich ihrem Verhalten gegenüber der NH₃-Belastung identifiziert (Tab 15). Dies erfolgte anhand von logistischen Regressionsmodellen, welche des Vorkommens der einzelnen Flechtenarten als Funktion der NH₃-Belastung und der übrigen Umweltvariablen erklären.

Flechte	Abk.	Eigenschaft in Bezug auf NH ₃ *
<i>Hypogymnia physodes</i>	hphy	Nitrophob
<i>Parmelia saxatilis</i>	sax	Nitrophob
<i>Pseudevernia furfuracea</i>	pse	Nitrophob
<i>Evernia prunastri</i>	eve	Nitrophob
<i>Parmelia glabratula</i> -Gr.	gtul	Nitrophob
<i>Parmelia sulcata</i>	sul	Nitrophob
<i>Parmelia subrudecta</i>	subr	Nitrophob
<i>Lecanora argentata</i> -Gr.	lsub	Nitrophil
<i>Phaeophyscia orbicularis</i> -Gr.	orb	Nitrophil
<i>Lecanora carpinea</i>	lcar	Nitrophil
<i>Xanthoria fallax</i> -Gr.	xfal	Nitrophil
<i>Parmelia subargentifera</i>	suba	Nitrophil
<i>Parmelia tiliacea</i> -Gr.	tili	Nitrophil
<i>Phlyctis argena</i> -Gr.	phly	Nitrophil
<i>Xanthoria parietina</i>	xpa	Nitrophil
<i>Physcia adscendens</i> -Gr.	ads	Nitrophil
<i>Physconia grisea</i>	gris	Schwach nitrophob
<i>Physconia distorta</i>	pulv	Schwach nitrophil
<i>Pertusaria albescens</i>	palb	Schwach nitrophil
<i>Parmelia exasperatula</i>	xtul	Schwach nitrophil
<i>Physcia aipolia</i> -Gr.	aip	Unklar

Tab. 15: Einteilung in nitrophile und nitrophobe Flechten;

* nitrophil / nitrophob = signifikant positive / negative Assoziation des Vorkommens der betreffenden Flechtenart mit NH₃ auch nach Berücksichtigung der parallelen Einflüsse anderer Umweltvariablen.

8.3. Vorkommen von *Hypogymnia physodes* in Abhängigkeit der NH_3 -Konzentration

Die folgenden vier Abbildungen beschreiben den modellmässigen Zusammenhang zwischen dem Vorkommen von *Hypogymnia physodes* (HPHY) als typisch nitrophober Flechte und der NH_3 -Belastung am Baumstandort. Dabei wurden vier verschiedene Modelle berechnet:

- Modell über alle drei Beobachtungsperioden, ohne Berücksichtigung von Einflüssen anderer Umweltvariablen
- Modell über alle drei Beobachtungsperioden, unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einflüsse anderer Umweltvariablen (inkl. möglicher Interaktionen mit NH_3).
- Modell für die Periode 2001-2010, ohne Berücksichtigung von Einflüssen anderer Umweltvariablen
- Modell für die Periode 2001-2010, unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einflüsse anderer Umweltvariablen (inkl. möglicher Interaktionen mit NH_3).

Abbildungen 3 und 4 zeigen die Resultate der vier Modelle. Mit steigendem NH_3 nimmt die Vorkommenswahrscheinlichkeit der Flechte kontinuierlich ab. Basieren die Modelle nur auf der neusten Zeitperiode (2001 bis 2010, Abb. 4), so verschwinden die Flechten früher als bei den Modellen über die ganze Zeitperiode (1988 bis 2010, Abb. 3). Die Berücksichtigung anderer Umwelteinflüsse verändert die Prognose der Vorkommenswahrscheinlichkeit nur geringfügig (Abb. 3 und 4: links ohne, rechts mit Berücksichtigung anderer Umwelteinflüsse).

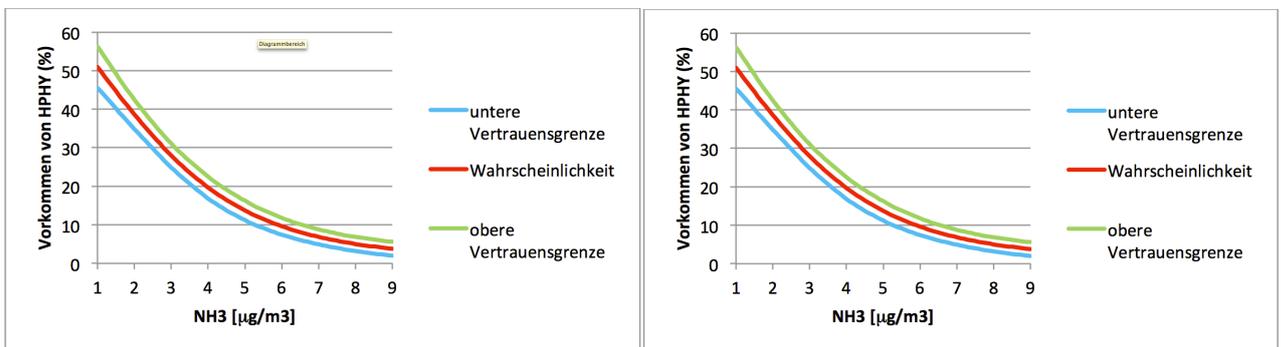


Abb. 3: Modelle a) und b) für das Vorkommen von *Hypogymnia physodes* in % der Bäume, an denen die Flechte vorkommt als Funktion der NH_3 -Konzentration; Daten 1988 bis 2010; links ohne Berücksichtigung anderer Umwelteinflüsse; rechts mit Berücksichtigung anderer Umwelteinflüsse.

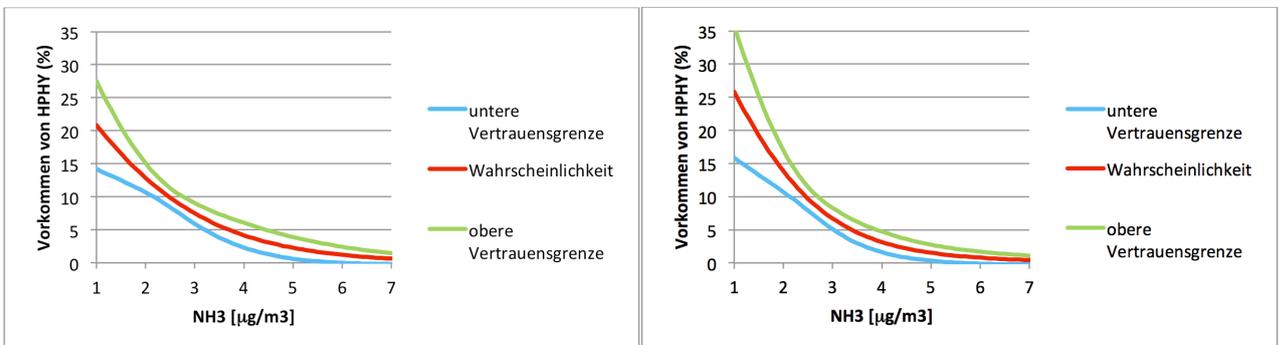


Abb. 4: Modelle c) und d) für das Vorkommen von *Hypogymnia physodes* in % der Bäume, an denen die Flechte vorkommt als Funktion der NH_3 -Konzentration; Daten 2001 bis 2010; links ohne Berücksichtigung anderer Umwelteinflüsse; rechts mit Berücksichtigung anderer Umwelteinflüsse.

Wird die kritische untere Grenze für das Vorkommens von HPHY auf 5% gesetzt, so ergeben sich aufgrund der vier Modelle folgende geschätzten Grenzwerte für die NH₃-Belastung:

Modell a):	8.0 µg/m ³	(95%-Vertrauensintervall: 7.0 bis 9.7 µg/m ³)
Modell b)	7.2 µg/m ³	(95%-Vertrauensintervall: 6.4 bis 8.3 µg/m ³)
Modell c)	3.7 µg/m ³	(95%-Vertrauensintervall: 3.2 bis 4.4 µg/m ³)
Modell d)	3.4 µg/m ³	(95%-Vertrauensintervall: 3.0 bis 3.9 µg/m ³)

8.4. Vorkommen anderer nitrophober Flechten in Abhängigkeit der NH₃-Konzentration

Hier werden beispielhaft Resultate für zwei weitere nitrophobe Flechtenarten dargestellt, von denen die eine, *Parmelia glabratula*-Gruppe, relativ weit verbreitet und die andere, *Pseudevernia furfuracea*, relativ selten ist.

Die Vorkommenswahrscheinlichkeit von *Parmelia glabratula* (Abb. 5) sinkt mit steigender NH₃-Belastung ebenfalls, aber deutlich weniger stark als diejenige von *Hypogymnia physodes* (Kap. 8.3) und nicht unter 20 bis 30 Prozent.

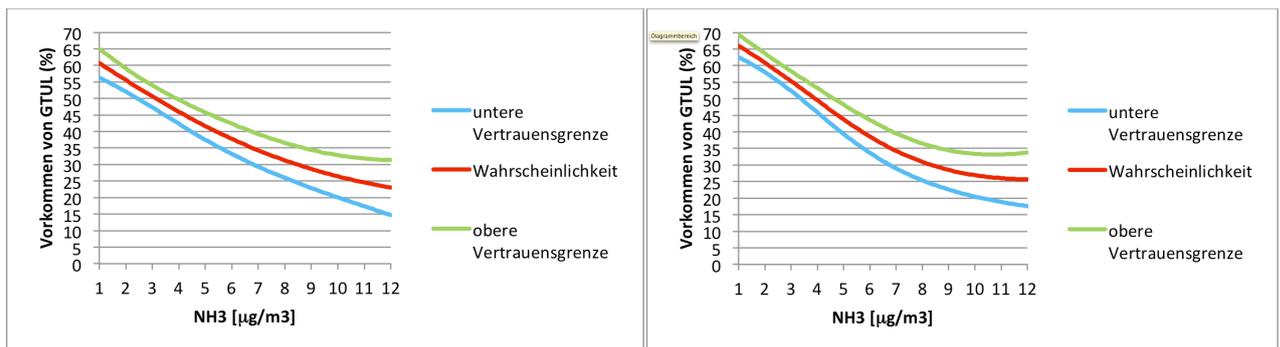


Abb. 5: Modelle für das Vorkommen von *Parmelia glabratula*, in % der Bäume, an denen die Flechte vorkommt als Funktion der NH₃-Konzentration; Daten 1988 bis 2010; links ohne Berücksichtigung anderer Umwelteinflüsse; rechts mit Berücksichtigung anderer Umwelteinflüsse.

Dagegen verhält sich die weniger häufige Flechtenart *Pseudevernia furfuracea* sehr ähnlich wie *Hypogymnia physodes*: Die Vorkommenswahrscheinlichkeit nimmt mit steigender NH₃-Belastung stark und bis fast null Prozent ab (Abb. 6).

Bei allen Flechtenarten verändert die Berücksichtigung anderer Umwelteinflüsse die Prognose der Vorkommenswahrscheinlichkeit nur geringfügig (Abb. 3 bis 6: links ohne, rechts mit Berücksichtigung anderer Umwelteinflüsse). Dies weist auf eine starke Abhängigkeit des Vorkommens dieser nitrophoben Arten von der NH₃-Belastung hin.

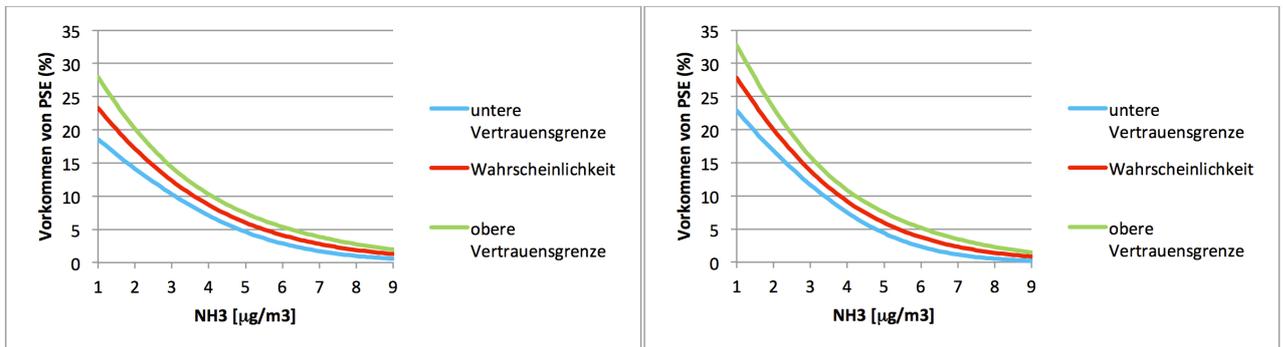


Abb. 6: Modelle für das Vorkommen von *Pseudevernia furfuracea*, in % der Bäume, an denen die Flechte vorkommt als Funktion der NH_3 -Konzentration; Daten 1988 bis 2010; links ohne Berücksichtigung anderer Umwelteinflüsse; rechts mit Berücksichtigung anderer Umwelteinflüsse.

8.5. Entropie nitrophober Flechten in Abhängigkeit der NH_3 -Konzentration

Analog zu Kapitel 8.3. beschreiben die folgenden Abbildungen 7 und 8 den modellmässigen Zusammenhang zwischen der Entropie der sieben nitrophoben Flechten und der NH_3 -Belastung am Baumstandort. Den vier Abbildungen liegen jeweils die folgenden vier Modelle zugrunde:

- Modell der Entropie über alle drei Beobachtungsperioden, ohne Berücksichtigung von Einflüssen anderer Umweltvariablen
- Modell der Entropie über alle drei Beobachtungsperioden, unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einflüsse anderer Umweltvariablen (inkl. möglicher Interaktionen mit NH_3).
- Modell der Entropie für die Periode 2001-2010, ohne Berücksichtigung von Einflüssen anderer Umweltvariablen
- Modell der Entropie für die Periode 2001-2010, unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einflüsse anderer Umweltvariablen (inkl. möglicher Interaktionen mit NH_3).

