



**School of
Engineering**

IDP Institut für Datenanalyse
und Prozessdesign

Validierung der Schweizer Ammoniak-Immissionskarte 2010

René Locher

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

IDP Environmetrics, Nr. 5 (2014)

Validierung der Schweizer Ammoniak-Immissionskarte 2010

René Locher

Herausgeber

Institut für Datenanalyse und Prozessdesign
Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

Schriftenreihe IDP-Environmetrics, 5 (2014)
ISBN: 978-3-905745-75-7

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Abt. Luftreinhaltung und Chemikalien
CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Hinweis

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst.
Für den Inhalt ist allein der Herausgeber verantwortlich.

Alle Rechte vorbehalten
© Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Winterthur, 1. Dezember 2014

Kontakt

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Institut für Datenanalyse und Prozessdesign,
www.idp.zhaw.ch
rene.locher@zhaw.ch

Management Summary

Ammoniak ist ein Gas, das hauptsächlich durch die landwirtschaftliche Tierproduktion und die Düngerverwendung in die Umwelt gelangt. Dieser Luftfremdstoff spielt auch eine Rolle bei der Anreicherung von Ammoniumsalzen im Feinstaub und wirkt auf diesem Weg und durch direkte Deposition des Ammoniaks (NH_3) als versauernde und eutrophierende Substanz im Boden und den Gewässern. Deshalb ist Ammoniak auch Bestandteil der UNECE-Konvention von Genf über die weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung. Immissionsmessungen von Ammoniak sind ein wichtiges Instrument der Erfolgskontrolle bei der Umsetzung der Massnahmen zur Reduktion der Ammoniak-Emissionen im Rahmen der aktuellen Luftreinhalte- und Agrarpolitik in der Schweiz.

Seit Mitte 1999 werden deshalb in der Schweiz vom BAFU und den Kantonen finanzierte Ammoniak-Messungen mittels Passivsammlern (PS) vorgenommen. Seit Anfang dieses Jahrtausends berechnet zudem Meteotest im Auftrag des BAFU in regelmässigen Abständen flächendeckende Karten über die Ammoniakkonzentration in der Schweiz. Die Berechnungen basieren auf Emissionsinventaren und physikalischen Modellen. Die so berechneten Kartenwerte wurden bis dato jeweils relativ pauschal mit den an den jeweiligen Standorten gemessenen Mehrjahresmitteln verglichen. Mittlerweile liegen nun Ansätze zur Witterungsbereinigung der Ammoniakmessungen vor, welche im Schweizer Mittelland durchgeführt wurden. Zudem stieg auch die Anzahl Messpunkte von rund 40 auf über 100, von denen Ende 2011 bis zu 12-jährige Messreihen vorlagen.

Ziel dieses Projekts war ein Vergleich der Konzentrationen gemäss Ammoniak-Karte 2010 mit den Jahresmitteln 2010 der meteobereinigten Messungen unter Einbezug weiterer Eigenschaften der Messorte. Damit sollte einerseits die Qualität der vorliegenden Ammoniak-Immissionskarten überprüft werden. Andererseits sollten mit dem gewonnenen Wissen allfällige systematische Abweichungen der Kartenwerte von den Messwerten korrigiert werden.

In einem ersten Schritt wurde ein statistisches Modell entwickelt, welches den saisonalen Verlauf der Ammoniakkonzentrationen für alle 97 (landwirtschaftlich und städtisch geprägten) Standorte in der Schweiz modellieren konnte, welche in der Regel unterhalb der Inversionsgrenze liegen und nicht von starken Berg-Talwind-Systemen betroffen sind. Die tiefsten Werte wurden in den Wintermonaten Dezember bis Februar beobachtet. Die Immissionsspitzen im März und November, welche mit den Gülleaktivitäten der Landwirte erklärt wurden, waren nur an den landwirtschaftlich beeinflussten Standorten ausgeprägt.

Bei den neun Berg-Standorten, welche in der Regel über der Inversionsgrenze liegen, wurden generell tiefere Werte aber mit einem ausgeprägteren Jahresgang als im Mittelland gemessen. An beiden Standorttypen wurden aber in den warmen Monaten höhere Konzentrationen gemessen als im Winter. Der ausgeprägtere Jahresgang an den Berg-Standorten wurde mit unterschiedlichen Stabilität der Luftschichten in der kalten Jahreszeit erklärt. Während im Mittelland die inversiven Wetterlagen während der kalten Jahreszeit die vertikale Verdünnung der Ammoniak-Emissionen behinderten, war die vertikale Verdünnung oberhalb der Inversionsschicht ungestört, so dass die gemessenen Immissionen im Winter entsprechend tief ausfielen. Dieser Effekt wurde zusätzlich durch tendenziell tiefere Emissionen während des Winters aufgrund von häufiger mit Schnee bedeckten Flächen und tieferem Viehbestand (Alpweiden) verstärkt.

Umgekehrt verhielt sich der Jahresgang an den sechs Tal-Standorten im Einflussbereich ausgeprägter Berg-Talwind-Systeme. Dort wurden die höchsten Werte im Winter und die

tiefsten im Sommer beobachtet. Diese Berg-Talwind-Systeme weisen im Sommer sehr viel höhere Windgeschwindigkeiten als im Winter auf, so dass die (Ammoniak-)Emissionen besonders im Sommer sehr effizient verdünnt werden.

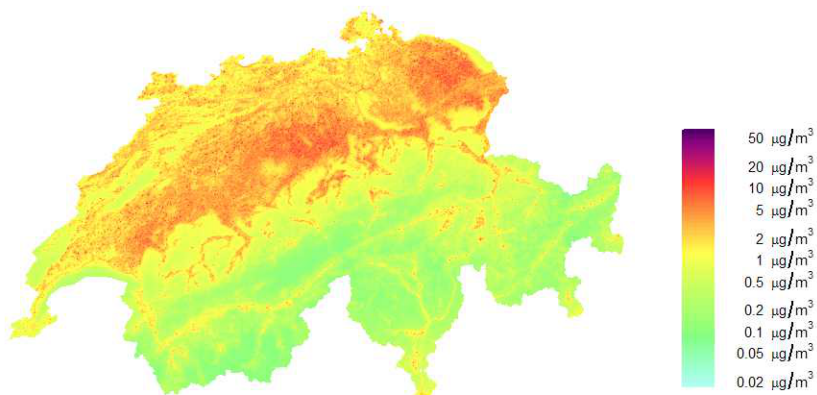
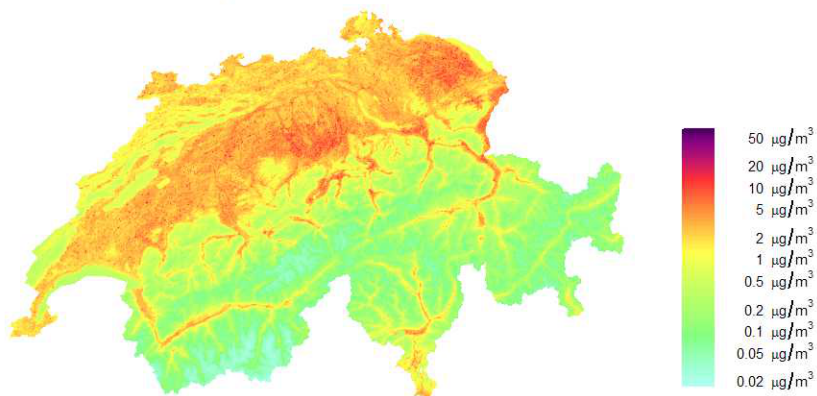
Im statistischen Modell für die Optimierung der Immissionskarten wurden anschliessend die Differenzen (Kartenwerte – bereinigte Jahresmittelwerte) als Funktion der Höhe ü. Meer, der Variabilität der Höhen ü. Meer im Umkreis von 300 m um diesen Standort und als Funktion der Region (nördlich bzw. südlich der Alpen) beschrieben. Die Analysen zeigten, dass an der Hälfte der 112 PS-Standorte die entsprechenden Kartenwerte bei 87% der meteobereinigten Jahresmittel 2010 oder tiefer lagen. Die Unterschätzung der Messwerte war systematischer Natur und stärker:

- südlich der Alpen (im Vergleich zu den Gebieten nördlich der Alpen)
- in Tälern (im Vergleich zu höher gelegenen Lagen)

Mittels des statistischen Modells für die Optimierung der Immissionskarten konnten die Kartenwerte so korrigiert werden, dass der Bias verschwand und die Differenzen zwischen Karten- und entsprechenden meteobereinigten Messwerten für 2010 im Durchschnitt um den Faktor 2 reduziert werden konnten. Zusätzlich kann die Diskussion der Residuenanalysen des *statistischen* Modells auch dazu verwendet werden, das *physikalische* Modell von Meteotest weiter zu verfeinern.

Die Analyse der Standorte zeigte ferner auf, dass im Hinblick auf eine weitere Verbesserung einer flächendeckenden Aussage über die Ammoniakkonzentrationen, die Verteilung der Messorte in Bezug auf verschiedene Kriterien optimiert werden sollte: Während im östlichen Mittelland und im Kanton Luzern generell genügend Standorte vorhanden sind, gibt es (im Jahr 2010) viel zu wenige im westlichen Mittelland, im Jura, im Wallis und in der Süd- und Südostschweiz. Ebenso müssten mehr Messungen in wenig belasteten Gebieten zwischen 0.3 und 1.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und an Standorten über 1200 m vorgenommen werden. Letzteres ist auch deshalb von besonderem Interesse, da sich hoch empfindliche Flächen eher in wenig belasteten Gebieten und in höheren Lagen befinden.

Insgesamt zeugte diese Analyse von einer erfreulich guten Übereinstimmung der Ammoniak-Immissionskarten mit entsprechenden Messungen, wenn man die komplexen Berechnungen berücksichtigt, welche den Immissionskarten zugrunde liegen. Die Werte der Originalkarte liegen (mit obigen Einschränkungen in Bezug auf die Repräsentativität) mit einer statistischen Sicherheit von 95% innerhalb von 35% und 210% der entsprechenden meteobereinigten Messwerte, während die Werte der korrigierten Karten sich innerhalb von 64% und 160% der entsprechenden meteobereinigten Messwerte befinden.

NH₃-Karte 2010 von MeteotestNH₃-Karte 2010 von Meteotest
mit statistischer Korrektur

Korrigierte Karte - Originalkarte von Meteotest

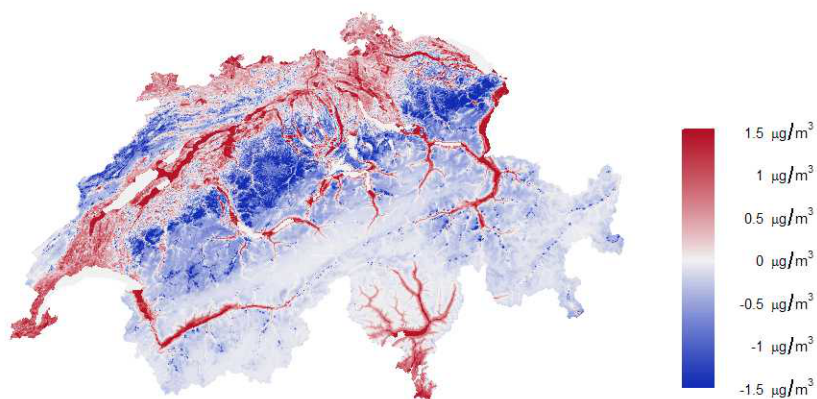


Abbildung 1: Ammoniak-Immissionskarten: Die statistische Korrektur führte insgesamt zu höheren Konzentrationen in den tiefer liegenden Tälern und zu geringeren Konzentrationen in höher gelegenen Gebieten. Die Aussagen über 1200 m und unter 1.3 µg/m³ sind statistisch noch nicht abgesichert, da in diesem Bereich noch an zu wenigen Standorten gemessen wurde.