Die Entropie nitrophiler Flechtenarten nimmt in allen Modellen mit steigender NH_3 -Belastung deutlich ab. Wird im Modell nur die neuste Zeitperiode verwendet (2001 bis 2010, Abb. 8), so ist der Rückgang noch ausgeprägter als beim Modell, welchem die Daten der ganzen Zeitperiode zugrunde liegen (1988 bis 2010, Abb. 7). Die Modelle mit und ohne Berücksichtigung anderer Umwelteinflüsse unterscheiden sich, wie bereits bei den Einzelarten festgestellt (Kap. 8.3. und 8.4.) dagegen nur sehr geringfügig (linke und rechte Hälfte in Abb. 7 und 8).

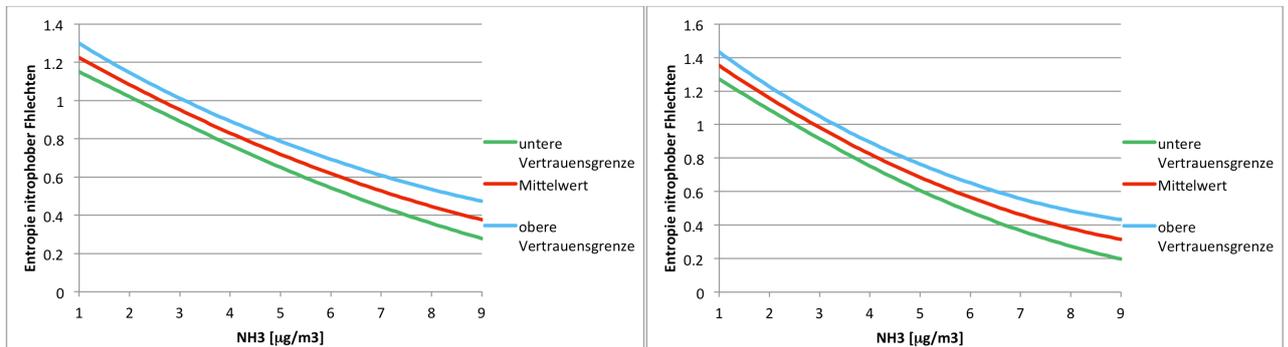


Abb. 7: Modelle a) und b) für die Entropie nitrophober Flechten (Durchschnittswert über alle Bäume) als Funktion der NH_3 -Konzentration (Daten aller drei Beobachtungsperioden, links ohne, rechts mit Berücksichtigung anderer Umwelteinflüsse)

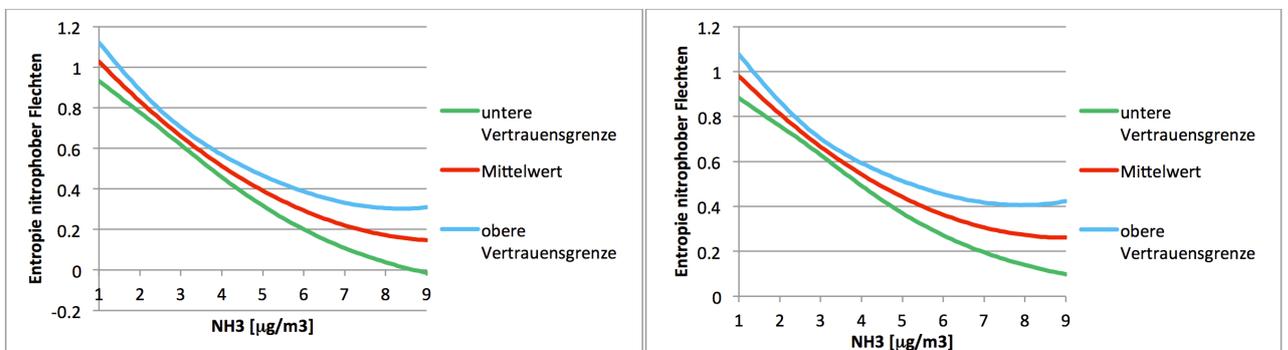


Abb. 8: Modelle c) und d) für die Entropie nitrophober Flechten (Durchschnittswert über alle Bäume) als Funktion der NH_3 -Konzentration (Daten 2001-2010, links ohne, rechts mit Berücksichtigung anderer Umwelteinflüsse)

8.6. Prognose des Vorkommens nitrophober Flechten bis 2030

Es wurden zwei Prognosen für das Vorkommen der sieben nitrophoben Arten (Tab. 15) gerechnet, die eine mit unveränderlichen Umweltbedingungen ab 2010 (Szenario 1, Tab. 16) und die andere mit 20 Prozent tieferen NH_3 -Belastungen nach 2010 (Szenario 2, Tab. 17).

2010 treten die sieben nitrophoben Arten an 28.6 Prozent der untersuchten Bäume auf. Ihnen wird aufgrund der verwendeten Prognosemodelle ein weiterer Rückgang in den kommenden Jahren und Jahrzehnten prognostiziert. Die beiden Prognosen unterscheiden sich dabei nur geringfügig, bei gleichbleibender NH_3 -Belastung nehmen die Flechten um 19.8 Prozent ab, bei 20 Prozent tieferer NH_3 -Belastung um 18.4 Prozent.

Jahr	Prognostiziertes Vorkommen (%)	95%-Vertrauensintervall (%)
2010	28.6	18.6 bis 38.6
2010 → 2015	-9.2	-12.8 bis - 5.6
2010 → 2020	-14.4	-20.4 bis -8.5
2010 → 2025	-17.6	-24.9 bis -10.4
2010 → 2030	-19.8	-27.8 bis -11.8

Tab. 16: Prognostiziertes Vorkommen* der 7 nitrophoben Flechten in den Jahren 2010 bis 2030 unter Szenario 1**.

* Prozentsatz der Bäume, an denen mindestens eine der 7 Flechten beobachtet werden kann.

** unveränderliche Umweltbedingungen ab 2010.

Jahr	Prognostiziertes Vorkommen (%)	95%-Vertrauensintervall (%)
2010	28.6	18.6 bis 38.6
2010 → 2015	-6.2	-9.3 bis -3.0
2010 → 2020	-12.1	-17.8 bis -6.4
2010 → 2025	-15.9	-23.1 bis -8.7
2010 → 2030	-18.4	-26.5 bis -10.4

Tab. 17: Prognostiziertes Vorkommen* der 7 nitrophoben Flechten in den Jahren 2010 bis 2030 unter Szenario 2**.

* Prozentsatz der Bäume, an denen mindestens eine der 7 Flechten beobachtet werden kann.

** 20% tiefere NH₃-Belastungen nach 2010 bei ansonsten unveränderlichen Umweltbedingungen ab 2010.

Diese Prognosen sind nur unter der Bedingung gültig, dass das Modell, welches aufgrund der Daten des Zeitintervalls 1986-2010 hergeleitet wurde, auch für die folgenden 20 Jahre gültig ist. Es ist allerdings davon auszugehen, dass das komplexe Zusammenspiel der verschiedenen Umweltfaktoren nur ansatzweise erfasst werden konnte. Zudem wurden ausschliesslich Belastungen des Baumes in den drei Jahren vor der jeweiligen Flechtenzählung berücksichtigt. Vermutlich wären mindestens bei einzelnen Variablen längere Belastungszeitfenster relevant.

8.7. Fazit zu einem Critical Level für Ammoniak

Aufgrund ihres Auftretens lassen sich die meisten Flechtenarten eindeutig bezüglich ihrem Verhalten gegenüber einer NH₃-Belastung charakterisieren (Kap. 8.2., Tab. 15). Diese Charakterisierung deckt sich zumindest bezüglich den „extremen“ Flechtenarten gut mit der bisherigen gutachterlich vorgenommenen Einteilung (Tab. 3).

Aber auch die nitrophoben Flechtenarten zeigen artspezifische Abhängigkeiten zur NH₃-Belastung. Sie unterscheiden sich in ihrer absoluten Vorkommenswahrscheinlichkeit bei gleicher NH₃-

Belastung. Ihre Abnahme mit zunehmender Belastung ist unterschiedlich stark. Bei Belastungen von rund 3 bis 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ NH_3 sinkt die Vorkommenswahrscheinlichkeit der beiden Flechten *Hypogymnia physodes* und *Pseudevernia furfuracea* unter 10 Prozent. *Parmelia glabratula* dagegen tritt auch bei Werten von über 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ NH_3 immer noch mit einer Häufigkeit von über 20 Prozent auf.

Allen Arten ist gemeinsam, dass ihre Vorkommenswahrscheinlichkeit nur geringfügig von der Berücksichtigung anderer Umweltfaktoren abhängig ist. Ihr Vorkommen lässt sich offensichtlich sehr direkt mit der NH_3 -Belastung in Verbindung setzen.

Diese starke Bindung des Flechtenvorkommens an die NH_3 -Belastung bildet eine gute Basis für die Festlegung eines Critical Level für die NH_3 -Belastung mit statistischen Methoden. Die unterschiedliche Empfindlichkeit der Flechten gegenüber der NH_3 -Belastung auch innerhalb der Gruppe der nitrophoben Flechtenarten muss dabei aber berücksichtigt werden.

Aufgrund der gezeigten Vorkommenswahrscheinlichkeit der drei Flechtenarten ist es nicht erstaunlich, dass auch die Entropie der sieben nitrophoben Flechtenarten einen klaren negativen Zusammenhang zur NH_3 -Belastung zeigt. Dieser ist, analog zum Vorkommen von *Hypogymnia physodes*, nur sehr geringfügig durch die andern Umwelteinflüsse beeinflusst.

Diese deutliche Beeinträchtigung der nitrophoben Flechtenarten durch die NH_3 -Belastung zeigt sich auch in der Prognose ihres zukünftigen Vorkommens (unter der Annahme unveränderter Umweltbedingungen): Aufgrund des verwendeten statistischen Prognosemodells würde bis im Jahr 2030 das Vorkommen der nitrophoben Flechtenarten jährlich im Durchschnitt um rund ein Prozent abnehmen. Auch in einem sehr günstigen Fall des statistischen Prognosefehlers würde die jährliche durchschnittliche Abnahme mindestens ein halbes Prozent betragen.

Aus methodischen Gründen muss die verwendete Prognostizierung mit Vorsicht interpretiert werden. Sie könnte aber darauf hinweisen, dass die heutige NH_3 -Belastung die nitrophoben Flechten chronisch belastet. Dies wiederum würde bedeuten, dass die heutige NH_3 -Belastung den Critical Level für Flechten bereits überschritten hat.

Die mittlere NH_3 -Belastung über alle Bäume liegt in der Zeitperiode von 2001 bis 2010 bei 3.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ NH_3 . Aufgrund der vorliegenden Resultate müsste deshalb ein Critical Level postuliert werden, der wesentlich unterhalb von 3.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ NH_3 liegt. Dieser Befund wird auch durch die Resultate bezüglich der empfindlichen Flechtenarten *Hypogymnia physodes* und *Pseudevernia furfuracea* bestätigt, deren Vorkommenswahrscheinlichkeit bei Werten von über 3.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ NH_3 nur noch in der Grössenordnung von 10 bis 20 Prozent liegen.

Ein Wert von deutlich weniger als 3.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ NH_3 entspricht dem im Rahmen der UNECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung festgelegten Critical Level für Flechten und Moose von 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ NH_3 (UNECE, 2007).

9. Schlussfolgerungen

Die vorliegende Untersuchung führt statistische Analysen mit Flechtendaten und modellierten Umweltdaten durch. Bei der Interpretation der Resultate sind einige methodische Rahmenbedingungen und Einschränkungen bezüglich der zu Grunde liegenden Daten zu beachten. Diese werden im ersten Teil dieses Kapitels ausgeführt.

Basierend auf diesen Rahmenbedingungen und trotz der vorhandenen Einschränkungen ergaben sich signifikante und teilweise über die Zeit stabile Zusammenhänge zwischen den Flechten- und Umweltdaten. Diese werden im zweiten Teil des Kapitels in theseartigen Schlussfolgerungen vorgestellt und interpretiert.

9.1. Rahmenbedingungen und Einschränkungen

Räumliche und zeitliche Verteilung der Daten

Für die Untersuchungen wurden alle zur Verfügung stehenden mit der Kalibrierten Flechtenindikationsmethode in den letzten gut zwanzig Jahren erfassten Flechtendaten verwendet. Die Auswertungen konnten damit auf der grossen Datenbasis von 7068 Bäumen, erfasst in 30 verschiedenen Gebieten, durchgeführt werden. Diese Daten sind aber nicht homogen über den untersuchten Zeitraum verteilt. Auch bezüglich Luftbelastungen und Klimafaktoren sind die Untersuchungen nicht gleichmässig verteilt. Diese ungleichen Verteilungen beeinflussen die Resultate und erschweren die Interpretation der Daten.

Als Konsequenz daraus wurden bezüglich der Zusammenhänge zwischen den Flechtenwerten und Umweltdaten (Kap. 6) primär nur diejenigen Faktoren interpretiert, welche über alle drei ausgewerteten Zeitperioden die gleiche statistische Abhängigkeit zeigen. Durch dieses Vorgehen fällt die Ungleichverteilung der Grunddaten weniger stark ins Gewicht.

Zudem wurden mit den Daten des Kantons Appenzell Ausserrhoden separate Auswertungen vorgenommen (Kap. 7.1). Diese stammen alle aus dem gleichen Gebiet und wurden 1991, 2000 und 2010 erhoben. Sie erlauben deshalb gute Vergleiche über diese drei Zeitpunkte. Leider beinhaltet dieses Kollektiv aber nur 441 untersuchte Bäume. Zudem decken die meisten Flechten- und Umweltdaten kleinere Wertebereiche ab als im Gesamtkollektiv. Die Ergebnisse dieser Auswertungen sind deshalb nicht zwingend repräsentativ für die übrige Schweiz. Sie werden deshalb nur ergänzend zur Diskussion der übrigen Resultate beigezogen.

Modellierte Immissionsdaten

Die Immissions- und Klimadaten wurden für jeden Baumstandort nach dem heutigen Stand des Wissens und auf der Basis der zur Verfügung stehenden Daten modelliert (Kap. 4.2).

Diese modellierten Immissionsdaten stimmen im Gesamtschweizerischen Durchschnitt relativ gut mit gemessenen Daten überein. Abbildung 9 zeigt exemplarisch den Zusammenhang zwischen

gemessenen und modellierten NH_3 -Konzentrationen für Passivsammlerstandorte in der Schweiz für die Jahre 2007 und 2010 (THOENI et al. 2014). Derselbe Ansatz zur Modellierung der NH_3 -Konzentrationen wurde auch im Rahmen der vorliegenden Studie verwendet. Er verwendet einheitliche langjährige meteorologische Bedingungen. Die Messungen hingegen enthalten auch jährliche Schwankungen der Immissionen infolge meteorologischer Unterschiede.

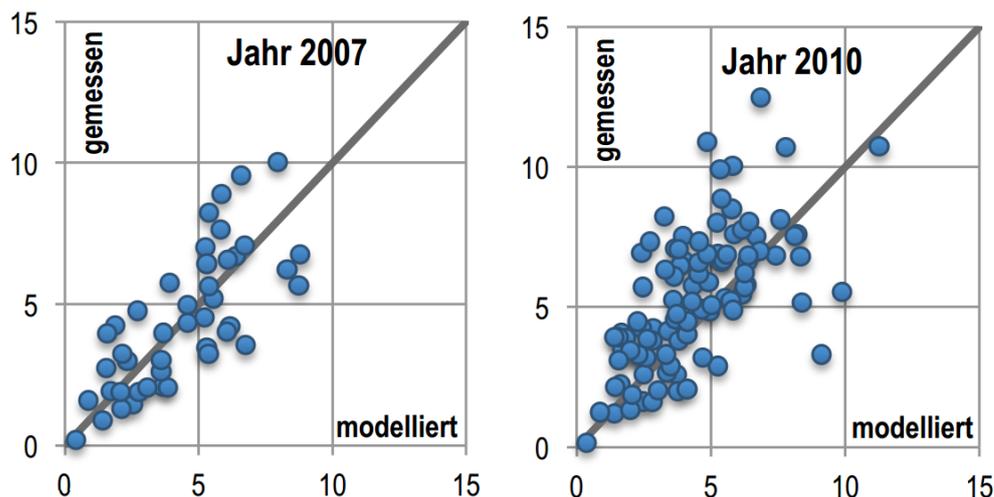


Abb. 9: Zusammenhang zwischen gemessener und modellierter NH_3 -Konzentration für die Jahre 2007 ($R^2 = 0.56$) und 2010 ($R^2 = 0.40$) in der Schweiz.

Kleinräumige Schwankungen am Flechtenstandort (z.B. Mikroklima am Baum, lokale Emissionsquelle) können jedoch lokal beträchtliche Abweichungen zwischen den modellierten Umweltdaten und den effektiv am Baum vorhandenen Belastungen erzeugen.

Umso erstaunlicher ist es, dass trotz diesen methodischen Unschärfen doch klare Zusammenhänge zwischen Flechten- und Umweltdaten gefunden wurden.

Komplexe Zusammenhänge⁷

Es ist davon auszugehen, dass die Zusammenhänge zwischen Flechten, Immissionen und Klima sehr komplex sind und insbesondere Interaktionen zwischen den Flechten und den Umweltvariablen bestehen. Solch komplexe Zusammenhänge sind statistisch schwer analysier- und modellierbar. Für eine Klärung dieser komplexen Zusammenhänge wären mehr Daten notwendig. Zudem fehlen heute Kenntnisse bezüglich der Flechtenbiologie, welche als Grundlage zur Formulierung von biologischen Hypothesen dienen könnten. Diese wären hilfreich für die gezielte Analyse der Zusammenhänge zwischen Flechten und Umweltdaten.

Im Zusammenwirken der Umweltfaktoren auf die Flechten muss vermutlich auch von einem Hysterese-Effekt ausgegangen werden. Hysterese bezeichnet ein Systemverhalten, bei dem die Ausgangsgröße (hier die Flechten) nicht allein von der unabhängig veränderlichen Eingangsgröße (den Umweltfaktoren), sondern auch von dem vorherigen Zustand der Ausgangsgröße abhängt.

⁷ Erörterungen zu diesem Thema finden sich auch in Anhang 2, Kapitel 8.

So können die Flechten sich bei gleichen Umweltbedingungen auf verschiedenen alternativen Pfaden in Richtung eines Endzustandes weiterentwickeln. Ebenso ist davon auszugehen, dass der Verlauf der Flechtenentwicklung beim langsamen Übergang von einer geringeren Luftbelastung zu einer höheren Luftbelastung nicht den gleichen Weg beschreitet wie bei einer anschliessenden Abnahme der hohen Belastung in Richtung von tieferen Werten. Die Modellierung und Auswertung von Hysterese-Effekten stellt hohe Ansprüche an die Ausgangsdaten und die statistischen Modellierungen.

9.2. Fazit der Auswertungen

Zusammenhänge zwischen Flechten, Luftschadstoffen und weiteren Umweltvariablen bestätigt

Flechten werden seit Jahrzehnten als Zeiger der Luftbelastung verwendet. Die kalibrierte Flechtenindikationsmethode, deren Daten hier verwendet wurden, wurde im Rahmen ihrer Entwicklung Ende der 1980er Jahre mit technischen Immissionsdaten geeicht.

Die erzielten Resultate bestätigen den Zusammenhang zwischen den aus den Flechtendaten berechneten Flechtenwerten (NH₃Score, Nitroindex, IAP18, Entropie) und den Daten der Luftschadstoffe. Signifikante Zusammenhänge in allen drei untersuchten Zeitperioden konnten primär mit (je nach Flechtenwert unterschiedlichen) Luftschadstoffen gefunden werden, aber auch weitere Umweltvariablen erklären wesentliche Teile der Variabilität in den Flechtenwerten in einzelnen Zeitperioden. Teilweise handelt es sich um signifikant positive Zusammenhänge, teilweise um signifikant negative. Keine der Klimagrössen zeigte über alle drei Zeitperioden einen gleich gerichteten signifikanten Zusammenhang zu einer der Flechtengrössen. Eine Ausnahme stellt hier die Kontinentalität dar, welche einen konstanten signifikanten positiven Zusammenhang zum IAP18 aufweist. Da die Kontinentalität in allen Zeitperioden mit den primären Luftschadstoffen korreliert ist, könnten diese als konfundierende Variablen (Störvariablen) wirken. Da die Kontinentalität aber auch stark negativ mit der Höhe und damit auch positiv mit der Temperatur korreliert ist, ist es schwierig zu interpretieren, welche Parameter schliesslich in welchem Ausmass wirkungsbestimmend sind. Als Folge dieser starken Korrelationen sowie der teilweise starken Korrelationen zwischen Luftschadstoffen und Klimavariablen kann somit auch nicht ausgeschlossen werden, dass die mit Luftschadstoffen in Beziehung gesetzten Wirkungen teilweise auf Klima- und Standorteinflüsse zurückzuführen sind.

NH₃Score ist ein ammoniakzeigender Flechtenwert

Flechten reagieren artspezifisch auf die verschiedenen Umwelteinflüsse, insbesondere auch auf stickstoffhaltige Immissionen. Anhand von statistischen Auswertungen wurde mit dem NH₃Score ein neuer Flechtenwert gebildet, der die modellierten NH₃-Belastungen gut abbildet.

In einem weiteren Schritt wurde der Einfluss zusätzlicher Umweltfaktoren auf den NH₃Score untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass der neu gebildete NH₃Score entscheidend von der NH₃-Belastung abhängt, dass aber weitere Umweltvariablen den NH₃Score ebenfalls beeinflussen. Diese Einflüsse sind aber nicht in jeder der untersuchten Zeitperioden identisch. Die weiteren Um-

weltvariablen zeigen weder zeitlich noch räumlich einen stabilen Einfluss auf den NH₃Score. Der für eine spezifische Zeitperiode ermittelte NH₃Score ist deshalb nicht ohne Einschränkungen auf andere Zeitperioden anwendbar.

Frühere Suppressionswirkung durch SO₂ insbesondere bei nitrophilen Flechten bestätigt

In den früheren Jahren zeigte SO₂ (als Vertreter der Variablengruppe SO₂, PM10 und NO₂) einen negativen Zusammenhang zum NH₃Score, der aber in der jüngsten Zeitperiode nicht mehr beobachtet werden konnte. Damit wird die vermutete Suppressionswirkung durch SO₂ auf die Flechtenvegetation, insbesondere auf den NH₃Score und den Nitroindex bestätigt. Veränderungen des NH₃Score und des Nitroindex in der Vergangenheit können deshalb nicht direkt als Veränderungen der NH₃-Belastung interpretiert werden.

Da diese Suppressionswirkung durch SO₂ in der jüngsten Zeitperiode nicht mehr erkennbar ist, können aktuelle und zukünftige Erhebungen des NH₃Score zur Anzeige der NH₃-Belastung verwendet werden. Dabei sollten aber auch Klimadaten und meteorologische Parameter bei den Auswertungen berücksichtigt werden, um den Einfluss eines Klimawandels bei der Interpretation von sich verändernden Flechtenvorkommen einbeziehen zu können. Denn es kann nicht ausgeschlossen werden, dass als Folge des Klimawandels regional unterschiedliche Veränderungen in Richtung von vermehrt auftretender Trockenheit oder auch höherer Humidität stattfinden werden, welche sich ebenfalls auf die Artenzusammensetzung bei den Flechten auswirken können.

Eichung der Flechtenwerte mit aktuellen Immissionsmessungen und Klimadaten könnte Aussagekraft erhöhen

Bei der Interpretation der gefundenen Zusammenhänge zwischen den Flechten und Luftschadstoffen müssen die in Kapitel 9.1 genannten Rahmenbedingungen und Einschränkungen berücksichtigt werden. Einflüsse von weiteren Umweltvariablen auf die Flechten können nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Eine Erhöhung der Aussagekraft aktueller Flechtendaten könnte mit einer erneuten Eichung der Flechtenwerte mit chemisch-physikalisch gemessenen Luft- und Klimadaten erreicht werden. Dazu würde die bei der Entwicklung der Flechtenmethode erfolgte Kalibrierung wiederholt.

Diese Kalibrierung gäbe Aufschluss darüber, wie und mit welcher Aussagekraft die Flechten unter den heute vorherrschenden Luftbelastungs- und Klimabedingungen zur Anzeige der Luftqualität, d. h. der gesamten Luftbelastung und auch zur Anzeige von Einzelschadstoffen wie Ammoniak, verwendet werden könnten.

Zu diesem Zweck würde die Flechtenvegetation in der Umgebung von kontinuierlich messenden Luftmessstationen erfasst und statistisch mit den Luft- und Klimadaten verglichen werden. Im Vordergrund stünden dabei sicher die Stationen des NABEL-Netzes (BAFU 2013) sowie entsprechende von den Kantonen und Städten betriebene Luftmessstationen. Heute würden eine weitaus grössere Anzahl Stationen zur Verfügung stehen als bei der Entwicklung der Methode, entsprechend breiter könnte die Aussagekraft der Flechten zur Luftbelastung wissenschaftlich abgestützt werden.

Denkbar ist auch, den Ansatz der vorliegenden Studie auszubauen, indem in regelmässigen zeitlichen Abständen das Flechtenvorkommen auf einem breit abgestützten, konsistenten Stichprobenetz erhoben und in multivariaten Analysen zusammen mit modellierten Luftschadstoffbelastungen, Klimadaten und anderen Umweltfaktoren untersucht würde. Im Unterschied zur vorliegenden Studie, welche die vorhandenen Flechtendaten der letzten 25 Jahre berücksichtigt hat, könnten die Flechtenstandorte nach allen erklärenden Faktoren stratifiziert werden mit dem Ziel, den Einfluss von Luftschadstoffbelastungen besser von weiteren Umwelteinflüssen abgrenzen zu können.

Critical Level für Ammoniak bezüglich Flechten

Die Vorkommenswahrscheinlichkeit der gegenüber Ammoniak empfindlichen Flechtenarten *Hypogymnia physodes* und *Pseudevernia furfuracea* sinkt bei Werten von rund 3 bis 5 $\mu\text{g NH}_3/\text{m}^3$ auf unter 10 Prozent. Die deutliche Beeinträchtigung dieser zwei sowie jene von weiteren nitrophoben Flechtenarten durch die NH_3 -Belastung zeigt sich auch in der Prognose ihres zukünftigen Vorkommens (unter der Annahme unveränderter Umweltbedingungen): Ihr prognostiziertes Vorkommen nimmt jährlich um rund ein Prozent ab.