Inhaltsverzeichnis

	Management Summary.....	i
1	Ausgangslage und Ziel der Arbeit.....	1
2	Beschreibung und Aufbereitung der Daten.....	2
3	Statistische Modelle.....	7
	3.1 Modell für die Witterungsbereinigung.....	7
	3.2 Modell für die Optimierung der Immissionskarten.....	12
4	Fazit.....	18
5	Danksagung.....	20
6	Literatur.....	21
7	Anhang.....	23
	7.1 Standorte der ausgewerteten Passivsammler.....	23

1 Ausgangslage und Ziel der Arbeit

Ammoniak ist ein Gas, das hauptsächlich durch die landwirtschaftliche Tierproduktion und die Düngerverwendung in die Umwelt gelangt. Dieser Luftfremdstoff spielt auch eine Rolle bei der Anreicherung von Ammoniumsalzen im Feinstaub und wirkt auf diesem Weg und durch direkte Deposition des Ammoniaks (NH_3) als versauernde und eutrophierende Substanz im Boden und den Gewässern. Deshalb ist Ammoniak auch Bestandteil der UNECE-Konvention von Genf über die weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung. Immissionsmessungen von Ammoniak sind ein wichtiges Instrument der Erfolgskontrolle bei der Umsetzung der Massnahmen zur Reduktion der Ammoniak-Emissionen im Rahmen der aktuellen Luftreinhalte- und Agrarpolitik in der Schweiz.

Seit Mitte 1999 werden deshalb in der Schweiz vom BAFU und den Kantonen finanzierte Ammoniak-Messungen mittels Passivsammlern (PS) vorgenommen. Seit Anfang dieses Jahrtausends berechnet zudem Meteotest im Auftrag des BAFU in regelmässigen Abständen flächendeckende Karten über die Ammoniakkonzentration in der Schweiz. Die Berechnungen basieren auf Emissionsinventaren und physikalischen Modellen, welche ihrerseits auf einer langjährig gemittelten Witterung basieren. Deshalb wurden die berechneten Kartenwerte bis dato relativ pauschal mit den gemessenen Mehrjahresmitteln verglichen, welche aber immer noch witterungsbedingten Schwankungen ausgesetzt sind. Mittlerweile liegen nun Ansätze zur Witterungs- und Trendbereinigung der Ammoniakmessungen vor, welche im Schweizer Mittelland durchgeführt wurden [1]. Zudem stieg auch die Anzahl Messpunkte von einigen wenigen Standorten auf mehrere Dutzend, von denen Ende 2011 bis zu 12-jährige Messreihen vorlagen.

Ziel dieses Projekts war deshalb ein Vergleich der Konzentrationen gemäss Ammoniak-Karte 2010 mit den Jahresmitteln der meteo- und trendbereinigten Messungen an den verschiedenen Messorten in der Schweiz unter Einbezug von weiteren Eigenschaften der Messorte. Damit sollte einerseits die Qualität der vorliegenden Ammoniakimmissionskarten überprüft werden. Andererseits sollten mit dem gewonnenen Wissen allfällige systematische Abweichungen der Kartenwerte von den Messwerten in Zukunft korrigiert werden.

2 Beschreibung und Aufbereitung der Daten

Für die Analyse wurden alle 112 Passivsammler-Standorte¹ berücksichtigt, an welchen im Jahr 2011 noch gemessen wurde und für welche mindestens eine einjährige Messreihe bis Ende 2011 existierte. Zeitlich wurde die Analyse auf Messungen mit Radiello-Passivsammlern eingeschränkt, d.h. auf Messungen ab 2004. Dabei wurden jeweils die Mittelwerte aller regulär² gemessenen Röhren pro Standort und Messperiode als Basis der Berechnungen verwendet. Vor 2004 wurde mit Zürcher-Passivsammlern gemessen, deren Messwerte nur ungenügend auf Radiello-Messungen homogenisiert werden können [2].

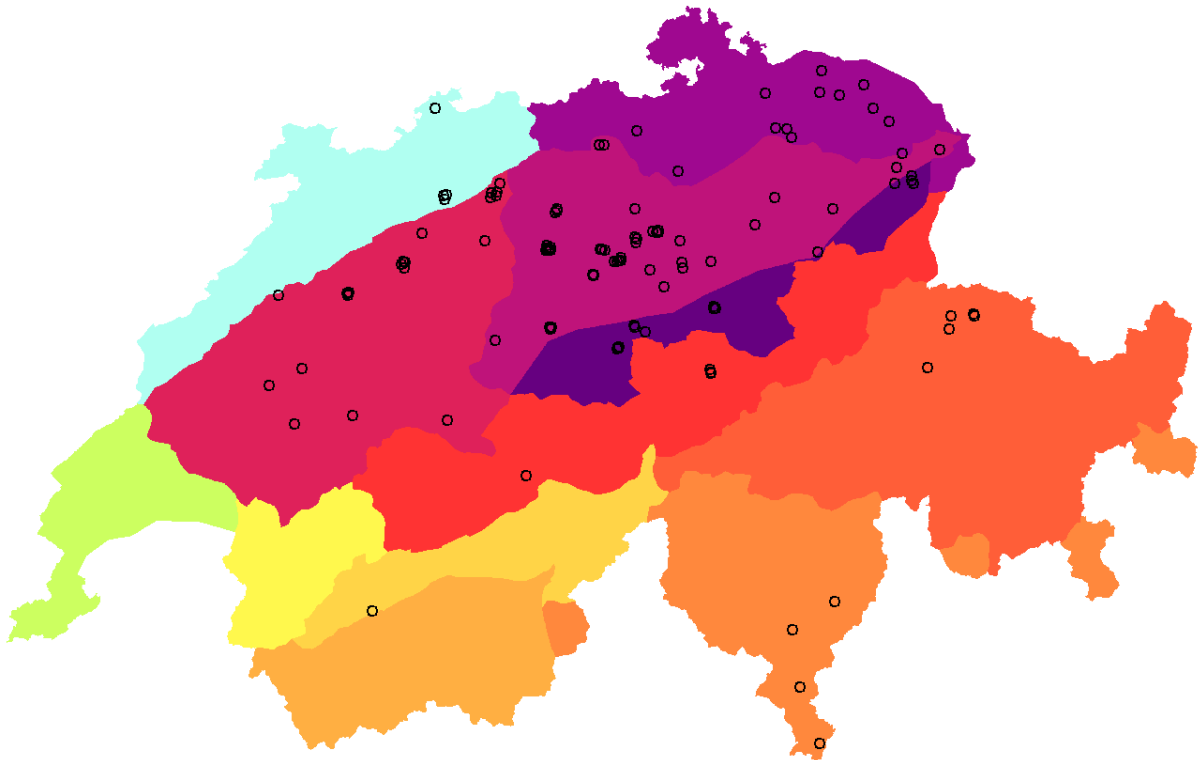


Abbildung 2.1:

Standorte der Passivsammler (schwarze Kreise) mit Strahlungsregionen der Schweiz (jede Region wurde mit einer andern Farbe eingefärbt), welche Meteotest für das Bundesamt für Energiewirtschaft für die Solarenergiebranche entwickelt hat [3]

Da am Standort der Ammoniakmessungen nur in Ausnahmefällen Meteodaten erfasst wurden, die spezifischen Meteobedingungen aber die Immissionswerte beeinflussen, mussten die meteorologischen Grössen an den Standorten der Passivsammlermessungen möglichst genau aus Messungen an Meteostationen in der Nähe geschätzt werden. Dazu wurden Messwerte aus dem regulären Messnetz von MeteoSchweiz verwendet. Die Daten der ausgewählten Meteostationen sollten dabei für die interessierenden Messgrössen möglichst lückenlos über die ganze Immissionsmessperiode vorhanden sein. Ferner sollten sich die Meteostationen vertikal und horizontal möglichst nahe bei den Standorten der Passivsammler (PS) befinden.

¹ Jede Schutzhülle mit jeweils ein bis drei Passivsammler-Röhren wird als eigener Standort gezählt.

² Werte von Röhren, welche aufgrund des Messprotokolls als fehlerhaft angenommen werden mussten, wurden verworfen. Die übrigen Werte wurden unabhängig von den Ergebnissen des FUB-Ausreissertests in den Mittelwert eingeschlossen.

Damit sollte sichergestellt werden, dass die Witterungsbedingungen am Standort der Meteorstation möglichst denjenigen am Standort der Passivsammler entsprachen (vgl. Abbildung 2.2). Zusätzlich wurde jedem der PS-Standorte eine Meteorstation in 1000 bis 1700 m ü. Meer zugeordnet, um entsprechende Höhenkorrekturen vornehmen zu können (vgl. weiter unten). Insgesamt wurden für alle PS-Standorte in der Schweiz nur fünf verschiedene Höhenstandorte verwendet (Tabelle 2.1), da solche mit durchgehenden Zeitreihen seit 2004 relativ rar sind. Da in der Höhe die Witterung sich grossräumiger verändert als in den Niederungen, war die Einschränkung auf so wenige Standorte vertretbar. Das detaillierte Vorgehen zur Zuordnung der Meteorstationen zu den PS-Standorten, zur Imputation fehlender Meteowerte und zur Berechnung der langjährig gemittelten saisonalen Verläufe der verschiedenen Meteogrößen wurde bereits im Bericht über den Vergleich der Zürcher- und Radiellopassivsammler [2] in den Kapiteln 6 und 13 beschrieben.

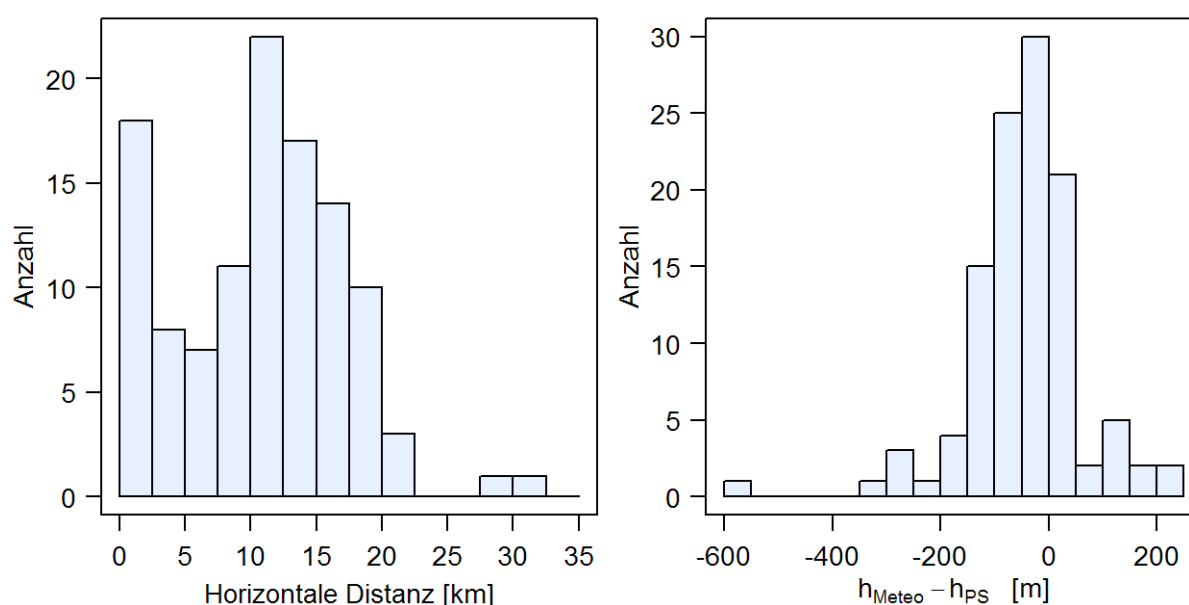


Abbildung 2.2: Distanzen Meteostandorte – Passivsammlerstandorte

Meteogrößen hängen bekanntlich stark von der Höhe über Meer ab, wobei die Höhenabhängigkeit wiederum von der aktuellen Schichtung der Atmosphäre beeinflusst wird. Diese Höhenabhängigkeit wurde durch lineare Interpolation bzw. Extrapolation der Meteowerte berücksichtigt, welche an den beiden einem Passivsammlerstandort zugeordneten Meteorstationen gemessen wurde (vgl. Formel 2.1). Dieses Verfahren erzeugt gute Ergebnisse, wenn sich beide Meteorstationen und der Passivsammler in der gleichen atmosphärischen Schicht befinden, z.B. im Hochsommer mit turbulenter Atmosphäre, im Winter mit Westwinden oder sofern sich beide Meteorstationen und der Passivsammlerstandort unterhalb bzw. oberhalb der Inversionsgrenze befinden. Dieses Verfahren wurde aber auch in den übrigen Fällen angewandt, wenn die drei Standorte in unterschiedlichen Luftschichten lagen. Technisch standen gar keine mit vertretbarem Aufwand zugängliche Alternativen zur Verfügung.