Aufgrund dieser Befunde muss ein Critical Level für Ammoniak postuliert werden, welcher wesentlich unterhalb der mittleren Belastung (2001 bis 2010) an den Bäumen von 3.3 $\mu\text{g NH}_3/\text{m}^3$ liegt. Damit wird bestätigt, dass die von CAPE et al. (2009) geforderte Senkung des UNECE Critical Levels für Flechten und Moose von 8 $\mu\text{g NH}_3/\text{m}^3$ auf 1 $\mu\text{g NH}_3/\text{m}^3$ (Jahresmittelwert) in die richtige Richtung zielt.

10. Literaturverzeichnis

Ashmore M.R. and Wilson R.B. (Eds.), 1992: Critical levels of Air Pollutants for Europe. Workshop on Critical Levels held under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Egham (UK), 23-26 March 1992.

BAFU und BLW, 2011: Baulicher Umweltschutz in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft. Bundesamt für Umwelt, Bern, Umwelt-Vollzug Nr. 1101. 122 S.

BAFU 2013: NABEL – Luftbelastung 2012. Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1324: 128 S.

BAFU, 2014: <http://www.bafu.admin.ch/luft/luftbelastung/11607/11608/index.html?lang=de>

BARTHOLMESS, H., STARK, U. & NOBEL, W., 2012: Wirkungsbezogene Langzeitbeobachtung von Umweltbelastungen - 25 Jahre Flechtenkartierungen im Umweltmonitoring-Programm Esslingen/Altbach von 1983 bis 2008. – Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 72 (4), S. 132-138.

- BARTHOLMESS, H., SCHLOTTMANN, K. & NOBEL, W., 2011: Immissionsmessungen mit Diffusionssammlern und Flechtenkartierungen im Zusammenhang mit dem Eintrag von Stickstoff in die Umwelt. - Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 71 (3), S. 165-172.
- BAUR, B., 2010: Biodiversität, Haupt Verlag, UTB 3325
- CAPE, J N.; VAN DER EERDEN, L. J.; SHEPPARD, L. J.; LEITH, I. D.; SUTTON, M. A.: 2009 Evidence for changing the Critical Level for ammonia. *Environmental Pollution*, 157 (3). 1033-1037.
- EKL, 2005: Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Status-Bericht der Eidg. Kommission für Lufthygiene (EKL). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL, Ed.), Schriftenreihe Umwelt Nr. 384, Bern. 168 S.
- ELLENBERG H., 1991: Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Göttingen, Goltze. P.248.
- FOEN, 2014: Switzerland's Informative Inventory Report 2014 (IIR). Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Submission of March 2014 to the United Nations ECE Secretariat. Federal Office for the Environment (FOEN). 299 p.
- FRAHM, J.-P., HENSEL, S., THÖNNES, D., 2007: Zur Vergleichbarkeit von Luftgütekartierungen mithilfe der Richtlinie VDI 3957 Blatt 13. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 67, Nr. 5, 206-208
- FRAHM, J.-P., THÖNNES, D., HENSEL, S., 2009: Ist der Anstieg nitrophiler Flechten an Bäumen auf eine Erhöhung des Borken-pH zurückzuführen? *Archive for Lichenology* 1: 1-10
- FRAHM, J.-P., JANSEN, A-M., SCHUMACHER, J., THÖNNES, D., HENSEL, S., HEIDELBACH, B., ERLER, D., 2009: Das Nitrophytenproblem bei epiphytischen Flechten – eine Synthese, *Archive for Lichenology* 05: 1-8.
- JOHANSSON, O., PALMQVIST K., OLOFSON J., 2012: Nitrogen deposition drives lichen community changes through differential species responses. *Global Change Biology* 18; 2626-2635
- JOVAN, S., McCUNE, B., 2005: Air Quality Bioindication in the Greater Central Valley of California, with Epiphytic Macrolichen Communities. *Ecological Applications*, 15 (5), 1712-1726
- KIRSCHBAUM, U., WINDISCH, U., HANEWALD, K., 2010: Immissionsbezogene Flechtenkartierungen in Hessen von 1992 bis 2007. – *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 70 (2010) Nr. 4, April, S.135-140.
- LIEBENDÖRFER, L., HERZIG, R., URECH M., AMMANN, K., 1988: Evaluation und Kalibrierung der Schweizer Flechten-Indikationsmethode mit wichtigen Luftschadstoffen. *Staub Reinhaltung der Luft* 48, S. 233-238.
- NASH TH.H., SIGAL, L.L., 1980: Sensitivity to air pollution with an emphasis on oxidant air pollutions. *Proceedings of the symposium on effects of air pollutants on mediterranean and temperate forest ecosystems*, Riverside, California; 117-124
- Pinho P., Dias T., Cruz C., Tang Y.S., Sutton M., Martins-Loução M.A., Máguas C & Branquinho C. 2011. Using lichen functional-diversity to assess the effects of atmospheric ammonia in Mediterranean woodlands. *Journal of Applied Ecology* 48; 1107–1116

PULS, EVALUATIONEN, 2006: Räumlicher und zeitlicher Zusammenhang zwischen Flechtenvegetation und Stickstoffbelastung. Bericht zuhanden des Bundesamts für Umwelt BAFU, 30 S.

PULS, EVALUATIONEN, 2008: Flechtenvegetation und Stickstoffbelastung: Spezifität und zeitliche Entwicklung. Bericht zuhanden des Bundesamts für Umwelt BAFU, 26 S.

ROSS, L.J., NASH, TH.H., 1983: Effect of ozone on gross photosynthesis of lichens. *Environmental and Experimental Botany* 23, 1: 71-77

THOENI, L., SEITLER, E., 2014: Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz 2000 bis 2013. Messbericht. Bundesamt für Umwelt BAFU, 59 S.

UBA, 1996: Manual on Methodologies and Criteria for Mapping Critical Levels/Loads and Geographical Areas where they are Exceeded. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt UBA). UBA Texte 71/96.

UNECE, 2007: Report on the Workshop on Atmospheric Ammonia, Detecting Emission Changes and Environmental Impacts, held in Edinburgh (UK), 4-6 December 2006. ECE/EB.AIR/WG.5/2007/3

URECH, M., HERZIG, R., AMMANN K. (1988): Flechten als Bioindikatoren: Integriertes biologisches Messsystem der Luftverschmutzung für das Schweizer Mittelland. Schlussbericht NFP14. Syst.-Geobot. Institut der Universität Bern, 283 S.

VAN HERK, C.M., 1999: Mapping of Ammonia Pollution with Epiphytic Lichens in the Netherlands. *The British Lichen Society* 1999: Vol. 31, 9-20.

WIRTH, V., 1980. Flechtenflora. Unitaschenbücher UTB 1062. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

WHO, 2000: Air Quality Guidelines for Europe, Second Edition. WHO Regional Publications, European Series, No. 91. World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen.

Wetterprognosen
Erneuerbare Energien
Luft und Klima
Umweltinformatik

Genossenschaft METEOTEST
Fabrikstrasse 14, CH-3012 Bern
Tel. +41 (0)31 307 26 26
Fax +41 (0)31 307 26 10
office@meteotest.ch, www.meteotest.ch



Anhang 1

Projekt Flechten und Stickstoff

Beschreibung der Klima- und Luftschadstoff-Daten

Auftraggeber:

Bundesamt für Umwelt BAFU
Abt. Luftreinhaltung und Chemikalien
Herr Beat Achermann
3003 Bern

Bearbeitung:

Beat Rihm, Dr. Thomas Künzle, Jan Remund

Inhalt

1	Einleitung, Zielsetzung	3
2	Luftschadstoffdaten	3
2.1	Grundlagen	3
2.2	Methodik	4
3	Klimadaten	6
3.1	Grundlagen	6
3.2	Methodik	7
3.2.1	Räumliche Interpolation der Messwerte	7
3.2.2	Anpassung an lokale Standorteigenschaften	7
3.2.3	Berechnung der potentiellen Evaporation	8
4	Referenzen	8

Version	Datum	Inhalt	Autor	Kontrolle
1.0	13.12.11	Beschreibung der Inputdaten von Meteotest	bri, tk, jr	bs
2.0	19.09.14	Anpassungen	bri	

1 Einleitung, Zielsetzung

Im Rahmen eines Projektes der Firma puls in Bern und des Swiss Tropical and Public Health Institute (TPH) der Universität Basel werden im Auftrag des BAFU Zusammenhänge zwischen Flechtenpopulationen an Baumstämmen und atmosphärischer Stickstoffbelastung untersucht. Insgesamt stehen 7'068 Baumstandorte zur Verfügung mit Flechtenuntersuchungen aus dem Zeitraum 1986 bis 2010.

Die Aufgabe von Meteotest besteht darin, für die Standorte folgende jährliche Klima- und Schadstoffdaten im Zeitraum 1986–2010 bereit zu stellen:

- Jahresmittelwerte von Schwefeldioxid (SO₂), Ammoniak (NH₃), Feinstaub (PM10), Ozondosis für Wald (AOT40f) und Stickstoffdioxid (NO₂)
- Jahresmittelwerte sowie Monatsmittelwerte für Januar, Juni, Juli und August von Temperatur (T), Luftfeuchte (RH), Windgeschwindigkeit (FF), Globalstrahlung (Gh), Niederschlag (P) und potentieller Evaporation (ETP)

Der vorliegende Bericht beschreibt in kompakter Form die dafür verwendeten Daten und Methoden.

2 Luftschadstoffdaten

2.1 Grundlagen

Die Grundlage für die jahresweise Kartierung der Luftschadstoffe sind bestehende Karten und Messdaten. Folgende gesamtschweizerischen Belastungskarten aus BAFU-Projekten¹ standen bereits zur Verfügung:

- NO₂: Jahre 1990–2007
- PM10: Jahre 1990–2007
- SO₂: Jahre 1985, 1990, 1995, 2000, 2005
- NH₃: Jahre 1990, 2000, 2007
- AOT40f: Jahre 1992–1994, 1998–2000, 2004–2006 (jeweils Mittelwerte über drei Jahre)

Eine Dokumentation mit Erläuterungen zur Erstellung dieser Jahresmittelwertkarten ist ebenfalls auf der Webseite des BAFU verfügbar (Künzle et al. 2009).

¹ <http://www.bafu.admin.ch/luft/luftbelastung/schadstoffkarten/index.html?lang=de>

Für die noch fehlenden Jahre werden weitere Grundlagen (Immissionsmessungen oder Emissionsdaten) benötigt: Die Immissionsmesswerte aller Stationen der Schweiz sind auch auf der BAFU-Webseite² zu finden. Dort gibt es zudem Grafiken, die die Entwicklung der Luftqualität in der Schweiz grafisch zusammenfassen^{3,4}, sowie Emissionsstatistiken⁵.

2.2 Methodik

Für die Jahre, für die Jahresmittelwertkarten bereits vorlagen, wurden die Daten an den Baumstandorten aus den Karten extrahiert. Die fehlenden Jahre ohne Karten mussten auf der Basis von verfügbaren Grundlagen ergänzt werden. Der Verlauf der Immissionsbelastung folgt generell den Emissionsmengen aber auch den unterschiedlichen meteorologischen Verhältnissen (z.B. Extremjahre 2003 und 2006). Da in den meisten Fällen keine räumlich und zeitlich hochaufgelösten Emissionsdaten zur Verfügung stehen, beruht die Herstellung der Zeitreihen vorwiegend auf gemessenen Immissionswerten (Jahresmittel), welche die Ergebnisse der jährlichen Situation der Emissionen und der meteorologischen Verhältnisse abbilden. Diverse Analysen und Erkenntnisse zeigen, dass die jährlichen Variationen der Immissionsbelastung vorwiegend mit unterschiedlichen meteorologischen Verhältnissen erklärt werden können. Aus diesen Gründen wurden keine Emissionsdaten einbezogen (Ausnahme NH₃).

Zeitreihe NO₂

Die Jahre 1986–1989 sowie 2008–2010 wurden mit Messdaten aus 9 NABEL-Stationen skaliert. Folgende Stationen wurden verwendet: Magadino-Cadenazzo, Payerne, Tänikon, Lugano-Universität, Zürich-Kaserne, Basel-Binningen, Dübendorf-EMPA, Härkingen-A1, Sion-Aéroport-A9.

Pro Jahr wird ein Skalierungsfaktor für die ganze Schweiz ausgerechnet. Dazu wird der Mittelwert der 9 Stationen in das Verhältnis gesetzt zum Jahr 1990 (für die Karten 1986–1989) resp. zum Jahr 2007 (für die Karten 2008–2010). Somit resultierten Faktoren zwischen 1.12 (Jahr 1989) und 0.99 (Jahr 2010). Die Belastungskarte für ein bestimmtes Jahr wird durch Multiplikation des Faktors mit der verfügbaren NO₂-Karte (1990 resp. 2007) erstellt.

Zeitreihe PM10

Die Jahre 1986–1997 sowie 2008–2010 wurden mit Messdaten aus 9 NABEL-Stationen skaliert, da nur wenige kantonale PM10-Messungen vor 1990 vorliegen.

² http://www.bafu.admin.ch/luft/luftbelastung/blick_zurueck/01694/index.html?lang=de

³ http://www.bafu.admin.ch/luft/luftbelastung/blick_zurueck/01694/11260/index.html?lang=de

⁴ <http://www.bafu.admin.ch/umwelt/indikatoren/08588/08679/index.html?lang=de>

⁵ <http://www.bafu.admin.ch/luft/00596/08399/index.html?lang=de>

Folgende Stationen wurden verwendet: Magadino-Cadenazzo, Payerne, Tänikon, Lugano-Università, Zürich-Kaserne, Basel-Binningen, Dübendorf-EMPA, Härkingen-A1, Sion-Aéroport-A9.