Die Höheninterpolation für die Standorte der Passivsammler wurde jeweils auf Tagesmittel (alle Meteogrößen ausser Niederschlag) bzw. Tagessummen (Niederschlag) angewandt und anschliessend auf die individuellen Messperioden der Passivsammler pro Standort verdichtet. (vgl. [2], Kapitel 7). In der Tabelle 2.2 sind die wichtigsten Meteogrößen aufgeführt, deren Eignung zur Witterungs- und Trendbereinigung der Immissionsmessungen überprüft wurde.

Die untersuchten Meteogrößen wurden aufgrund von chemisch-physikalisch Überlegungen als Größen identifiziert, welche theoretisch die gemessenen Ammoniakkonzentrationen beeinflussen könnten.

Standort	Kürzel	Höhe ü. Meer
Chaumont	cha	1073
Cimetta	CIM	1661
Hörnli	HOE	1132
Napf	NAP	1403
Pilatus	PIL	2106

Tabelle 2.1: Höhenstandorte für Meteomessungen

$$X_{P,t_i} = X_{M_a,t_i} + \frac{X_{M_b,t_i} - X_{M_a,t_i}}{H_{M_b} - H_{M_a}} \cdot (H_P - H_{M_a})$$

mit

X_{P,t_i} : Meteogröße X am Standort P des Passivsammlers
zum Zeitpunkt t_i der Messung

X_{M_a,t_i} : Meteogröße X am Standort M_a
in ungefähr gleicher Höhe wie der Standort P
zum Zeitpunkt t_i der Messung

X_{M_b,t_i} : Meteogröße X am Standort M_b
der Meteomessung in 1000 bis 1700 m Höhe
zum Zeitpunkt t_i der Messung

H : Höhe über Meer für entsprechende Standorte

Formel 2.1: Höhenkorrektur für Meteogrößen

In Tabelle 2.3 sind diejenigen kartografischen Größen aufgelistet, welche jeden einzelnen Kartenpunkt der Schweiz in einem 100 m * 100 m-Raster charakterisieren. Die Größen wurden von Meteotest berechnet und geben quantifizierbare Eigenschaften der Umgebung wieder, welche potentiell die Ausbreitung des Ammoniaks und dessen Quelldichte beschreiben. Standardabweichung, Minimum und Maximum der Größen wurden für eine Fläche um den jeweiligen Punkt mit Radien von 300 m bzw. 1000 m bestimmt. Der 1000 m-Radius erwies sich in der kleinräumigen Schweiz als zu gross, so dass bei der Evaluation der definitiven Modelle nur die Größen berücksichtigt wurden, welche auf einer Fläche mit 300 m Radius basierten.

Abkürzung	Meteozzeitreihe, Erläuterungen
T	Lufttemperatur in 2m ü. Boden. Bei erhöhten Temperaturen werden erhöhte Emissionen und in der Folge erhöhte Immissionen erwartet.
$T^{(min)}$	Minimales 10-min-Mittel des Tages der Lufttemperatur
$T^{(max)}$	Maximales 10-min-Mittel des Tages der Lufttemperatur
$T^{(grad)}$	Stabilität der Luftschicht. Vgl. Formel 2.2. Bei stabiler Schichtung der Atmosphäre können die Emissionen schlechter in die Vertikale verdünnt werden, sodass erhöhte Immissionen erwartet werden.
Td	Tau- (>0°C) bzw. Frostpunkt. Da Ammoniak sehr hygroskopisch ist, könnte die Emission des Ammoniaks von Feuchteparametern abhängen.
pw	Wasserdampfpartialdruck
hr	Relative Luftfeuchte. Werte über 100% sind als Nebel zu interpretieren.
ppt	Niederschlag
ws	Skalare Windgeschwindigkeit. Hohe Windgeschwindigkeiten verdünnen die Emissionen effizienter und führen zu niedrigeren Immissionswerten.
T_Td	$T - Td$
$T^{(min)}_Td$	$T^{(min)} - Td$
$T^{(range)}$	$T^{(max)} - T^{(min)}$. Temperaturschwankung innerhalb eines Tages
$frozen$	Gefrorener Boden: Lufttemperatur während des aktuellen Tages oder in den 7 Tagen davor im Mittel unter 0°C. Vgl. [2], Kap. 13.2
dry	Trockener Boden bei Temperaturen über 0°C: Der Niederschlag war während der letzten vier Tage insgesamt kleiner als 0.1 mm <i>und</i> gleichzeitig war der Boden gemäss obiger Definition <i>nicht</i> gefroren.

Tabelle 2.2: Wichtigste Meteozzeitreihen, welche für alle Standorte der Passivsammler zur Verfügung standen und als Basis für die Entwicklung des statistischen Modells für die Witterungsbereinigung dienen (vgl. Kap. 3.1).

$$T^{(grad)} = \frac{T_{M_b}^{(max)} - T_{M_a}^{(max)}}{H_{M_b} - H_{M_a}}$$

mit

M_a : Meteostandort in ungefähr gleicher Höhe wie der Standort des PS

M_b : Meteostandort in 1000 bis 1700 m Höhe

H : Höhe über Meer für entsprechende Standorte

Formel 2.2: Mass für die Stabilität der Luftschicht.

Optimale Formel, wenn zwischen M_a und M_b keine Inversion liegt. Die Stabilität der Luftschicht wurde aus den Tagesmaxima ($T^{(max)}$) geschätzt. Zur Zeit der Tageshöchsttemperatur ist die Wahrscheinlichkeit von Inversionen am geringsten.

Abkürzung	Geografische Grösse, Erläuterungen
N	Ammoniakkonzentration gemäss physikalischem Modell von Meteotest
N ^(sd)	Standardabweichung aller Ammoniakkonzentrationen im Umkreis von 300 m = indirektes Mass für die Nähe zu Ammoniakquellen: Da Ammoniak mit der Distanz des Rezeptors zur Quelle schnell abnimmt, werden höhere Standardabweichungen in der Nähe von Quellen erwartet.
N ^(min)	Minimale Ammoniakkonzentration im Umkreis von 300 m
N ^(max)	Maximale Ammoniakkonzentration im Umkreis von 300 m
H	Höhe über Meer
H ^(sd)	Standardabweichung aller Höhenwerte im Umkreis von 300 m = indirektes Mass für die Hügeligkeit der Umgebung. In flachen Gebieten (Talboden, Mittelland, Hochebenen, Seen) ist die Standardabweichung klein, in den Bergflanken hoch.
H ^(min)	Minimaler Höhenwert im Umkreis von 300 m
H ^(max)	Maximaler Höhenwert im Umkreis von 300 m
str	Strahlungsregionen der Schweiz, welche Meteotest für das Bundesamt für Energiewirtschaft für die Solarenergiebranche entwickelt hat [3] (vgl. Abbildung 2.1)
bio	Biogeografische Regionen der Schweiz, welche mittels eines statistischen Gliederungsansatzes unter Berücksichtigung der faunistischen und floristischen Gegebenheiten der Schweiz eingeteilt wurden [4].
reg	Aufteilung der Schweiz anhand der Strahlungsregionen in die beiden Grossregionen a) Mittelland inkl. Jura und Region von Basel und b) Südschweiz inkl. Alpenraum und Wallis. Die beiden Regionen wurden durch Zusammenzug der Strahlungsregionen aufgrund einer Residuenanalyse bei der Modellbildung gebildet.

Tabelle 2.3: Wichtigste kartografische Grössen, welche als Basis für die Entwicklung des statistischen Modells für die Optimierung der Immissionskarten dienten (vgl. Kap. 3.2).

3 Statistische Modelle

Zum Vergleich der Ammoniak-Kartenwerte mit den witterungs- und trendbereinigten Messwerten mussten zwei statistische Modelle entwickelt werden.

Das statistische Modell für die Witterungsbereinigung beschreibt die logarithmierten Periodenmittel der Passivsammler als Funktion von Standort³, aktueller Witterung, Saison und aktuellem Jahr der Messung. Die Kenntnis der entsprechenden Koeffizienten erlaubte die Bestimmung der witterungs- und trendbereinigten Monatswerte für ein repräsentatives Jahr, welche zur Bestimmung des Jahresmittels verwendet wurden.

Das statistische Modell für die Optimierung der Immissionskarten beschreibt die Abweichungen der logarithmierten Ammoniak-Kartenwerte von den witterungsbereinigten logarithmierten Jahresmitteln für das Jahr 2010. Diese wurden als Funktion von Standorteigenschaften modelliert, welche für alle Punkte der Schweizerkarte verfügbar sind.

Für beide Modelle wurden die Daten zuerst mittels generalisierter additiver Modelle (Funktion `gam` im R-Package `mgcv` [5],[6]) auf nicht-lineare Zusammenhänge untersucht, bei Bedarf linearisiert und anschliessend mit einem robusten „modifizierten M-Schätzer“ (Funktion `lmrob` im R-Package `robustbase` [7]) geschätzt⁴. Anschliessend wurde jeweils eine umfangreiche Residuenanalyse durchgeführt.

3.1 Modell für die Witterungsbereinigung

Da die Einflüsse auf die Ammoniak-Immissionen multiplikativer Natur⁵ sind, wurden im Modell die logarithmierten Ammoniak-Konzentrationen $\log(N_{t_i,s})$ als Zielvariable eingesetzt (vgl. Formel 3.1). Die Höhe dieser Ammoniak-Konzentrationen sind dabei grundsätzlich von der Distanz zu den verschiedenen Quellen, deren momentaner Aktivität und den aktuell herrschenden Witterungsbedingungen abhängig. Die Distanzen zu den verschiedenen (unbekannten) Quellen und deren mittlerer Aktivität über das Jahr sind zwar nicht bekannt. Sie fliessen aber indirekt via den Standortfaktor $site_s$ ins statistische Modell ein. Die Aktivitäten der landwirtschaftlichen Quellen sind von der aktuellen Witterung und der Jahreszeit abhängig, wobei die Witterung ihrerseits von der Jahressaison beeinflusst wird: Z.B. düngen die Landwirte ihre Felder mit Vorteil zu Beginn der Vegetationsperiode und dann wieder nach dem ersten Schnitt der Wiese. Sie werden aber dazu angehalten, bei gefrorenem, zu trockenem oder durchnässtem Boden keine Gülle auszubringen. Die Faktorvariable „Monat des Jahres“ m_{t_i} beschreibt den langjährigen (= typischen) saisonalen Einfluss der Witterung⁶

³ Der Standort ging ins statistische Modell für die Witterungsbereinigung nur als Faktorstufe ein. Die Eigenschaften des Standortes wurden erst im statistischen Modell der Kartenoptimierung berücksichtigt.