Zur Berechnung der jährlichen Skalierungsfaktoren wurden die Mittelwerte der gemessenen Jahresmittel in das Verhältnis zum Jahr 2000 gesetzt. Somit resultierten Faktoren zwischen 1.78 (Jahr 1990) und 0.79 (Jahr 2010), mit welchen die verfügbare PM10-Karte des Jahres 2000 multipliziert wurde.

Zeitreihe SO₂

Es wurde ein analoges Verfahren wie beim NO₂ gewählt. Die oben erwähnten 9 NABEL-Stationen wurden für die Bestimmung der Faktoren berücksichtigt. Die fehlenden Jahre 1986–1992 wurden mit der Karte 1990 skaliert, die Jahre 1993–1997 mit der Karte 1995, die Jahre 1998–2002 mit der Karte 2000, die Jahre 2003–2010 mit der Karte 2005.

Die Faktoren liegen zwischen 2.0 (Jahr 1986) und 0.51 (Jahr 2009).

Zeitreihe NH₃

Es wurden die Basiskarten 1990, 2000 und 2007 verwendet. Die Zwischenjahre wurden durch Multiplikation mit Faktoren, welche aus Immissionsmessungen (Jahre 2000–2010) gewonnen wurden, erstellt. Aus den Jahren 1995–1999 lagen keine Immissionsdaten zur Verfügung. Die Faktoren wurden aus Interpolation der Karten 1990 und 2000 berechnet. Für das Jahr 1985 wurde abgeschätzt, wie viel höher die Emissionen gegenüber 1990 waren (Faktor 1.035). Anschliessend wurden die Faktoren der Jahre 1986–1989 linear interpoliert.

Zeitreihe AOT40f

Die Immissionswerte aller Schweizer Stationen wurden analysiert. Ab dem Jahr 2000 stehen über 50 Messstationen in der Schweiz zur Verfügung. In den Jahren 1986–1990 beträgt diese Anzahl jedoch nur 5 bis 10 Stationen.

Die Jahre 1986–1991 wurden mit den vier NABEL-Stationen Tänikon, Payerne, Dübendorf und Zürich-Kaserne erarbeitet. Es wurden Verhältnisse der einzelnen Jahre zum Mittelwert der Jahre 1992–1994 gebildet. Mit diesen Skalierungsfaktoren, welche zwischen 1.05 und 1.21 liegen, wurden die Jahreskarten aus der verfügbaren Karte 1992–1994 berechnet.

Die Jahre 1992, 1993 und 1994 wurden auf der Basis von 22 Messstationen skaliert. Es wurden analoge Verhältnisse der Mittelwerte aus 22 Stationen gebildet und mit diesen Faktoren die Mittelwertkarte 1992–1994 skaliert.

Die Skalierungsfaktoren für die Jahre 1995, 1996 und 1997 wurden als Verhältnisse zum Jahr 1999 berechnet und auf die Mittelwertkarte 1998–2000 angewendet.

Die Karten 1998–2000 sowie 2003–2006 lagen bereits als Einzelkarten im Rahmen der Erarbeitung des BAFU-Projektes vor.

Die Jahre 2001 und 2002 wurden mit Faktoren aus der AOT-Karte 2004 bestimmt.

Analog wurden die Karten 2007–2010 mit Faktoren aus der AOT-Karte 2005 bestimmt.

Die ermittelten Faktoren der Jahre 1992–2010 liegen zwischen 0.77 und 1.12. Damit wurde jeweils die gesamte Basiskarte skaliert. Da nur Messstationen in tieferer Höhenlage berücksichtigt wurden und das Untersuchungsgebiet auch unterhalb 1000 m.ü.M liegt, kann davon ausgegangen, dass dieses vereinfachte Berechnungsverfahren zu genügend genauen Resultaten geführt hat.

3 Klimadaten

3.1 Grundlagen

Folgende fünf meteorologische Messparameter wurden bearbeitet:

- Temperatur (T)
- Taupunkttemperatur (Td)
- Windgeschwindigkeit (FF)
- Globalstrahlung (Gh)
- Niederschlag (P)

Die Parameter Temperatur, Taupunkttemperatur, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung wurden benötigt, um die potentielle Evapotranspiration (ETP) zu berechnen. Aus Temperatur und Taupunkttemperatur wurde zudem die relative Luftfeuchte (RH) bestimmt.

Die Datengrundlage bilden Messungen der MeteoSchweiz. Die Daten liegen als Tageswerte vor. Für den Niederschlag werden auch die Messungen des Niederschlagsmessnetzes verwendet.

3.2 Methodik

3.2.1 Räumliche Interpolation der Messwerte

Da die Berechnung der Klimadaten für über 7'000 Standorte in der Schweiz durchgeführt werden musste, kamen dafür nur automatisch ausführbare und robuste Methoden in Frage. Das angewendete Verfahren beruht auf der "Shepard's Gravity Interpolation" Methode (Zelenka et al., 1992), mit welcher die Messwerte umliegender Stationen auf die Baumstandorte interpoliert werden. Dabei berücksichtigt man die dreidimensionale Distanz zwischen den Stationen. Das Interpolationsverfahren hat sich im Trockenstress-Projekt der WSL (Remund et al. 2011) bewährt und es wird auch in der Klimadatenbank Meteonorm (www.meteonorm.com) verwendet.

Für die Interpolation wurden jeweils die Monatswerte der nächsten 8 Stationen berücksichtigt. Der vertikale Gewichtungsfaktor ist für die Parameter T, Td und FF auf 100 und für P und Gh auf 50 gesetzt worden. Diese Gewichtung der vertikalen Distanzen bewirkt, dass vor allem Stationen auf ähnlichen Meereshöhen in die Interpolation einbezogen werden.

Es wird eine automatisierte Regressionsanalyse durchgeführt und falls in der Umgebung der nächsten 8 Standorte vertikale Gradienten ein Bestimmtheitsmass von 0.5 überschreiten, wurden diese berücksichtigt.

Für die Temperatur, die Taupunkttemperatur, die Globalstrahlung und den Niederschlag wurden zusätzlich regionale Gewichtungen für Graubünden und Wallis benutzt. Damit wurde verhindert, dass für die Interpolation in diesen Gebieten ausserregionale Wetterstationen verwendet werden.

3.2.2 Anpassung an lokale Standorteigenschaften

Für die Temperaturen (Luft und Taupunkt) und die Windgeschwindigkeit wurden zusätzlich folgende Geländeparameter berücksichtigt (aus einem Geländemodell mit einer horizontalen Auflösung von 250 m und einer Bodennutzungskarte bestimmt⁶):

- Nord-Süd-Ausrichtung (5 Kategorien: steiler Nordhang, Nordhang, flach, Südhang, steiler Südhang)
- Stadt (basierend auf Bodennutzungskarte, 2 Kategorien: ja/nein)
- See(nähe): (2 Kategorien: Ja/Nein).

Dabei wurden die Messstationen bezüglich der Kategorien klassiert. Nur falls die Unterschiede signifikant sind, wurden diese verwendet.

⁶ Quelle Bundesamt für Statistik BFS/GEOSTAT

Für die Globalstrahlung wurde zudem die lokale Abschattung durch die Topografie korrigiert. Dazu wurden mittels Meteororm (Version 6.1.0.21) für alle Standorte die Unterschiede zwischen der freien und der beschatteten Verhältnisse bestimmt (Geländemodell SRTM⁷ 100 m). Pro Standort, Monat und Besonnungsverhältnis (3 Klassen je nach clear sky clearness index) wurden die Verhältnisse berechnet und gespeichert (in "look up tables"). Diese Faktoren werden dann sowohl für die Ausgangsdaten (Erhöhung der Strahlung) als auch die zu interpolierenden Standorte angewendet (Absenkung der Strahlung).

3.2.3 Berechnung der potentiellen Evaporation

ETP wurde nach Romanenko (1961) adaptiert an Verhältnisse der Station Changins (Xu und Singh, 1998) berechnet:

$$ET_P = \frac{0.021 \cdot (25 + T)^2 \cdot (100 - RH)}{30.4}$$

4 Referenzen

- Künzle T., Egli D., Rihm B., 2009: Erstellung von Jahresmittelwertskarten der Luftbelastung in der Schweiz – Dokumentation. METEOTEST, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Bern.
<http://www.bafu.admin.ch/luft/luftbelastung/schadstoffkarten>
- Remund J., Frehner M., Walthert L., Kägi M., Rihm B., 2011: Schätzung standortspezifischer Trockenstressrisiken in Schweizer Wäldern. Schlussbericht / Version 2.3, 24. Oktober 2011, im Auftrag der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Forschungsprogramm "Wald und Klimawandel", nicht publiziert.
- Xu C.-Y. and V.P. Singh, 1998: Dependence of evapotranspiration on meteorological variables at different time-scales and intercomparison of estimation methods. *Hydrol. Process.* 12, 429-442 (1998).
- Zelenka, A., G. Czeplak., V. D'Agostino, J. Weine., E. Maxwell., R. Perez, M. Noia, C. Ratto and R. Festa (1992): Techniques for supplementing solar radiation network data, Volume 1-3. IEA Report No. IEA-SHCP-9D-1.

⁷ Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/SRTM-Daten>

Anhang 2

Flechtenvegetation und Stickstoffbelastung: Zeitlich und räumlich differenzierte Datenanalyse anhand epidemiologischer Methoden

Dr. Denis Infanger, PD Dr. Christian Schindler, Swiss TPH, Universität Basel

1 Daten

Flechten Daten von 7068 Bäumen in 18 Gebieten, 152 Grossräumen und 993 Georäumen.
Schadstoffdaten: NO₂, PM10, NH₃, SO₂, Ozon (AOT40f) für 1986–2010.
Umweltdaten: Höhe ü. Meer (m), Temperatur, relative Luftfeuchte (%), Windgeschwindigkeit (mm/s), Niederschlag (mm), Globalstrahlung (W/m²), potenzielle Evaporation (mm), Differenz Niederschlag-Evaporation als Trockenheitsindex.

Ausgewertet: 993 Georäume, 152 Grossräume, 18 Gebiete. Die Auswahl der zu betrachtenden Flechtenvariablen wurde auf folgende Flechtenarten eingeschränkt:

Flechte	Variable
<i>Physcia adscendens</i>	ads
<i>Physcia aipolia</i>	aip
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	orb
<i>Phlyctis argena</i>	phly
<i>Parmelia sulcata</i>	sul
<i>Parmelia subrudecta</i>	subr
<i>Parmelia tiliacea</i>	tili
<i>Parmelia glabratula</i>	gtul
<i>Parmelia exasperatula</i>	xtul
<i>Lecanora argentata</i>	lsub
<i>Hypogymnia physodes</i>	hphy
<i>Xanthoria fallax</i>	xfal
<i>Physconia grisea</i>	gris
<i>Pseudevernia furfuracea</i>	pse

2 Variablendefinitionen

Variable	Beschreibung
SO ₂	
NH ₃ gas	NH ₃ × 3.116
PM ₁₀	
AOT _{4of}	Ozon
NO ₂	
Höhe	Höhe über Meer in Meter.
Temperatur	Temperatur in Grad Celsius.
Luftfeuchte	Relative Luftfeuchtigkeit.
Windgeschwindigkeit	m/s
Niederschlag	mm
Globalstrahlung	W/m ²
Potentielle Evaporation	kg/m ² s
Kontinentalität	Temperaturdifferenz zwischen Juli und Januar (T _{Juli} -T _{Januar}). Mass für Trockenstress.
Shannon-Entropie	$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \times \log_2(p_i)$ <p>p_i = relative Häufigkeiten der Flechtenarten.</p> <p>\log_2 = Logarithmus der Basis 2.</p> <p>Mass für den Informationsgehalt. Höhere Entropiewerte bedeuten mehr Vielfalt.</p>

3 Validierung des bisherigen NH₃Score

Modell: Stickstoff = b₀ + b₁*Flechte1 + b₂*Flechte2 + + b_Z*FlechteZ

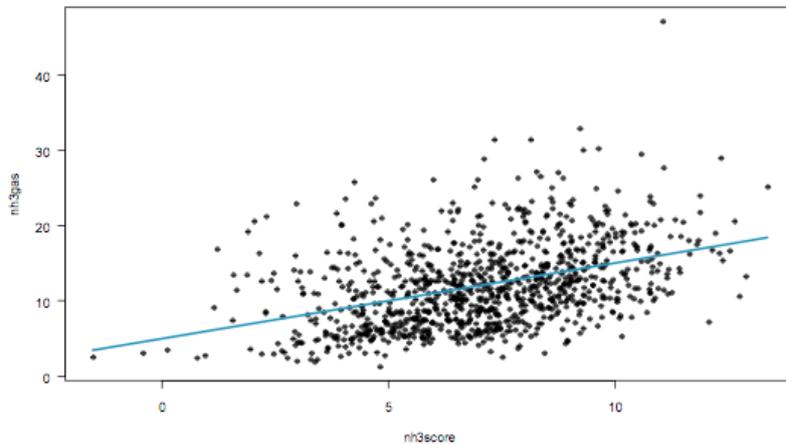
Arbeitsschritte: NH₃gas wird berechnet aus CNH₃ (aus dem File «stao_nh3.txt»):
 NH₃gas = 3.116 × CNH₃ (Formel gemäss Beat Rihm). Berechnung des NH₃Score mit altem Modell für neue Daten. Dann wurde eine lineare Regression von NH₃Score (altes Modell) auf NH₃gas (aktuelle Schadstoffdaten) gerechnet. Anschliessend Georäummittelwerte von NH₃gas und NH₃Score innerhalb der Grossräume gemittelt und eine Regression der Grossraummittelwerte von NH₃gas auf die Grossraummittelwerte von NH₃Score berechnet. Dito für Gebiete.