⁴ Dieses robuste Verfahren erlaubt die korrekte Schätzung der Regressionskoeffizienten der Mehrheit der Messdaten, auch wenn eine Minderheit der Messdaten nicht zum Modell passt. Damit lassen sich umgekehrt sehr elegant die nicht zum Modell passenden Daten (= Ausreisser) eruieren. Bei der normalen „Least-Squares“-Regression würden die nicht dazu passenden Messdaten die Ergebnisse stark verfälschen und die Ausreisser können in mehrdimensionalen Datensätzen gar nicht erkannt werden.

⁵ D.h. der Einfluss der verschiedenen erklärenden Variablen auf die Konzentration lässt sich als Produkt darstellen. Durch das Logarithmieren werden die Produkte in Summanden umgewandelt, welche statistisch einfacher zu schätzen sind.

⁶ d.h. mittlerer Einfluss der Temperatur, Windgeschwindigkeit, Trockenheit etc. in einem bestimmten Monat des Jahres

und der Quellaktivitäten⁷ auf die Ammoniak-Konzentrationen. Alle mit einem δ gekennzeichneten Grössen beschreiben die Abweichung der entsprechenden Meteogrösse vom langjährigen saisonalen Verlauf, d.h. im (theoretischen) Durchschnittsjahr sind diese Grössen 0.

$$\log(N_{t_i,s}) = site_s + m_{t_i} + \beta_1 \cdot y_{t_i} + \beta_2 \cdot \delta T_{t_i,s} + \beta_3 \cdot \delta ws_{t_i,s} + \beta_4 \cdot \delta(T_{t_i,s} - Td_{t_i,s}) + \beta_5 \cdot \delta dry_{t_i,s} + \beta_6 \cdot \delta T_{t_i,s}^{(grad)} + \epsilon_{t_i,s}$$

mit

$N_{t_i,s}$ = NH₃-Konzentration am Standort s in $\left[\frac{\mu g}{m^3}\right]$, zum Zeitpunkt t_i

$site_s$ = Standortfaktor mit 112 Stufen für die 112 verschiedenen Standorte

m_{t_i} = Monatsfaktor mit 12 Stufen für die 12 Monate des Jahres

β_j = Koeffizienten für die folgenden erklärenden Variablen

y_{t_i} = Zeitpunkt der Messung in Jahren

$\delta T_{t_i,s}$ = Abweichung der Temperatur vom langjährigen Mittel in $[^{\circ}C]$

$\delta ws_{t_i,s}$ = Abweichung der skalaren Windgeschwindigkeit vom langjährigen Mittel in $[m/s]$

$\delta(T_{t_i,s} - Td_{t_i,s})$ = Abweichung der Differenz (Temperatur - Taupunkt) vom langjährigen Mittel in $[^{\circ}C]$

$\delta dry_{t_i,s}$ = Abweichung der Trockenheit vom langjährigen Mittel $\in [-1, 1]$

$\delta T_{t_i,s}^{(grad)}$ = Abweichung des Temperaturgradienten vom langjährigen Mittel in $[^{\circ}C/m]$

$\epsilon_{t_i,s}$ = Fehlerterm

Formel 3.1: Statistisches Modell für die Witterungsbereinigung.

Beschreibt die Abhängigkeit der Ammoniak-Immissionen von Jahreszeit, Trend und aktueller Witterung

In Abbildung 3.1 sind die Einflüsse der Abweichungen der einzelnen Meteogrössen vom langjährigen Mittel der entsprechenden Perioden in einem sogenannten Termplot mit identischen y-Skalen abgebildet, so dass die Grösse der Effekte der einzelnen Meteogrössen direkt in der Grafik miteinander verglichen werden kann. Die Wahl des Standortes (1. Grafik von links oben) und damit die Distanz zu spezifischen Quellen hat den grössten Einfluss, wie auch zu erwarten war. Die drei Effekte „Monat des Jahres“ (2. Grafik von links oben), „Abweichung der aktuellen Temperatur vom langjährigen Mittel (4. Grafik von links oben) sowie die „Abweichung der aktuellen Windgeschwindigkeit vom langjährigen Mittel (1. Grafik von links unten) haben nur wenig kleinere Effekte auf die Ammoniak-Konzentration als die Standortwahl. Um mindestens einen Faktor 2 kleinere Effekte haben die Meteogrössen $T - Td$ (Mass für Wasser-Aufnahmekapazität der Luft), dry (Mass für Trockenheit des Bodens) und $T^{(grad)}$ (Mass für die Stabilität der Luftschicht). Genaue Definitionen dieser Grössen finden sich in Tabelle 2.2. Die übrigen dort aufgeführten Grössen haben im Rahmen der Messgenau-

⁷ d.h. mittlerer Einfluss der Menge und Häufigkeit des Güllens, der Emission eines durchschnittlich gereinigten Bodens eines offenen Laufstalles etc. in einem bestimmten Monat des Jahres

igkeit (und Zeitauflösung) keinen Einfluss auf die Ammoniak-Konzentrationen. Der Trend (3. Grafik von links oben) ist mit knapp 1% pro Jahr leicht positiv. Ob der Effekt signifikant ist, wurde jedoch wegen des hohen Aufwands nicht abgeklärt⁸.

Man beachte, dass alle in der Abbildung 3.1 enthaltenen Meteogrößen das chemisch-physikalisch erwartete Vorzeichen aufweisen: Mit zunehmender Temperatur, abnehmender Windgeschwindigkeit, zunehmender Wasseraufnahmekapazität der Luft, zunehmender Trockenheit des Bodens und zunehmender Stabilität der Luftschicht nehmen die Ammoniak-Immissionen zu. Ferner sieht man im saisonalen Verlauf (2. Grafik von links oben) zusätzlich zum typischen Verlauf aufgrund der Meteorologie (hohe Immissionen im Sommer, tiefe im Winter aufgrund des allgemeinen Temperaturverlaufs) die verstärkten Düngeaktivitäten der Landwirte im Frühling und im Spätherbst: Im März markiert dies die Zeit, wenn die Wiesen ein erstes Mal vor der Vegetationsperiode gegüllt werden. Im November wird u.a. der Füllstand der Güllengruben durch ein letztes Ausbringen von Gülle optimiert, so dass die Speicherkapazität der Gruben für die kalte Jahreszeit ausreicht.

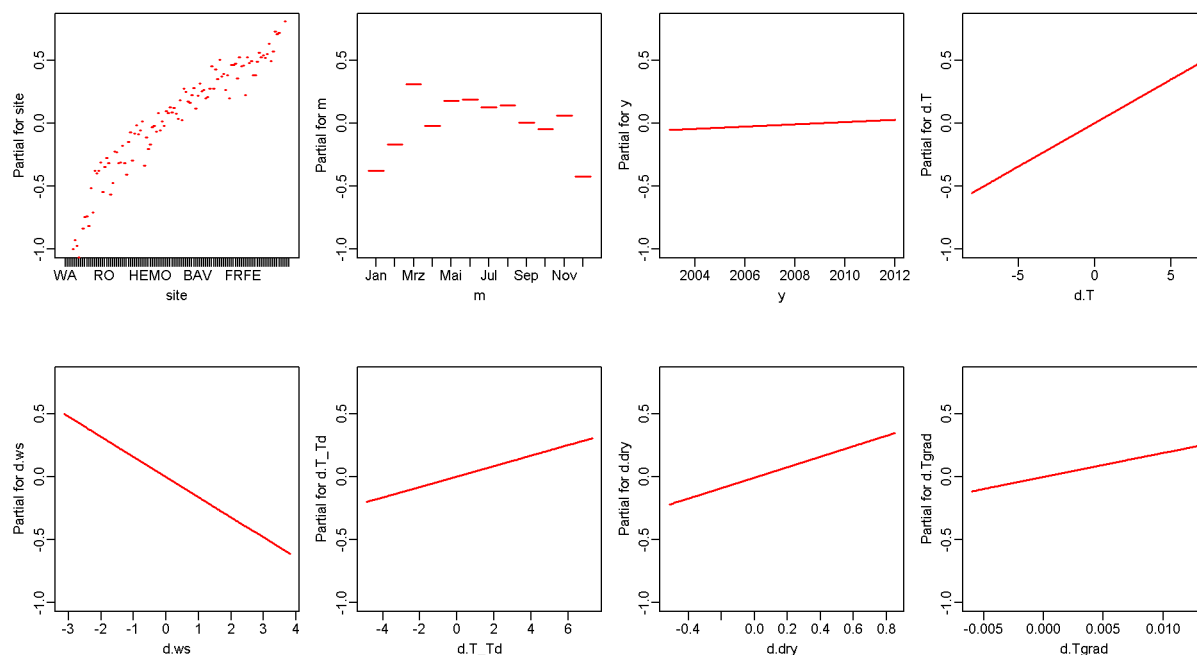


Abbildung 3.1: Termplots für das statistische Modell für die Witterungsbereinigung. Sie zeigen die Abhängigkeit der Ammoniak-Immissionen von den einzelnen erklärenden Variablen. „d.“ entspricht δ in Formel 3.1.

Das statistische Modell für die Witterungsbereinigung erklärt 80% der Variabilität der Ammoniak-Immissionen der *ganzen* Schweiz und auf *allen* Höhenstufen! 95 Prozent der Messungen lagen maximal einen Faktor 2 vom Erwartungswert⁹ entfernt. Diese relativ grossen Abweichungen vom Modell sind gut erklärbar, wenn man berücksichtigt, dass im Modell selbst keinerlei Information über die Zeitpunkte der Emissionsaktivitäten steckt. Somit kann das Modell für einen bestimmten Standort und eine bestimmte Witterung nur den Erwartungswert vorhersagen, dem eine „mittlere“ Emissionsaktivität in der Umgebung

⁸ Die Signifikanz könnte erst nach korrekter Berücksichtigung der räumlichen Korrelation der Daten vgl. [1] beurteilt werden.

⁹ d.h. von den gemäss Modell berechneten Immissionen

zugrunde liegt. Die tatsächliche Immission kann jedoch an einem bestimmten Standort zu einem gewissen Zeitpunkt durch grössere lokale Emissionen, insbesondere durch das Ausbringen von Gülle, stark abweichen.

Bei 97 der total 112 Passivsammler-Standorte waren die Residuen in allen Monaten symmetrisch um 0 mit ungefähr gleicher Streuung verteilt, da die Monatsfaktoren des robust gerechneten Modells das Verhalten der Mehrheit der Standorte, also der 97 Referenz-Standorte, wiedergibt. An 81 dieser Standorte wurden überhaupt keine, an den restlichen maximal drei Ausreisser gefunden, was mit einer Ausnahme jeweils weniger als 2% der beobachteten Zeit am entsprechenden Standort entsprach. Nur am Standort SZ02 mit der relativen kurzen Beobachtungslänge von zwei Jahren wurden während 7% der Beobachtungszeit Ausreisser identifiziert. Diese unauffälligen Standorte sind in der Abbildung 3.2 unter „Ref“ (= Referenz) zusammengefasst. Es handelt sich um landwirtschaftliche und strassenexponierte Standorte, Standorte aus dem Mittelland, dem Raum Basel und der Südschweiz.