3.1 Auf Georaumebene (n=993)

Flechtenindex (nh3gas) für Georäume (altes Modell mit alten Koeffizienten, 394 Georäume):

$$\text{nh3score_alt} = 7.4 + 0.2 \cdot \text{orb} + 0.1 \cdot \text{ads} + 0.5 \cdot \text{phly} - (0.6 \cdot \text{gris} + 0.3 \cdot \text{gtul} + 0.7 \cdot \text{aip} + 0.8 \cdot \text{xfal} + 0.4 \cdot \text{sul})$$

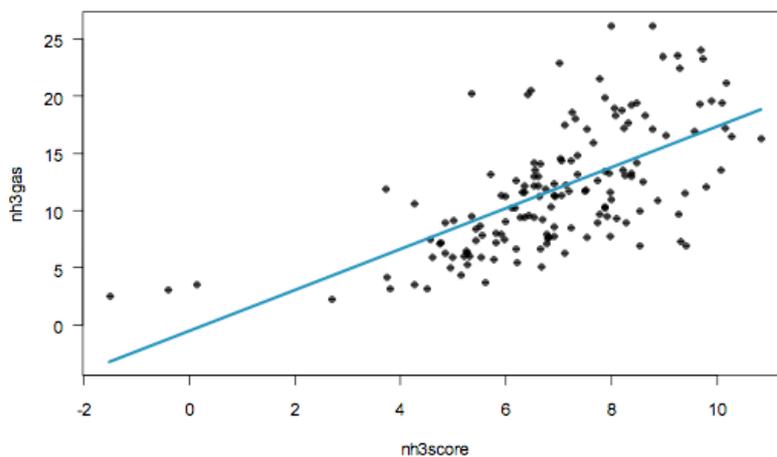
$$\text{nh3gas} = 4.97 + 1.01 \cdot \text{nh3score}$$



adj. $R^2 = 0.169$.

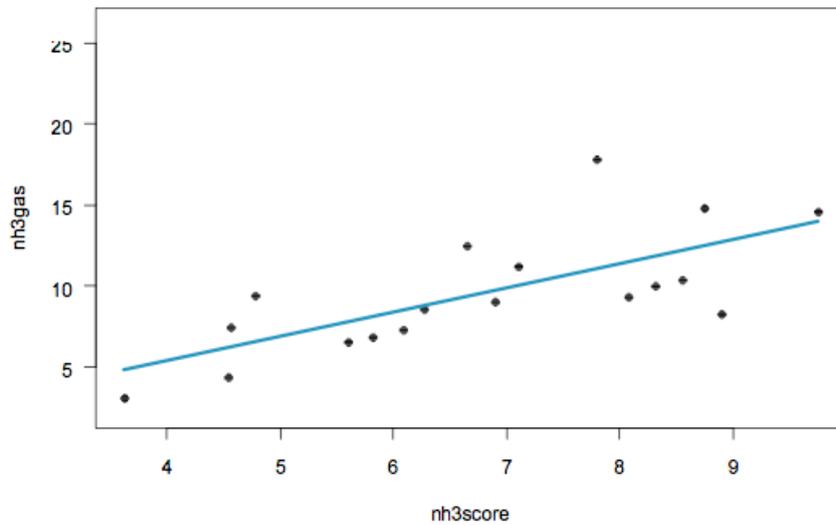
Der auffällige Punkt oben rechts ist Gebiet 25, Grossraum 21, Georaum 37. Ohne diesen Punkt wird adj. $R^2 = 0.167$.

3.2 Auf Grossraumebene (n=152)



adj. $R^2 = 0.397$.

3.3 Auf Gebietsebene (n=18)



adj. R2 = 0.475.

Der Punkt mit den auffällig hohen NH3gas-Werten ist Gebiet 14.

4 Korrelationsmatrizen

Arbeitsschritte: Mittelung aller Schadstoff- und Klimadaten über je drei Zeitabschnitte (1988-1994; 1995-2001; 2002-2010) innerhalb der Georäume (n=993). Berechnung der Korrelationskoeffizienten separat für die drei Zeitabschnitte. Berechnung der P-Werte für die Veränderung der Korrelationen über die drei Zeitabschnitte hinweg.

4.1 1988-1994

	SO ₂	NH ₃ gas	PM ₁₀	AOT _{40f}	NO ₂	Höhe	Temperatur	Luftfeuchte	Windgeschwindigkeit	Niederschlag	Globalstrahlung	Pot. Evaporation	Differenz Niederschlag-Evaporation	Kontinentalität
SO ₂	1.00	-0.41	0.88	-0.41	0.82	-0.91	0.79	0.24	-0.58	-0.69	-0.34	0.18	-0.72	0.84
NH ₃ gas		1.00	-0.34	0.15	-0.40	0.27	-0.23	-0.19	0.06	0.10	0.23	0.04	0.08	-0.29
PM ₁₀			1.00	-0.35	0.82	-0.83	0.74	0.22	-0.60	-0.69	-0.40	0.17	-0.71	0.82
AOT _{40f}				1.00	-0.59	0.26	-0.18	-0.04	0.24	0.17	0.09	-0.05	0.17	-0.19
NO ₂					1.00	-0.77	0.66	0.17	-0.61	-0.57	-0.50	0.17	-0.60	0.70
Höhe						1.00	-0.93	-0.11	0.68	0.65	0.42	-0.35	0.74	-0.92
Temperatur							1.00	-0.18	-0.66	-0.54	-0.35	0.62	-0.72	0.86
Luftfeuchte								1.00	-0.04	-0.34	-0.12	-0.88	-0.05	0.08
Windgeschwindigkeit									1.00	0.44	0.48	-0.27	0.51	-0.65
Niederschlag										1.00	0.24	0.03	0.95	-0.55
Globalstrahlung											1.00	-0.07	0.25	-0.37
Pot. Evaporation												1.00	-0.29	0.34
Differenz Niederschlag-Evaporation													1.00	-0.64
Kontinentalität														1.00

4.2 1995-2001

	SO ₂	NH ₃ gas	PM ₁₀	AOT _{4of}	NO ₂	Höhe	Temperatur	Luftfeuchte	Windgeschwindigkeit	Niederschlag	Globalstrahlung	Pot. Evaporation	Differenz Niederschlag-Evaporation	Kontinentalität
SO ₂	1.00	-0.18	0.83	-0.59	0.78	-0.91	0.82	0.51	-0.67	-0.71	0.04	0.04	-0.75	0.85
NH ₃ gas		1.00	-0.24	-0.15	-0.31	0.18	-0.17	0.00	0.14	-0.02	0.11	-0.11	0.02	-0.15
PM ₁₀			1.00	-0.49	0.81	-0.83	0.73	0.49	-0.65	-0.60	-0.03	0.01	-0.63	0.81
AOT _{4of}				1.00	-0.65	0.53	-0.39	-0.51	0.45	0.53	0.18	0.23	0.49	-0.37
NO ₂					1.00	-0.75	0.64	0.46	-0.63	-0.50	-0.22	-0.03	-0.52	0.65
Höhe						1.00	-0.93	-0.45	0.68	0.63	0.04	-0.15	0.70	-0.92
Temperatur							1.00	0.11	-0.66	-0.46	-0.03	0.50	-0.63	0.87
Luftfeuchte								1.00	-0.28	-0.64	-0.03	-0.81	-0.43	0.42
Windgeschwindigkeit									1.00	0.43	0.18	-0.15	0.49	-0.67
Niederschlag										1.00	-0.19	0.29	0.96	-0.59
Globalstrahlung											1.00	0.02	-0.21	0.07
Pot. Evaporation												1.00	0.01	0.16
Differenz Niederschlag-Evaporation													1.00	-0.66
Kontinentalität														1.00

4.3 2002-2010

	SO ₂	NH ₃ gas	PM ₁₀	AOT _{4of}	NO ₂	Höhe	Temperatur	Luftfeuchte	Windgeschwindigkeit	Niederschlag	Globalstrahlung	Pot. Evaporation	Differenz Niederschlag-Evaporation	Kontinentalität
SO ₂	1.00	-0.27	0.86	-0.60	0.83	-0.90	0.75	0.45	-0.60	-0.65	-0.26	0.01	-0.67	0.87
NH ₃ gas		1.00	-0.22	0.15	-0.30	0.16	-0.06	0.12	0.10	-0.19	0.13	-0.15	-0.15	-0.26
PM ₁₀			1.00	-0.50	0.85	-0.82	0.71	0.46	-0.63	-0.67	-0.33	-0.02	-0.68	0.77
AOT _{4of}				1.00	-0.76	0.48	-0.30	-0.39	0.38	0.28	0.35	0.19	0.23	-0.43
NO ₂					1.00	-0.77	0.61	0.43	-0.64	-0.50	-0.42	-0.05	-0.49	0.76
Höhe						1.00	-0.92	-0.39	0.69	0.65	0.34	-0.16	0.71	-0.94
Temperatur							1.00	0.16	-0.66	-0.60	-0.25	0.42	-0.73	0.84
Luftfeuchte								1.00	-0.33	-0.60	-0.32	-0.83	-0.38	0.24
Windgeschwindigkeit									1.00	0.46	0.49	-0.07	0.49	-0.65
Niederschlag										1.00	0.17	0.22	0.96	-0.51
Globalstrahlung											1.00	0.16	0.13	-0.29
Pot. Evaporation												1.00	-0.06	0.25
Differenz Niederschlag-Evaporation													1.00	-0.59
Kontinentalität														1.00

4.4 P-Werte für Veränderung der Korrelationen

Bemerkungen: Die Zeichen in den Klammern nach den P-Werten geben die Richtung der Veränderung der Korrelationen über die Zeit an:

+ = Zunahme der Korrelation, -= Abnahme der Korrelation.

	SO ₂	NH ₃ gas	PM ₁₀	AOT _{4of}	NO ₂	Höhe	Temperatur	Luftfeuchte	Windgeschwindigkeit	Niederschlag	Globalstrahlung	Pot. Evaporation	Differenz Niederschlag-Evaporation	Kontinentalität
SO ₂	*	<0.001(+)	<0.001(-)	<0.001(-)	0.01(-)	0.35(-)	<0.001(+)	<0.001(+)	<0.001(-)	0.01(-)	<0.001(+)	<0.001(-)	<0.001(-)	0.82(+)
NH ₃ gas		*	<0.001(+)	<0.001(-)	<0.001(+)	<0.001(-)	<0.001(+)	<0.001(+)	<0.001(+)	<0.001(-)	<0.001(-)	<0.001(-)	<0.001(-)	<0.001(+)
PM ₁₀			*	<0.001(-)	0.55(-)	0.97(-)	0.57(-)	<0.001(+)	0.07(-)	<0.001(+)	<0.001(+)	<0.001(-)	<0.001(+)	0.28(-)
AOT _{4of}				*	0.14(-)	<0.001(+)	<0.001(-)	<0.001(-)	<0.001(+)	<0.001(+)	<0.001(+)	<0.001(+)	<0.001(+)	<0.001(-)
NO ₂					*	0.36(+)	0.51(-)	<0.001(+)	0.49(-)	<0.001(+)	<0.001(+)	<0.001(-)	<0.001(+)	0.01(-)
Höhe						*	0.79(+)	<0.001(-)	0.57(-)	0.07(-)	<0.001(-)	<0.001(+)	0.02(-)	0.69(+)
Temperatur							*	<0.001(+)	0.12(-)	<0.001(+)	<0.001(+)	<0.001(-)	<0.001(+)	0.27(+)
Luftfeuchte								*	<0.001(-)	<0.001(-)	<0.001(+)	<0.001(+)	<0.001(-)	<0.001(+)
Windgeschwindigkeit									*	<0.001(-)	<0.001(-)	0.02(+)	0.03(-)	0.33(-)
Niederschlag										*	<0.001(-)	<0.001(+)	0.01(+)	<0.001(-)
Globalstrahlung											*	0.07(+)	<0.001(-)	<0.001(+)
Pot. Evaporation												*	<0.001(+)	<0.001(-)
Differenz Niederschlag-Evaporation													*	<0.001(-)
Kontinentalität														*

=*

5 Verlauf der Entropie und des IAP18

5.1 Entropie

Arbeitsschritte: Berechnung der Shannon-Entropie (siehe Abschnitt 2: Variablendefinition) nach Georaum und Jahr. Es wurden nur Georäume verwendet, die wiederholt erfasst wurden. Mit einem random-effects-Modell wurde berechnet, ob sich die Entropie zwischen den Zeitperioden (1988–1994, 1995–2001, 2003–2010) verändert hat. Ebenfalls wurde getestet, ob sich die Veränderung der Entropie signifikant zwischen ländlichen und urbanen Gebieten unterscheidet. Als ländliche Gebiete gelten: Appenzell, Luzern Land, Neuenburg, Innerschwyz, Zug, Ausserschwyz West, Ausserschwyz Ost.

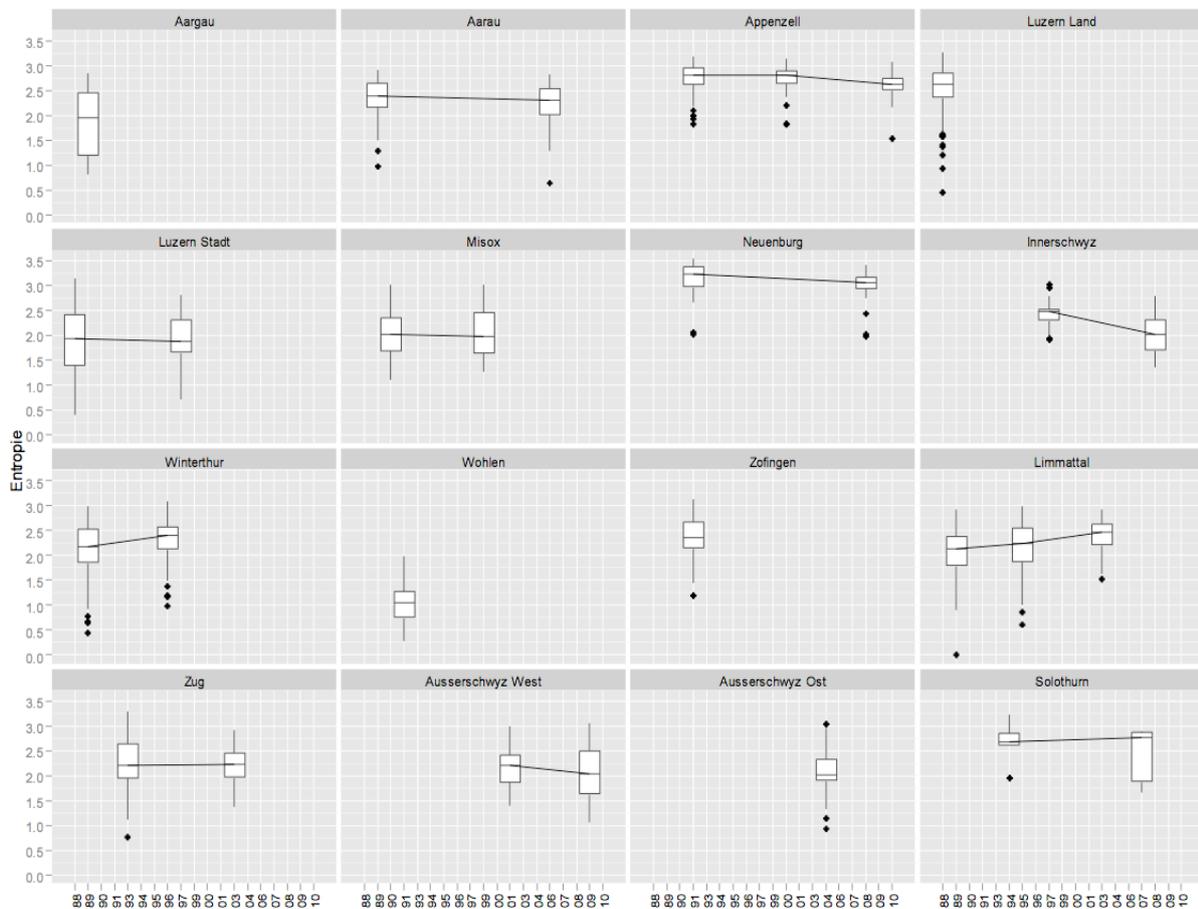


Abbildung 1: Boxplots der Shannon-Entropie der 993 Georäume separat nach Gebiet und Jahr. Die Entropie war in der Zeitperiode von 2003–2010 in ländlichen Gebieten um 0.32 Einheiten niedriger als in urbanen ($t=-6.45$, $p<0.001$).

5.2 IAP18

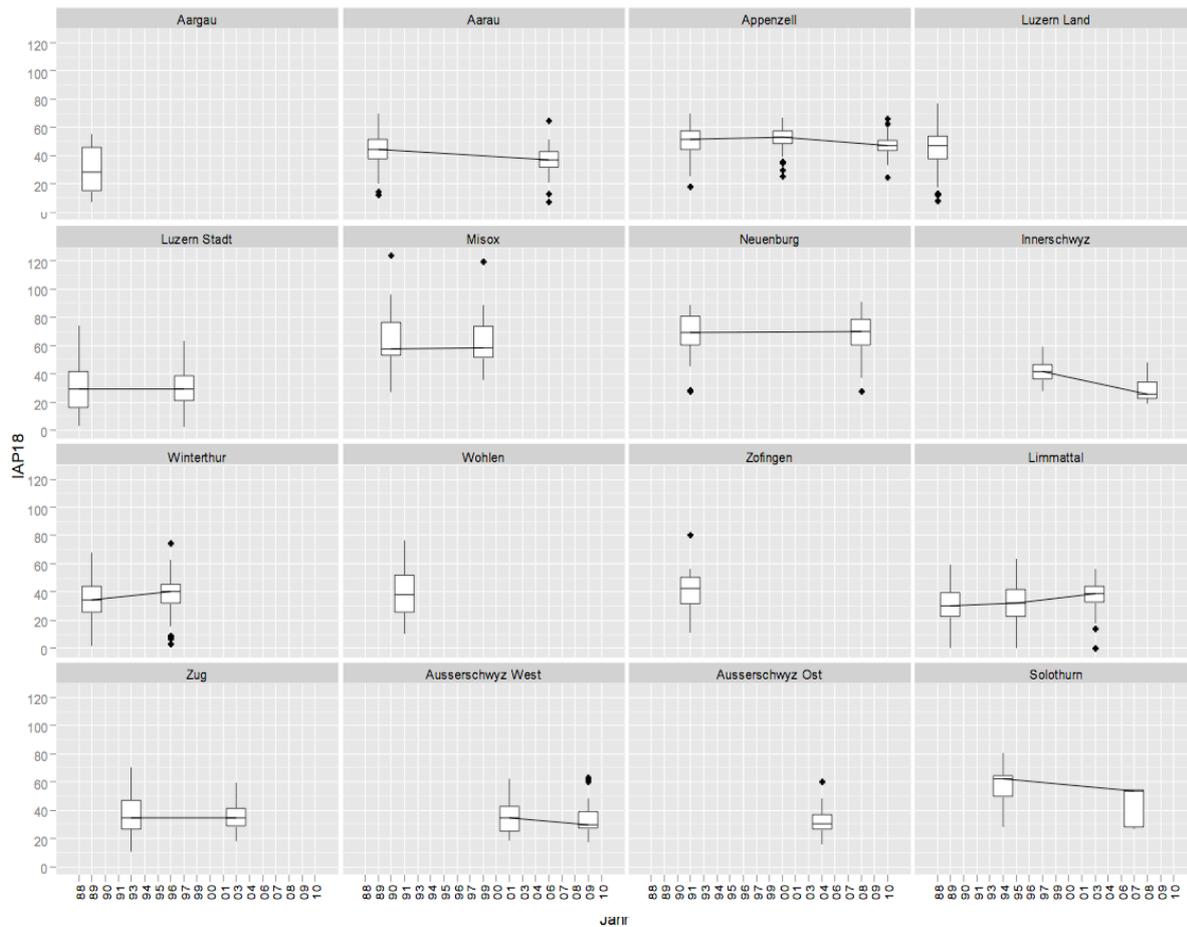


Abbildung 2: Boxplots des IAP18 der 993 Georäume separat nach Gebiet und Jahr. Der IAP18 war in der Zeitperiode von 2003–2010 in ländlichen Gebieten um 5.4 Einheiten niedriger als in urbanen ($t=-4.41$, $p<0.001$).

6 Neue Modelle

Modell: $NH_3score = b_0 + b_1 * Flechte1 + b_2 * Flechte2 + \dots + b_Z * FlechteZ$

Arbeitsschritte: Ausreissertests, Modellselektion (Berechnung der P-Werte unter Berücksichtigung des Clusterings innerhalb der Gebiete und Georäume und der Zeit der Flechtenerhebung).

Jeder Flechtenerhebung wurde die entsprechende Schadstoffmessung zugeordnet (nach Jahr).

Ausgeschlossene Ausreisser:

- Gebiet 14, Grossraum 10, Georaum 110, Zeit 1988. Cook's distance = 0.009
- Gebiet 14, Grossraum 21, Georaum 135, Zeit 1988. Cook's distance = 0.021
- Gebiet 14, Grossraum 37, Georaum 246, Zeit 1988. Cook's distance = 0.007
- Gebiet 25, Grossraum 21, Georaum 37, Zeit 2004. Cook's distance = 0.050
- Gebiet 25, Grossraum 21, Georaum 41, Zeit 2004. Cook's distance = 0.027
- Gebiet 17, Grossraum 0, Georaum 22, Zeit 2008. Cook's distance = 0.041
- Gebiet 12, Grossraum 14, Georaum 32, Zeit 2010. Cook's distance = 1.012

6.1 NH3Score über alle Zeitperioden auf Georaumebene (n=1479)

$$\text{NH3score}_{88-10} = 8.99 + 0.32*\text{tili} + 0.68*\text{ads} + 0.62*\text{phly} - (0.22*\text{xfal} + 0.24*\text{hphy} + 0.65*\text{aip} + 0.49*\text{orb} + 0.32*\text{gtul} + 1.17*\text{gris} + 0.59*\text{sul})$$

$$\text{Adj. } R^2 = 0.403$$

6.1.1 NH3Score über alle Zeitperioden auf Grossraumebene (n=253)

$$\text{NH3score}_{88-10} = 9.68 + 1.09*\text{ads} + 1.25*\text{phly} - (1.24*\text{orb} + 0.97*\text{sul} + 0.60*\text{gtul} + 0.41*\text{hphy})$$

$$\text{Adj. } R^2 = 0.621$$

6.1.2 NH3Score über alle Zeitperioden auf Gebietsebene (n=30)

$$\text{NH3score}_{88-10} = 7.85 + 0.41*\text{ads} + 1.33*\text{phly} + 0.60*\text{tili} + 1.10*\text{xtul} - (1.51*\text{sul} + 0.86*\text{xfal} + 0.71*\text{lsub} + 5.30*\text{gris})$$

$$\text{Adj. } R^2 = 0.737$$

6.2 NH3Score für verschiedene Zeitperioden auf Georaumebene

1988–1994 (n=753)

$$\text{NH3score}_{88-94} = 8.96 + 0.37*\text{tili} + 0.83*\text{ads} + 0.78*\text{phly} - (0.16*\text{xtul} + 0.26*\text{xfal} + 0.65*\text{gris} + 0.25*\text{hphy} + 0.24*\text{gtul} + 0.30*\text{orb} + 1.06*\text{aip} + 0.65*\text{sul})$$

$$\text{Adj. } R^2 = 0.554$$

1995–2001 (n=331)

$$\text{NH3score}_{95-01} = 6.57 + 0.16*\text{lsub} + 0.22*\text{phly} + 0.25*\text{ads} + 0.51*\text{tili} - (0.12*\text{sul} + 0.37*\text{gris} + 0.14*\text{orb} + 0.20*\text{hphy} + 0.29*\text{xfal} + 0.38*\text{gtul} + 0.90*\text{aip})$$

$$\text{Adj. } R^2 = 0.546$$

2003–2010 (n=395)

$$\text{NH3score}_{03-10} = 10.27 + 1.38*\text{pse} + 0.26*\text{ads} + 0.37*\text{phly} - (0.33*\text{hphy} + 0.94*\text{aip} + 0.32*\text{gtul} + 1.03*\text{gris} + 0.58*\text{sul})$$

$$\text{Adj. } R^2 = 0.395$$

6.2.1 Zusammenfassung NH3Score Koeffizienten der verschiedenen Flechten mit p-Werten

Flechtenart	88-10	P-Wert	88-94	P-Wert	95-01	P-Wert	03-10	P-Werte	Veränderung
ads	0.68	0.00	0.83	0.00	0.25	0.00	0.26	0.00	durchwegs +
aip	-0.65	0.01	-1.06	0.00	-0.90	0.00	-0.94	0.03	durchwegs –
orb	-0.49	0.00	-0.30	0.00	-0.14	0.13			durchwegs –
phly	0.62	0.00	0.78	0.00	0.22	0.00	0.37	0.00	durchwegs +
sul	-0.59	0.00	-0.65	0.00	-0.12	0.15	-0.58	0.00	durchwegs –
subr									
tili	0.32	0.01	0.37	0.00	0.51	0.00			durchwegs +
xfal	-0.22	0.15	-0.26	0.07	-0.29	0.01			durchwegs –
gtul	-0.32	0.00	-0.24	0.01	-0.38	0.00	-0.32	0.02	durchwegs –
xtul			-0.16	0.10					
lsub					0.16	0.13			
hphy	-0.24	0.07	-0.25	0.01	-0.20	0.04	-0.33	0.13	durchwegs –
gris	-1.17	0.00	-0.65	0.04	-0.37	0.14	-1.03	0.00	durchwegs –
pse							1.38	0.02	

Bemerkungen: Obwohl zu den unterschiedlichen Zeitabschnitten unterschiedliche Flechten ins Modell aufgenommen werden, sind die Koeffizienten stabil bezüglich des Vorzeichens.

Legende zu den Veränderungen: 0=nicht signifikant, +=positives Vorzeichen, -=negatives Vorzeichen.

6.3 Abhängigkeit der NH3Score, des IAP18 und der Entropie von Umweltdaten

Arbeitsschritte: Als Prädiktoren wurden jeweils Dreijahresdurchschnitte der Variablen genommen. Mittels einer Faktorenanalyse mit 3 Faktoren wurde festgestellt, dass einige Prädiktoren eine hohe Multikollinearität aufweisen, d.h., die Prädiktoren sind ihrerseits miteinander korreliert und führen zu Redundanzen im Regressionsmodell. Aus jedem Cluster von stark miteinander korrelierten Prädiktoren wurde diejenige Variable ausgewählt, die den höchsten Zusammenhang mit dem Outcome zeigte. Die Cluster waren wie folgt (die fett gedruckte Variable wurde als Prädiktor genommen): SO₂-PM10-NO₂; Globalstrahlung-Niederschlag; Höhe-Temperatur; Luftfeuchte- Potentielle Evaporation.