Die neun Standorte des Typs „Berg“ befanden sich in den kalten Monaten von November bis März während Inversionsperioden häufig oberhalb der Inversionsschicht. Man beachte, dass die Höhe über Meer nur einen groben Indikator für diese Standorte darstellt. Viel ausschlaggebender ist die genaue Orografie. Sagnò z.B. liegt als Berg-Standort zwar auf nur 600 m ü. Meer aber 350 m über der Talsohle! Analog gibt es Standorte, welche wie die Stuhlegg (920 m ü. Meer, SG) und die Meisterrüte (930 m ü. Meer, AI) praktisch auf gleicher Höhe und nur 7 km voneinander entfernt liegen. Trotzdem gehört die höher liegende Meisterrüti zu den Referenz-Standorten, während die etwas tiefer liegende Stuhlegg aufgrund der Residuen und der Orografie eindeutig zu den Berg-Standorten gehört. An Standorten, welche in der Regel über der Inversionsgrenze liegen, sind die Jahresgänge offensichtlich viel ausgeprägter als im Mittelland (vgl. auch Abbildung 3.3). Dieser Effekt schlägt sich in den Residuen der Berg-Standorte nieder, welche in den Wintermonaten systematisch zu tief¹⁰ und im Sommer zu hoch¹¹ liegen (Abbildung 3.2). Der ausgeprägtere Jahresgang an den Berg-Standorten kann mit der unterschiedlichen Stabilität der unteren Luftschichten in der kalten Jahreszeit erklärt werden. Während im Mittelland die inversiven Wetterlagen während der kalten Jahreszeit die vertikale Verdünnung der Ammoniak-Emissionen behindern (→ erhöhte Immissionen), ist die vertikale Verdünnung oberhalb der Inversionsschicht ungestört, so dass die gemessenen Immissionen im Winter entsprechend tiefer ausfallen. Dieser Effekt wird zusätzlich durch tendenziell tiefere Emissionen während des Winters aufgrund von häufiger mit Schnee bedeckten Flächen (oder Flächen mit Temperaturen unter 0°C) und tieferem Viehbestand (Alpweiden sind nur im Sommer bestossen) verstärkt. Während der kalten Jahreszeit wechseln sich sehr stabile atmosphärische Schichtungen (tief liegende Inversionen) mit labilen (stürmische Westwinde) ab. Dadurch sind die Berg-Standorte bei stabilen Schichtungen nur den lokalen Emissionen ausgesetzt, während sie bei labilen Schichtungen zusätzlich auch von Emissionen aus tiefer liegenden Gebieten beeinflusst werden. Dies spiegelt sich in der höheren Variabilität der Residuen der Berg-Standorte während der kalten Monate wieder.

Sechs Standorte des Typs „Tal“ befanden sich nahe der Talsohle eines Gebirgtales oder einer Mulde, bei welcher aufgrund der speziellen Topografie mit spezifischen Winden zu rechnen ist. Diese Standorte verhielten sich gerade umgekehrt wie die Standorte vom Typ „Berg“: An diesen Standorten wurden im Winter höhere und im Sommer tiefere Konzentrationen gemessen (vgl. Abbildung 3.2 und 3.3). Dieses Verhalten ist vermutlich auf die Berg-Tal-

¹⁰ Das obere Quartil der Residuen liegt unterhalb von 0

¹¹ Das untere Quartil der Residuen liegt bei oder oberhalb von 0

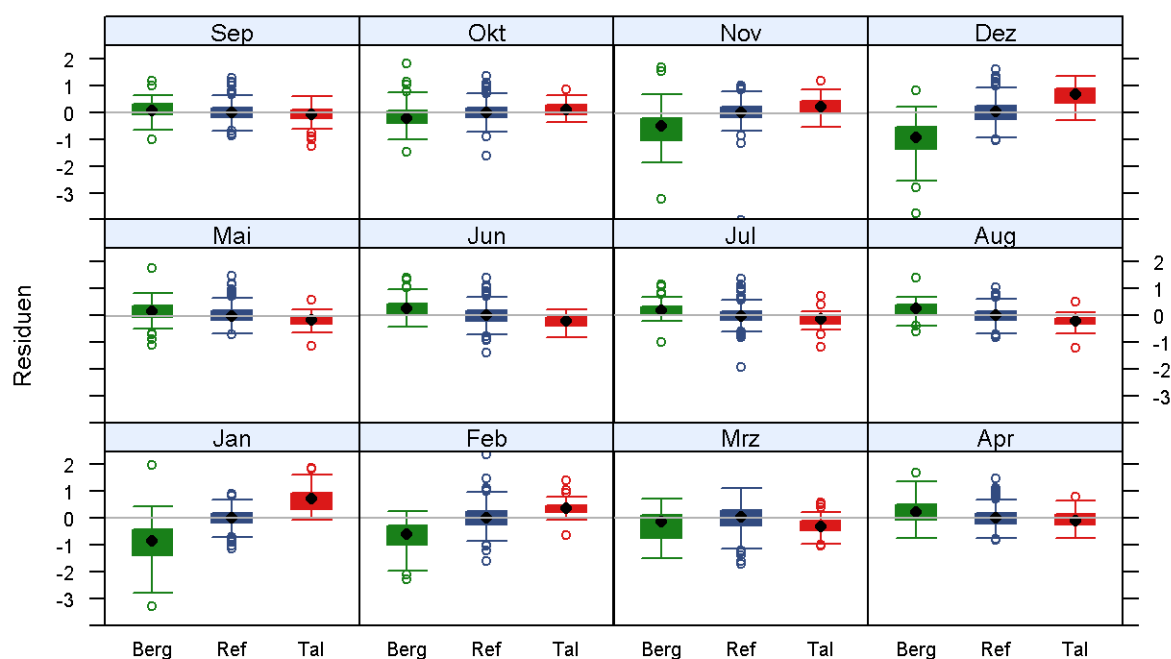


Abbildung 3.2: Residuen gruppiert nach Standorttyp und Monat des Jahres. Die neun mit „Berg“ bezeichneten Standorte lagen in der Mehrzahl der Perioden mit Inversionen oberhalb der Inversionsgrenze. Die sechs mit „Tal“ bezeichneten Standorte lagen alle nahe der Talsohle eines Gebirgstals oder dann in einer Mulde. Die übrigen 97 Standorte sind unter dem Label Ref (=Referenz) zusammengefasst. 6 extreme Ausreisser von insgesamt 9549 Residuen sind in den oben dargestellten Boxplots nicht enthalten, um die Skalierung der y-Achsen möglichst kompakt halten zu können.

Wind-Systeme zurückzuführen, welche in den Gebirgstälern viel ausgeprägter vorhanden sind als im Schweizer Mittelland und den Voralpen. Damit sind in den Gebirgstälern die Verdünnungseffekte aufgrund der Windgeschwindigkeit im Sommer viel prägnanter als im Mittelland und führen in der Folge sogar zur Umkehrung des Jahresverlaufs der Immissionen an den Tal-Standorten.

Der Term m_{t_i} in Formel 3.1 gibt den typischen (logarithmierten) Jahresgang der Referenz-Standorte wieder. In Abbildung 3.3 ist der über alle 97 Referenz-Standorte gemittelte Jahresgang der Ammoniak-Immissionen in $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ (blaue Kurve) den Immissionsverläufen von je einem typischen Vertreter der Berg- (grün) und Talstandorte (rot) gegenübergestellt.

Das statistische Modell zur Witterungsbereinigung ist ziemlich komplex und umfasst insgesamt 129 zu bestimmende Parameter. Da total 9549 Beobachtungen zur Schätzung dieser Parameter zur Verfügung standen (im Median 65 14-Tagesmittel pro Standort), muss trotzdem nicht mit einer Überanpassung des Modells gerechnet werden.

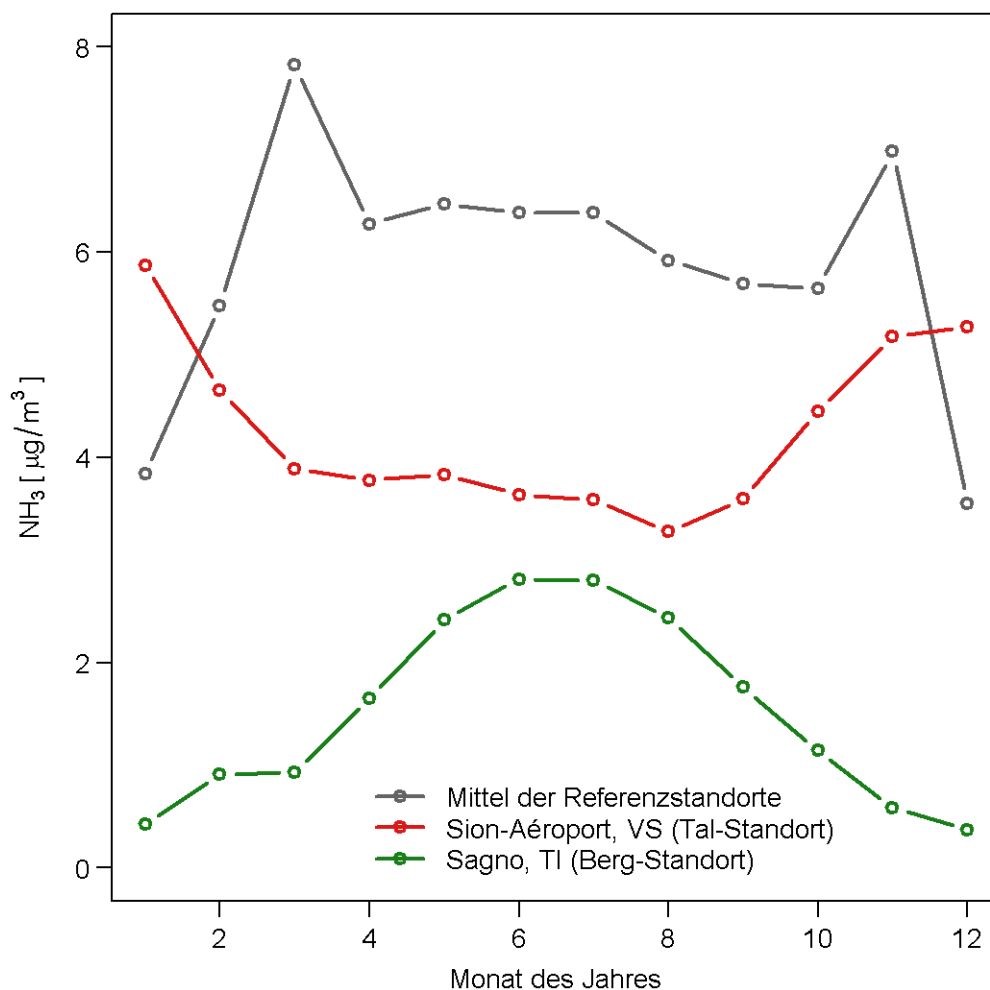


Abbildung 3.3: Typische Jahrgänge der Ammoniak-Immissionen. Der Jahrgang der Referenz-Standorte wurde über alle Messjahre und Referenz-Standorte monatsweise gemittelt. Als exemplarische Jahrgänge für die Tal- und Berg-Standorte wurden die über alle vorhandenen Messjahre gemittelten Jahrgänge von Sion-Aéroport und Sagno dargestellt.

3.2 Modell für die Optimierung der Immissionskarten

Mittels des statistischen Modells für die Witterungsbereinigung wurden unter Berücksichtigung der lognormal-verteilten Konzentrationen¹² die meteobereinigten Monatsmittel für das Jahr 2010 gewonnen und zum Jahresmittel aggregiert. Anschliessend wurden die Abweichungen der logarithmierten Kartenwerte der Ammoniak-Immissionen von den meteobereinigten logarithmierten Jahresmitteln, $\delta \ln N_s$, untersucht. Es zeigte sich, dass $\delta \ln N_s$ bei Konzentrationen unter $3.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. bei Höhen über 740 m von den Konzentrationen bzw. der

¹² Da die logarithmierten Immissionen modelliert werden, müssen die Erwartungswerte bei der Rücktransformation in den Raum der Konzentrationen mit $e^{(\sigma^2)/2}$ multipliziert werden, wobei σ^2 die Varianz der logarithmierten Immissionen ist (Seite 137 in [8]).