6.3.1 Umfassendes NH3Score innerhalb der 3 Zeitabschnitte

	88-94	P-Wert	95-01	P-Werte	03-10	P-Werte	Veränderung
Temperatur	0.05	0.88	0.45	0.16	-0.25	0.52	0/+/0
Kontinentalität	0.71	0.09	0.08	0.63	-0.35	0.33	+/0/0
Luftfeuchte	-0.05	0.60	0.23	0.07	0.03	0.84	0/+/0
Windgeschwindigkeit	0.66	0.001	0.88	0.005	-0.32	0.34	+/+/0
Globalstrahlung	-0.12	<0.001	-0.05	0.23	0.05	0.41	-/0/0
SO ₂	-0.16	<0.001	-0.39	<0.001	-0.63	0.06	durchwegs –
Ozon	-0.22	<0.001	0.02	0.72	0.09	0.34	-/0/0
NH ₃ gas	0.42	<0.001	0.47	<0.001	0.29	<0.001	durchwegs +
Adjusted R ²	0.58		0.50		0.38		

6.3.2 Perioden-spezifische NH3Score innerhalb der 3 Zeitabschnitte

	88-94	P-Wert	95-01	P-Werte	03-10	P-Werte	Veränderung
Temperatur	0.004	0.99	0.07	0.77	-0.40	0.19	0/0/+
Kontinentalität	1.01	0.04	-0.29	0.03	-0.56	0.03	+/-/-
Luftfeuchte	0.03	0.82	0.07	0.43	-0.28	0.008	0/0/-
Windgeschwindigkeit	0.80	0.001	0.66	0.004	-0.14	0.60	+/+0
Globalstrahlung	-0.15	<0.001	-0.003	0.91	-0.01	0.82	-/0/0
SO2	-0.21	<0.001	-0.20	0.01	0.04	0.87	-/-0
Ozon	-0.16	0.002	-0.02	0.60	-0.16	0.02	-/0/-
NH3gas	0.51	<0.001	0.35	<0.001	0.39	<0.001	+/+/+
Adjusted R2	0.61		0.67		0.53		

6.3.3 IAP18 innerhalb der 3 Zeitabschnitte

	88-94	P-Wert	95-01	P-Werte	03-10	P-Werte	Veränderung
Temperatur	-8.97	0.01	-0.33	0.81	5.66	0.001	-/-/+
Kontinentalität	13.53	<0.01	1.74	0.02	3.94	0.03	+/+0
Luftfeuchte	-2.27	0.009	0.38	0.48	2.79	<0.001	-/0/+
Windgeschwindigkeit	2.66	0.117	5.78	<0.001	3.17	0.04	+/+/+
Globalstrahlung	0.25	0.36	0.15	0.41	0.48	0.09	0/0/+
SO2	-0.54	0.06	-1.55	0.001	-9.95	<0.001	-/-/-
Ozon	2.03	<0.001	2.05	<0.001	2.16	<0.001	+/+/+
NH3GAS	-0.10	0.68	-0.42	0.13	-1.50	<0.001	0/-/-
Adjusted R2	0.44		0.60		0.45		

6.3.4 Entropie innerhalb der 3 Zeitabschnitte

	88-94	P-Wert	95-01	P-Werte	03-10	P-Werte	Veränderung
Temperatur	-0.31	0.08	-0.03	0.55	0.08	0.05	-/0/+
Kontinentalität	0.48	0.00	0.06	0.03	0.04	0.29	+/+0
Luftfeuchte	-0.06	0.17	0.01	0.60	0.06	0.00	-/0/+
Windgeschwindigkeit	0.09	0.29	0.23	0.00	0.03	0.54	0/+0
Globalstrahlung	-0.01	0.56	0.00	0.77	0.02	0.01	0/0/+
SO2	-0.03	0.04	-0.09	0.00	-0.23	0.00	-/-/-
Ozon	0.01	0.71	-0.01	0.25	0.03	0.00	0/0/+
NH3GAS	0.02	0.11	0.01	0.46	-0.02	0.00	+/0/-
Adjusted R2	0.38		0.40		0.34		

6.3.5 Nitroindex innerhalb der 3 Zeitabschnitte

	88-94	P-Wert	95-01	P-Werte	03-10	P-Werte	Veränderung
Temperatur	0.07	0.13	0.12	<0.001	-0.004	-0.18	+/+/-
Kontinentalität	0.06	0.23	-0.009	0.56	-0.03	0.06	0/0/-
Luftfeuchte	0.02	0.17	0.004	0.72	-0.01	0.05	+/0/-
Windgeschwindigkeit	0.01	0.62	-0.02	0.43	0.04	0.05	0/0/+
Globalstrahlung	0.003	0.41	0.008	0.03	-5.40	0.99	0/+0

	88-94	P-Wert	95-01	P-Werte	03-10	P-Werte	Veränderung
SO2	-0.02	<0.001	-0.03	<0.001	0.04	0.04	0/0/-
Ozon	0.002	0.67	0.001	0.79	-0.02	<0.001	+/0/-
NH3GAS	0.02	<0.001	0.02	<0.001	0.02	<0.001	0/0/+
Adjusted R2	0.37		0.40		0.29		

7 Modelle nur für Appenzell

7.1 NH3Score nur für Appenzell

Vorgehen: Lineare Regression mit NH₃gas als abhängiger Variable und den Flechten als unabhängigen Variablen. Flechten mit einem P-Wert < 0.2 wurden in die finalen Modelle eingeschlossen. Es wurden nur solche Georäume berücksichtigt, die 3 Mal erfasst wurden (91 Georäume).

7.2 NH3Score nur für Appenzell über alle Zeitperioden auf Georaumbene (n=273)

$$\text{NH3score}_{88-10} = 12.45 + 0.24 \cdot \text{ads} + 0.13 \cdot \text{subr} + 0.18 \cdot \text{tili} + 0.14 \cdot \text{xfal} + 0.1 \cdot \text{xtul} - (0.23 \cdot \text{orb} + 0.26 \cdot \text{phly} + 0.17 \cdot \text{sul} + 0.28 \cdot \text{gtul} + 0.12 \cdot \text{lsub} + 0.33 \cdot \text{hphy})$$

Adj. R²=0.36

7.3 NH3Score nur für Appenzell für verschiedene Zeitperioden auf Georaumbene

1988–1994 (n=91)

$$\text{NH3score}_{88-94} = 12.12 + 0.34 \cdot \text{ads} + 0.22 \cdot \text{tili} - (0.54 \cdot \text{pse} + 0.44 \cdot \text{hphy} + 0.23 \cdot \text{lsub} + 0.21 \cdot \text{phly} + 0.26 \cdot \text{gtul})$$

Adj. R²=0.46

1995–2001 (n=91)

$$\text{NH3score}_{95-01} = 10.63 + 10.15 \cdot \text{xtul} + 0.23 \cdot \text{ads} + 0.17 \cdot \text{tili} - (0.24 \cdot \text{sul} + 0.46 \cdot \text{aip} + 0.28 \cdot \text{gtul} + 0.24 \cdot \text{lsub})$$

Adj. R²=0.44

2003–2010 (n=91)

$$\text{NH3score}_{03-10} = 8.03 + 0.36 \cdot \text{orb} + 0.33 \cdot \text{subr} + 0.28 \cdot \text{tili} - (0.17 \cdot \text{sul} + 0.33 \cdot \text{gtul} + 0.31 \cdot \text{xtul})$$

Adj. R²=0.45

Flechtenart	88-10	P-Wert	88-94	P-Wert	95-01	P-Wert	03-10	P-Werte	Veränderung
ads	0.24	0.00	0.34	0.00	0.23	0.05			durchwegs +
aip					-0.46	0.04			
orb	-0.23	0.00					0.36	0.00	
phly	-0.26	0.00	-0.21	0.02					
sul	-0.17	0.03			-0.24	0.00	-0.17	0.08	durchwegs -
subr	0.13	0.17					0.33	0.01	
tili	0.18	0.00	0.22	0.00	0.17	0.02	0.28	0.00	durchwegs +
xfal	0.14	0.02							
gtul	-0.28	0.00	-0.26	0.03	-0.28	0.02	-0.33	0.02	durchwegs -
xtul	0.10	0.19			0.15	0.15	-0.31	0.00	+/-
lsub	-0.12	0.08	-0.23	0.01	-0.24	0.02			durchwegs -
hphy	-0.33	0.12	-0.44	0.08					
gris									
pse			-0.54	0.16					
Adjusted R2	0.329		0.417		0.391		0.411		

Bemerkungen: 5 von 6 Flechtenarten, die wiederholt ins Modell aufgenommen wurden, verändern ihr Vorzeichen nicht. Es zeigen sich jedoch einige Unterschiede in der Zusammensetzung der NH3Score zu den unterschiedlichen Zeitpunkten.

7.4 Abhängigkeit der NH3Score, des IAP18 und der Entropie von Schadstoff- und Meteodaten (nur für Appenzell)

7.4.1 Umfassendes NH3Score innerhalb der 3 Zeitabschnitte

	88-94	P-Wert	95-01	P-Werte	03-10	P-Werte	Veränderung
Temperatur	-1.19	0.45	1.19	0.59	-6.46	0.02	0/0/-
Kontinentalität	1.12	0.64	-1.92	0.41	11.12	0.02	0/0/+
Luftfeuchte	-0.90	0.04	-0.64	0.23	-1.16	0.02	-/0/-
Windgeschwindigkeit	0.53	0.07	0.79	0.004	0.82	0.009	durchwegs +
Globalstrahlung	0.10	0.18	0.05	0.46	0.11	0.06	+/0/+
SO2	0.17	0.03	0.09	0.82	0.63	0.46	+/0/0
Ozon	-0.09	0.42	-0.21	0.04	-0.19	0.41	0/-/0
NH3gas	0.38	<0.001	0.45	<0.001	0.17	0.008	durchwegs +
Adjusted R2	0.52		0.57		0.28		

7.4.2 Perioden-spezifische NH3Score innerhalb der 3 Zeitabschnitte

	88-94	P-Wert	95-01	P-Werte	03-10	P-Werte	Veränderung
Temperatur	-2.57	0.12	0.76	0.70	-5.29	0.02	-/0/-
Kontinentalität	3.06	0.22	-1.74	0.41	9.08	0.02	0/0/+
Luftfeuchte	-1.31	0.004	-0.60	0.22	-0.87	0.03	-/0/-
Windgeschwindigkeit	0.27	0.38	0.77	0.002	0.85	0.001	0/+/+
Globalstrahlung	-0.09	0.24	-0.05	0.41	0.07	0.12	0/0/+
SO2	0.04	0.65	0.16	0.66	0.90	0.20	0/0/0
Ozon	-0.05	0.70	-0.13	0.16	0.14	0.45	0/-/0
NH3gas	0.43	<0.001	0.41	<0.001	0.34	<0.001	durchwegs +
Adjusted R2	0.53		0.57		0.58		

7.4.3 IAP18 innerhalb der 3 Zeitabschnitte

	88-94	P-Wert	95-01	P-Werte	03-10	P-Werte	Veränderung
Temperatur	0.69	0.96	-0.04	1.00	-18.23	0.25	0/0/0
Kontinentalität	-3.52	0.85	1.91	0.90	30.66	0.27	0/0/0
Luftfeuchte	1.28	0.71	-0.50	0.89	-1.40	0.62	0/0/0
Windgeschwindigkeit	-1.45	0.52	0.75	0.70	-1.66	0.37	0/0/0
Globalstrahlung	0.41	0.51	0.24	0.59	-0.18	0.59	0/0/0
SO2	-0.73	0.29	-2.07	0.42	12.00	0.02	0/0/+
Ozon	5.14	<0.001	2.19	<0.001	6.14	<0.001	durchwegs +
NH3gas	-1.27	0.006	0.11	0.77	0.54	0.14	-/0/+
Adjusted R2	0.46		0.33		0.21		

7.4.4 Entropie innerhalb der 3 Zeitabschnitte

	88-94	P-Wert	95-01	P-Werte	03-10	P-Werte	Veränderung
Temperatur	0.55	0.14	-0.10	0.82	-0.22	0.69	+/0/0
Kontinentalität	-0.62	0.28	0.26	0.59	0.47	0.62	0/0/0
Luftfeuchte	0.10	0.31	-0.04	0.73	-0.03	0.76	0/0/0
Windgeschwindigkeit	-0.003	0.97	-0.0006	0.99	-0.11	0.09	0/0/-
Globalstrahlung	0.02	0.17	0.001	0.93	-0.008	0.48	+/0/0
SO2	-0.03	0.12	-0.12	0.14	0.14	0.41	-/-/0
Ozon	0.14	<0.001	0.06	0.002	0.21	<0.001	durchwegs +
NH3gas	-0.03	0.01	0.01	0.22	0.03	0.01	-/0/+
Adjusted R2	0.39		0.30		0.28		

7.4.5 Nitroindex innerhalb der 3 Zeitabschnitte

	88-94	P-Wert	95-01	P-Werte	03-10	P-Werte	Veränderung
Temperatur	-0.80	<0.001	-0.57	0.02	-0.29	0.30	-/-/0
Kontinentalität	1.12	<0.001	0.65	0.01	0.61	0.20	+/+/+
Luftfeuchte	-0.20	<0.001	-0.19	0.002	-0.11	0.03	-/-/-
Windgeschwindigkeit	-0.06	0.10	0.01	0.70	0.06	0.05	-/0/+
Globalstrahlung	-0.03	0.004	-0.02	0.02	0.006	0.28	-/-/0
SO2	-0.02	0.08	-0.07	0.11	-0.03	0.69	-/-/0
Ozon	-0.01	0.32	-0.01	0.25	-0.02	0.39	0/0/0
NH3gas	0.04	<0.001	0.03	<0.001	0.03	<0.001	+/+/+
Adjusted R2	0.36		0.28		0.26		