Höhe über Meer abhängt (Formel 3.2). Ferner unterschätzte die Karte die gemessenen Werte in der Südschweiz und dem Alpenraum im Vergleich zum Mittelland, Jura und der Region Basel, wenn die andern Einflussgrößen herausgerechnet wurden. Analog wurden in hügeligem Gelände die Konzentrationen eher überschätzt und in flachem Gelände unterschätzt (Abbildung 3.4).

$$\delta lN_s = \text{reg}_s^{(map)} + \beta_1 \cdot lN_s^{(map)} + \beta_2 \cdot lH_s^{(map)} + \beta_3 \cdot lH_s^{(map, sd)} + \epsilon_s$$

mit

$$\delta lN_s = \left(\log(\text{NH}_3\text{-Konz. auf Karte 2010}) - \log(\text{witterungsbereinigte gemessene NH}_3\text{-Konz. 2010}) \right) \text{ am Standort } s$$

$$\text{reg}_s^{(map)} = \text{Standort } s \text{ ist } \begin{cases} \text{Mittelland und nördlich davon bzw.} \\ \text{Voralpen, Alpen und südlich davon} \end{cases}$$

$$lN_s^{(map)} = \begin{cases} \log(\text{NH}_3\text{-Konz. auf Karte am Standort } s) \text{ bei Konz. } < (e^{1.3} = 3.67) \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] \\ \text{und über grösseren Gewässern} \\ 1.3 \text{ bei höheren Konzentrationen} \end{cases}$$

$$lH_s^{(map)} = \begin{cases} \log(\text{Höhe auf Karte am Standort } s) \text{ bei Höhen } > (e^{6.6} = 735) [m] \\ 6.6 \text{ für tiefer liegende Gebiete} \end{cases}$$

$$lH_s^{(map, sd)} = \log(\text{Standardabw. der Höhe im Umkreis von } 300 \text{ m um Standort } s)$$

= Mass für die Hügeligkeit

ϵ_s = Fehlerterm für Standort s

Formel 3.2: Statistisches Modell für die Optimierung der Immissionskarten.

Beschreibt die Abweichungen der NH_3 -Kartenwerte von den gemessenen als Funktion von geographischen Variablen. Bei grösseren Seen ist diese Formel nicht anwendbar.

Obwohl Messungen von insgesamt 112 Passivsammler-Standorten zur Überprüfung der berechneten Karten zur Verfügung standen, müssen die Resultate als vorläufig betrachtet werden. Wie man den Partial-Residuals-Plots entnehmen kann (Abbildung 3.4), sind insbesondere im Bereich der tiefen Konzentrationen und in höheren Lagen (Alpweiden, Moore) nur wenige Messungen vorhanden. Damit besteht das Risiko, dass die Effekte aufgrund der Höhe über Meer und der Durchschnittsbelastung des Standortes durch eine zu wenig repräsentative Auswahl der Standorte beeinflusst wurde. Analoge Einschränkungen der Aussagekraft müssen für den Regionalfaktor gemacht werden, da insbesondere in der West- und Südschweiz sowie den Alpen viel zu wenige Standorte beprobt werden (vgl. Abbildung 2.1).

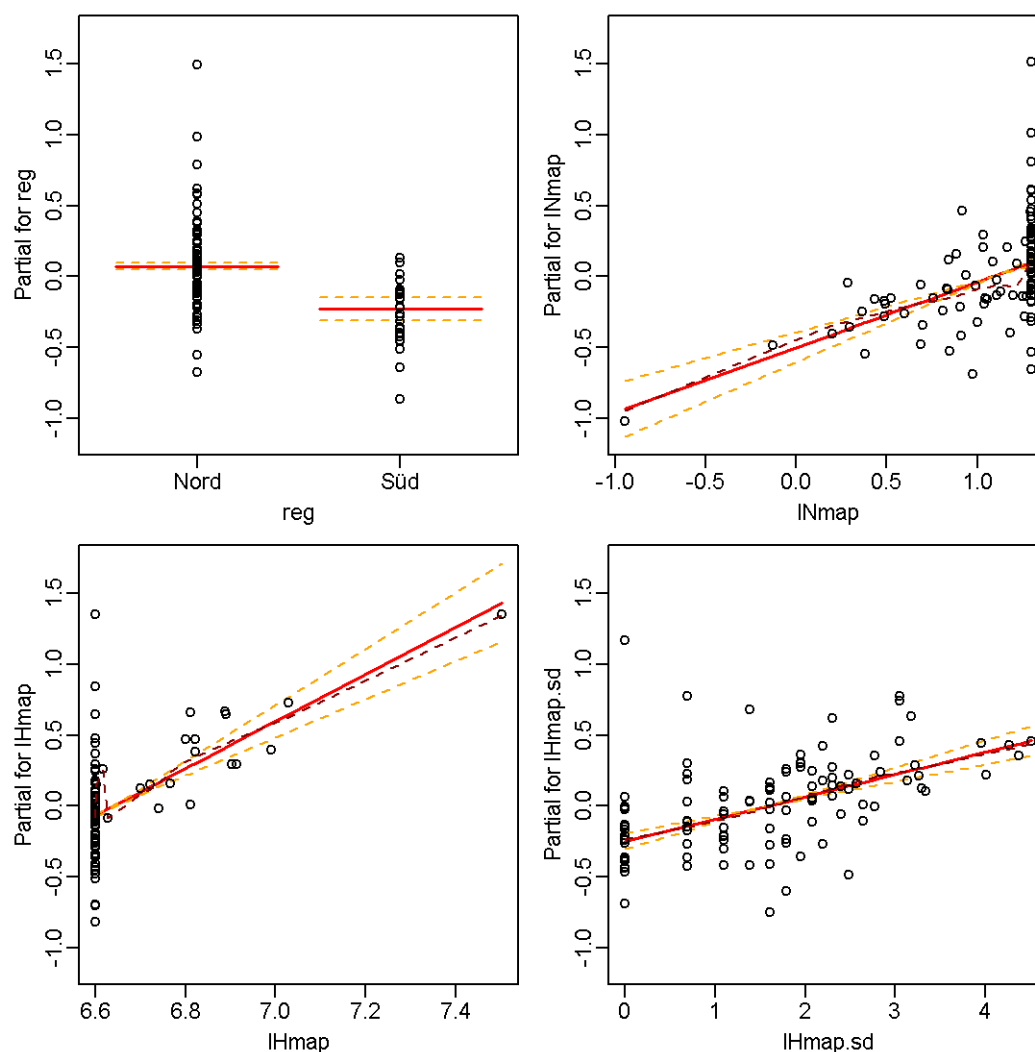
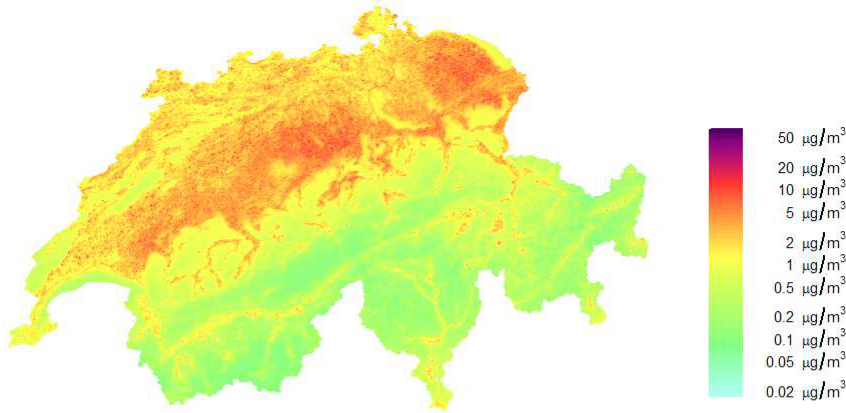


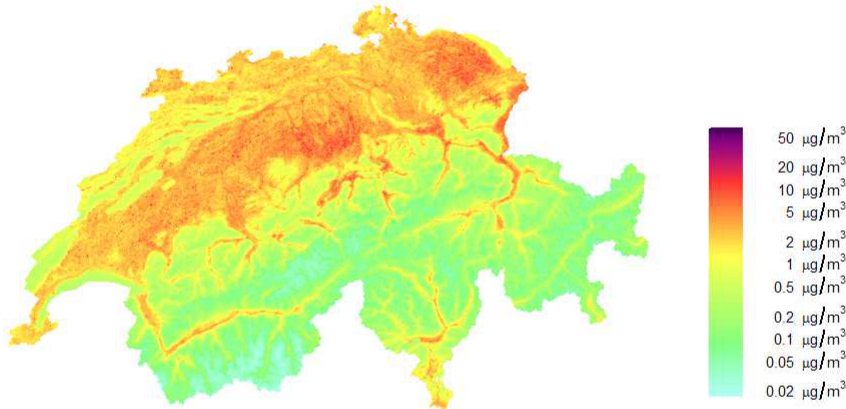
Abbildung 3.4: Termplots und partielle Residuen des statistischen Modells für die Optimierung der Immissionskarten. Die Termplots zeigen die Abhängigkeit der Ammoniak-Immissionen von den einzelnen erklärenden geografischen Variablen (vgl. Formel 3.2).

Wenn man von den oben diskutierten Einschränkungen absieht, so können die Resultate auf zwei Arten zur Verbesserung der Ammoniak-Immissionskarten verwendet werden. a) Das statistische Modell wird direkt auf die berechneten Kartendaten angewandt und damit die Berechnungen durch eine statistische Entzerrung verbessert (vgl. Abbildung 3.5). Oder b), die Hinweise des statistischen Modells werden dazu verwendet, die der Berechnung der Karte zugrunde liegenden Parameter entsprechend zu justieren. Bei genauer Betrachtung der Unterschiede zwischen der statistisch korrigierten Karte und der Originalkarte von Meteotest zeigen sich vor allem Auffälligkeiten in grossen Höhen (tiefere Werte in korrigierter Karte) und in den breiteren, tief liegenden Tälern (höhere Werte in korrigierter Karte). Der höchste Standort, an welchem Ammoniak gemessen wurde, war mit Wengener Alp mit 1880 m ü. Meer, der zweit höchste mit nur noch 1137 m der Chaumont. Aussagen über Gebiete oberhalb von 1200 m sind somit aufgrund der mageren Datenlage mit grosser Vorsicht zu betrachten.

NH3-Karte 2010 von Meteotest



NH3-Karte 2010 von Meteotest
mit statistischer Korrektur



Korrigierte Karte - Originalkarte von Meteotest

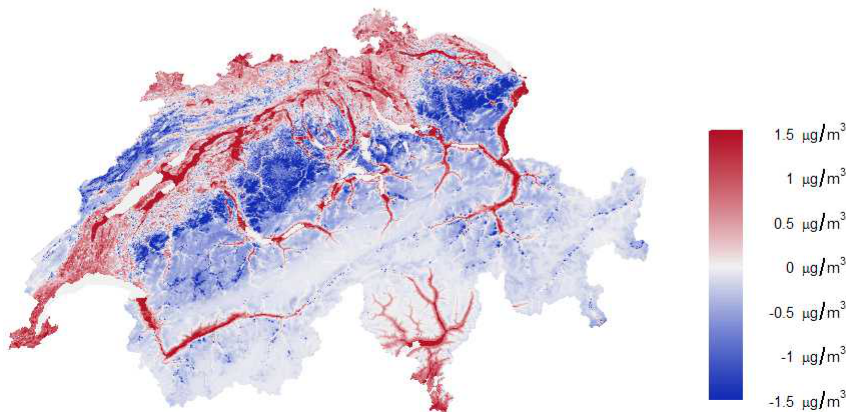


Abbildung 3.5: Ammoniak-Immissionskarten. Die statistische Korrektur führte insgesamt zu höheren Konzentrationen in den tiefer liegenden Tälern und zu geringeren Konzentrationen in höher gelegenen Gebieten. Die Aussagen über 1200 m und unter $1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sind statistisch noch nicht abgesichert, da in diesem Bereich noch an zu wenigen Standorten gemessen wurde.

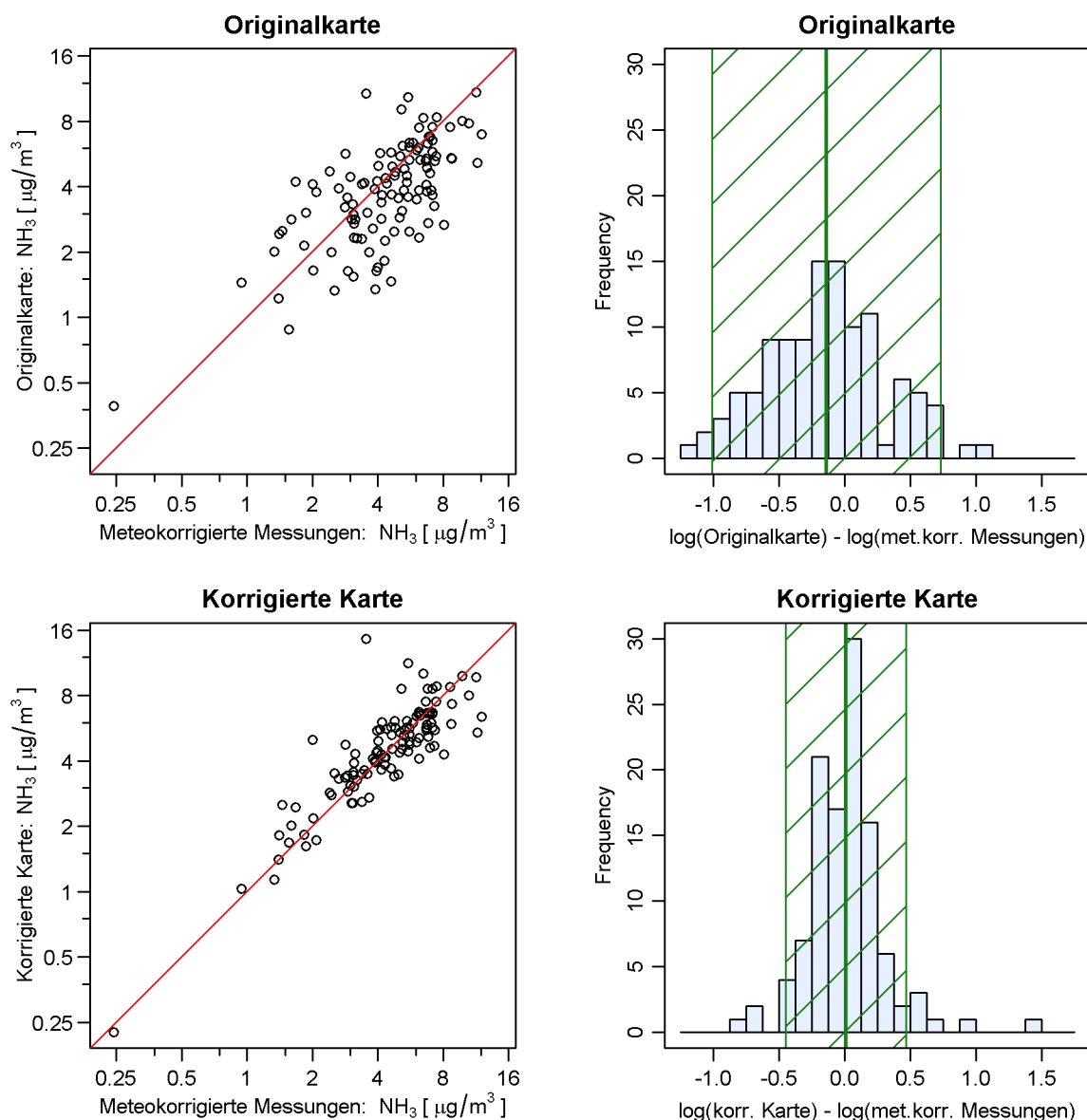


Abbildung 3.6: Kartenwerte vs. meteokorrigierte Messungen 2010. Nach der statistischen Korrektur der Kartenwerte stimmen diese besser mit den meteokorrigierten Messungen überein. Die mittlere grüne Linie in den rechten Grafiken entspricht jeweils dem Median der Residuen. Die grün schraffierten Flächen decken jeweils den Bereich Median ± 2 MAD ab.

Abbildung 3.6 gibt einen generellen Überblick über die Abweichungen der Kartenwerte 2010 von den meteobereinigten Messwerten für 2010. Man beachte den logarithmischen Maßstab der Grafiken. Nach der statistischen Korrektur der Kartenwerte stimmen diese besser mit den meteokorrigierten Messungen überein. Die mittlere grüne Linie in den rechten Grafiken entspricht jeweils dem Median der Abweichungen auf der logarithmischen Skala. Die grün schraffierten Flächen decken den Bereich Median ± 2 MAD ab¹³. Umgerechnet auf die Konzentrationskala bedeutet dies, dass die Hälfte der Originalkartenwerte (an den 112 Stand-

¹³ MAD = robustes Maß für die Standardabweichung

orten der Messungen) 13 oder mehr Prozent tiefer liegen als die meteo- und trendbereinigten Messwerte. Trotzdem unterschätzt die Originalkarte auf der Mehrheit der Fläche der Schweiz die Immissionen, da die meisten Messungen im höher belasteten Bereich der Schweiz vorgenommen wurden (vgl. unterste Karte in Abbildung 3.5). Dieser scheinbare Widerspruch ist auf die (in Bezug auf die Immissionswerte, Höhen über Meer und Regionen der Schweiz) nicht repräsentative Auswahl der Messpunkte zurückzuführen. Die grosse Mehrheit der Messungen wurden ursprünglich nicht für die Überprüfung der Immissionskarte geplant, was die nicht repräsentative Verteilung der Messorte erklärt.

Bei der statistisch korrigierten Karte liegen die Abweichungen zwischen Karten- und gemessenen Werten praktisch symmetrisch um 0. Zusätzlich fällt die Streuung der Abweichungen (im logarithmierten Modell) im Vergleich zur Originalkarte bei der korrigierten Karte um den Faktor 2 kleiner aus. Dies bedeutet, dass (mit obigen Einschränkungen in Bezug auf die Repräsentativität) die Werte der Originalkarte mit einer statistischen Sicherheit von 95% innerhalb von 35% und 210% der entsprechenden meteobereinigten Messwerte liegen und die Werte der korrigierten Karten innerhalb von 64% und 160% entsprechenden meteobereinigten Messwerte.

4 Fazit

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass das statistische Modell für die Witterungsbereinigung (Formel 3.1) die Ammoniak-Immissionen der 97 (landwirtschaftlich und städtisch geprägten) Standorte gut abbildet, welche in der Regel unterhalb der Inversionsgrenze liegen und nicht von starken Berg-Talwind-Systemen betroffen sind. Die tiefsten Werte wurden in den Wintermonaten Dezember bis Februar beobachtet. Die Immissionsspitzen im März und November, welche mit den Gülleaktivitäten der Landwirte erklärt wurden, waren nur an den landwirtschaftlich beeinflussten Standorten ausgeprägt (Abbildung 3.3).

Bei den neun Berg-Standorten über der allgemeinen Inversionsgrenze wurden generell tiefere Werte aber mit einem ausgeprägteren Jahresgang als im Mittelland gemessen. An beiden Standorttypen wurden in den warmen Monaten höhere Konzentrationen gemessen als im Winter. Der ausgeprägtere Jahresgang an den Berg-Standorten wurde mit unterschiedlichen Stabilität der unteren Luftschichten in der kalten Jahreszeit erklärt. Während im Mittelland die inversiven Wetterlagen während der kalten Jahreszeit die vertikale Verdünnung der Ammoniak-Emissionen behinderten, war die vertikale Verdünnung oberhalb der Inversionsschicht ungestört, so dass die gemessenen Immissionen im Winter entsprechend tiefer ausfielen. Dieser Effekt wurde zusätzlich durch tendenziell tiefere Emissionen während des Winters aufgrund von häufiger mit Schnee bedeckten Flächen (oder Flächen mit Temperaturen unter 0°C) und tieferem Viehbestand (Alpweiden sind nur im Sommer bestossen) verstärkt.

Umgekehrt verhielt sich der Jahresgang an den sechs Tal-Standorten im Einflussbereich ausgeprägter Berg-Talwind-Systeme (Abbildung 3.3). Dort wurden die höchsten Werte im Winter und die tiefsten im Sommer beobachtet. Diese Berg-Talwind-Systeme weisen im Sommer sehr viel höhere Windgeschwindigkeiten als im Winter auf, so dass die (Ammoniak-)Emissionen besonders im Sommer sehr effizient verdünnt werden.

Bei den meteobereinigten Jahresmitteln, welche beim Vergleich der Kartenwerte mit den Messungen interessierten, mitteln sich die Anomalien der neun Höhen- bzw. sechs Tal-Standorte, über das Jahr gesehen, approximativ aus. Deshalb konnte das robust berechnete statistische Modell für die Witterungsbereinigung trotzdem für alle 112 Standorte zur Meteo- und Trendbereinigung verwendet werden.

Im statistischen Modell für die Optimierung der Immissionskarten wurden anschliessend die Differenzen (Kartenwerte – bereinigte Jahresmittelwerte) als Funktion der Höhe ü. Meer, der Variabilität der Höhen ü. Meer im Umkreis von 300 m um diesen Standort (= Mass für die Hügeligkeit) und als Funktion der Region (nördlich bzw. südlich der Alpen) beschrieben. Die Analysen zeigten, dass an der Hälfte der 112 PS-Standorte die entsprechenden Kartenwerte bei 87% der meteobereinigten Jahresmittel 2010 oder tiefer lagen. Die Unterschätzung der Messwerte war systematischer Natur und stärker:

- südlich der Alpen (im Vergleich zu den Gebieten nördlich der Alpen)
- in Tälern (im Vergleich zu höher gelegenen Lagen)

Mittels des statischen Modells für die Optimierung der Immissionskarten konnten die Kartenwerte so korrigiert werden, dass der Bias verschwand und die Differenzen zwischen Karten- und entsprechenden meteobereinigten Messwerten für 2010 im Durchschnitt um den Faktor 2 reduziert werden konnten. Zusätzlich kann die Diskussion der Residuenanalysen des *statistischen* Modells auch dazu verwendet werden, das *physikalische* Modell von Meteotest weiter zu verfeinern.

Die Analyse der Standorte zeigte ferner auf, dass im Hinblick auf eine weitere Verbesserung einer flächendeckenden Aussage über die Ammoniakkonzentrationen, die Verteilung der Messorte in Bezug auf verschiedene Kriterien optimiert werden sollte: Während im östlichen Mittelland und im Kanton Luzern generell genügend Standorte vorhanden sind, gibt es viel zu wenige im westlichen Mittelland, im Jura, im Wallis, in den Alpen und in der Süd- und Südostschweiz. Ebenso müssten mehr Messungen in wenig belasteten Gebieten zwischen 0.3 und 1.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und an Standorten über 1200 m vorgenommen werden. Letzteres ist auch deshalb von besonderem Interesse, da sich hoch empfindliche Flächen eher in wenig belasteten Gebieten und in höheren Lagen befinden.

Insgesamt zeugte diese Analyse von einer erfreulich guten Übereinstimmung der Ammoniak-Immissionskarten mit entsprechenden Messungen, wenn man die komplexen Berechnungen berücksichtigt, welche den Immissionskarten zugrunde liegen. Die Werte der Originalkarte liegen (mit obigen Einschränkungen in Bezug auf die Repräsentativität) mit einer statistischen Sicherheit von 95% innerhalb von 35% und 210% der entsprechenden meteobereinigten Messwerte, während die Werte der korrigierten Karten sich innerhalb von 64% und 160% der entsprechenden meteobereinigten Messwerte befinden.

5 Danksagung

Wir bedanken uns herzlich beim Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz), der Forschungsstelle für Umweltbeobachtung (FUB), Meteotest und dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) für die gute und engagierte Zusammenarbeit.

MeteoSchweiz stellte die in dieser Arbeit verwendeten Meteodaten zur Verfügung. Die FUB lieferte alle Passivsammlerdaten sowie weitere Metainformationen zu den Messungen. Meteotest lieferte die Schweizer Ammoniak-Immissionskarten und weitere mit dem GIS aufbereitete Standortinformationen zu jedem einzelnen Kartenpunkt. Das BAFU finanzierte das Projekt und begleitete die Arbeit.

6 Literatur

- [1] René Locher, Michel Philipp; Trendanalyse der Ammoniak-Immissionen in der Schweiz - Eine Analyse der PS-Messungen 2000 – 2009; IDP Environmetrics, Nr. 1 (2010); Institut für Datenanalyse und Prozessdesign, Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften; Winterthur, 2010
- [2] René Locher; Ammoniakimmissionsmessungen: Vergleich von Zürcher- und Radiello-Passivsammlern; IDP Environmetrics, Nr. 4 (2013); Institut für Datenanalyse und Prozessdesign, Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften; Winterthur, 2013
- [3] Meteorologische Grundlagen für die Sonnenenergienutzung; Meteonorm, Handbuch für Solarplaner Ausgabe 1995; Bundesamt für Energiewirtschaft
- [4] Y. Gonseth, T. Wohlgemuth, B. Sansonnens, A. Buttler; Die biogeographischen Regionen der Schweiz: Erläuterungen und Einteilungsstandard; Umweltmaterialien Nr. 137; Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft; Bern 2001, <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00207/index.html?lang=de>
- [5] R Core Team (2014); R: A language and environment for statistical computing; R Foundation for Statistical Computing; Vienna, Austria, 2014. URL <http://www.R-project.org/>.
- [6] Simon N. Wood; gam: generalized additive models with integrated smoothness estimation; R-package mgcv V1.7-29; 2014
- [7] Matias Salibian-Barrera, Manuel Koller; lmer: fast MM-type estimators for linear (regression) models; R-Package robustbase V0.91-1; 2014
- [8] Werner A. Stahel; Statistische Datenanalyse – Eine Einführung für Naturwissenschaftler; Vieweg; Zürich; 1995

7 Anhang

7.1 Standorte der ausgewerteten Passivsammler

Auf den folgenden Seiten sind alle Standorte der ausgewerteten Passivsammler in alphabetischer Reihenfolge ihrer Abkürzungen aufgeführt mit Angabe

- ihrer Schweizer Landeskoordinaten (E, N)
- ihrer Höhe über Meer (H)
- der Standardabweichung der Höhe des Geländes um den Passivsammler im Umkreis von 300 m ($H^{(\text{map},\text{sd})}$)
- der Region (vgl. Variable reg in Tabelle 2.3)
- des Standortes der zugeordneten Meteomessungen ($E^{(\text{meteo})}$, $N^{(\text{meteo})}$, $H^{(\text{meteo})}$)
- des meteokorrigierten, gemessenen NH_3 -Jahresmittels für 2010 ($\text{NH}_3^{(\text{meteocor})}$, vgl. Kap. 3.1)
- des aus der Karte 2010 von Meteotoest herausgelesenen NH_3 -Jahresmittels ($\text{NH}_3^{(\text{map})}$)
- des mit geografischen Informationen korrigierten Karten-Jahresmittels ($\text{NH}_3^{(\text{mapkor})}$, vgl. Kap. 3.2)

Abkürzung	Standort	E	N	H	H ^(map,sd)	Region	Typ	E ^(meteo)	N ^(meteo)	H ^(meteo)	NH ₃ ^(meteo,cor)	NH ₃ ^(map)	NH ₃ ^(map,cor)	Beob.-dauer
		[m]	[m]	[m]	[m]			[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[μg/m ³]	
AEAE	Aetigkofen Aenerfeld	601'879	218'936	625	28	Nord	Ref	601'930	204'410	553	3.04	2.82	2.56	0.9
AIG	Gontenbad	745'314	243'700	896	6	Süd	Ref	747'861	254'586	776	4.02	4.97	4.93	1.9
AIHA	Haslen	745'830	248'340	768	23	Nord	Ref	747'861	254'586	776	5.21	6.17	4.88	1.9
AIHI	Hirschberg	750'310	244'398	890	26	Süd	Ref	747'861	254'586	776	5.58	6.37	5.31	1.9
AIM	Meistersrüte	750'336	245'711	930	9	Süd	Ref	747'861	254'586	776	6.21	7.47	6.72	1.9
AIO	St. Anton	758'570	253'406	1071	16	Nord	Berg	747'861	254'586	776	2.09	3.77	1.72	1.9
APS	Ap.-Steinegg	750'830	243'700	820	5	Süd	Ref	747'861	254'586	776	8.63	7.53	8.77	7.8
BA	Bachtel	710'350	239'600	930	24	Nord	Berg	716'515	247'755	1132	1.67	4.22	2.44	7.9
BAS	Basel-Binningen	610'890	265'605	317	12	Nord	Ref	610'890	265'605	317	2.01	1.64	2.18	7.9
BIR1	Birrfeld 1	658'980	254'775	393	2	Nord	Ref	648'389	248'365	387	3.37	2.3	3.47	1.8
BIR3	Birrfeld 3	660'245	254'946	397	1	Nord	Ref	648'389	248'365	387	3.11	2.33	3.9	1.8
CHA	Chaumont	565'090	211'040	1137	10	Nord	Berg	565'090	211'040	1137	0.94	1.45	1.03	8
EGWA	Egerkingen Waro	627'482	240'932	434	1	Nord	Ref	628'875	240'185	431	5.16	3.1	4.55	0.9
EKA	Ebnat-Kappel	727'350	236'350	630	8	Nord	Ref	726'349	237'167	623	3.11	2.69	3.04	1.1
ESC07	Eschenbach 7	665'253	221'074	498	6	Nord	Ref	665'540	209'848	454	7.15	6.54	6.7	8
ESC08	Eschenbach 8	665'208	221'946	495	3	Nord	Ref	665'540	209'848	454	7.16	5.79	6.62	8
ESC14	Eschenbach 14	663'387	220'976	541	6	Nord	Ref	665'540	209'848	454	10.5	7.82	8.01	5.9
ESC15	Eschenbach 15	664'039	220'788	520	3	Nord	Ref	665'540	209'848	454	7.16	7.53	8.6	5.9
ESC19	Eschenbach 19	664'795	221'169	495	2	Nord	Ref	665'540	209'848	454	6.5	8.28	10.09	4.6
ESCH01	Eschlikon 1	715'299	257'014	583	5	Nord	Ref	710'500	259'810	539	7.5	8.37	8.82	3.3
FRAU	Kloster Frauental	674'546	229'562	395	1	Nord	Ref	677'825	226'880	440	3.54	10.76	14.62	4.9
FRFE	Frauenfeld	707'594	269'988	384	0	Nord	Ref	710'500	259'810	539	6.71	4.08	5.54	2.3

Tabelle 7.1: Standorte der Passivsammler 1

Abkürzung	Standort	E	N	H	H ^(map, sd)	Region	Typ	E ^(meteo)	N ^(meteo)	H ^(meteo)	NH ₃ ^(meteo cor)	NH ₃ ^(map)	NH ₃ ^(map cor)	Beob.-dauer
		[m]	[m]	[m]	[m]			[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[μg/m ³]	
FRUEE	Früebüel	683'423	218'884	980	7	Nord	Ref	677'845	213'462	1031	1.41	2.42	1.81	4.9
GUWI	Gunzgen Winkel	629'072	241'113	429	1	Nord	Ref	628'875	240'185	431	3.15	2.82	4.33	0.9
HAE	Härkingen	628'875	240'185	431	2	Nord	Ref	628'875	240'185	431	4.82	4.68	5.7	6.7
HAEG	Hägenschwil	743'660	261'770	555	8	Nord	Ref	738'420	273'960	440	6.9	6.8	6.66	7.8
HAGN	Hägendorf Gnöd	629'822	243'741	590	21	Nord	Ref	633'246	253'846	611	1.46	2.5	2.51	0.9
HBL	Lotzwil	625'558	226'796	509	3	Nord	Ref	626'400	233'850	422	4.16	2.84	3.65	3.7
HEHI	Hessigkofen Hinterf.	600'992	220'114	601	10	Nord	Ref	601'930	204'410	553	4.35	4.39	4.15	0.9
HEMO	Hessigkofen Moosg.	601'471	220'742	605	5	Nord	Ref	601'930	204'410	553	3.59	3.02	3.48	0.9
HOL01	Holderhus 1	657'129	216'962	590	10	Nord	Ref	665'540	209'848	454	5.82	6.36	6.01	7.9
HOL03	Holderhus 3	657'229	216'724	605	11	Nord	Ref	665'540	209'848	454	5.6	6.07	5.65	4.6
HOL04	Holderhus 4	657'256	216'902	590	12	Nord	Ref	665'540	209'848	454	12.04	6.98	6.41	2.6
HUD3	Hudelmoos 3	739'080	265'550	520	2	Nord	Ref	738'420	273'960	440	2	4.11	5.01	7.9
IEB	Bärau	628'595	197'847	725	21	Nord	Ref	628'005	198'792	745	2.85	5.66	4.76	3.7
INWI	Inwil	682'567	226'900	437	2	Nord	Ref	677'825	226'880	440	4.15	3.39	4.28	4.9
LAE	Lägeren	669'800	259'000	689	71	Nord	Ref	669'800	259'000	689	1.4	1.22	1.41	0.9
LANG	Langrickenbach TG	736'325	272'535	515	2	Nord	Ref	738'420	273'960	440	6.27	5.31	6.47	3.4
LUG	Lugano	717'615	96'645	281	2	Süd	Ref	717'874	95'884	273	2.53	1.33	3.5	7.9
MACH	Matzendorf Chuehöl.	613'721	239'016	521	5	Nord	Ref	628'875	240'185	431	3.1	2.97	3.45	0.9
MAEM	Matzendorf Emet	614'279	240'205	594	17	Nord	Ref	628'875	240'185	431	3.46	4.15	3.61	0.9
MAG	Magadino-Cadenazzo	715'500	113'200	204	1	Süd	Tal	715'475	113'162	203	4.01	1.69	4.44	7.9
MAST	Matzendorf Strickler	613'268	240'102	602	21	Nord	Ref	626'400	233'850	422	2.64	3.94	3.31	0.9
MAU01	Mauren 1	729'160	269'400	439	1	Nord	Ref	738'420	273'960	440	5.45	4.18	5.68	7.9
MI01	Misery	571'915	189'478	607	6	Nord	Ref	562'127	184'612	490	3.88	3.9	3.99	4.4

Tabelle 7.2: Standorte der Passivsampler 2

Abkürzung	Standort	E	N	H	H ^(map,sd)	Region	Typ	E ^(meteo)	N ^(meteo)	H ^(meteo)	NH ₃ ^(meteocon)	NH ₃ ^(map)	NH ₃ ^(mapcon)	Beob.-dauer
		[m]	[m]	[m]	[m]			[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[μg/m ³]	
MU01	Muri 1	669'340	236'300	470	10	Nord	Ref	677'825	226'880	440	2.9	3.56	3.41	7.8
MUWA	Mühledorf Wasserres.	602'101	220'637	619	8	Nord	Ref	601'930	204'410	553	2.82	3.22	3.35	0.9
N14	Ems Plarena	755'100	189'730	570	1	Süd	Ref	759'471	193'157	556	3.94	1.63	4.36	2.9
NEHU	Neuendorf Hurtmatten	627'257	239'509	435	1	Nord	Ref	628'875	240'185	431	5.29	3.86	5.24	0.9
NEU01	Neudorf 1	659'290	224'550	720	8	Nord	Ref	665'540	209'848	454	5.08	5.53	5.41	5.9
NEU02	Neudorf 2	659'706	224'499	735	7	Nord	Ref	665'540	209'848	454	4.6	5.74	5.73	5.9
NEU03	Neudorf 3	660'470	224'246	755	7	Nord	Ref	665'540	209'848	454	4.11	5.72	5.57	5.9
NGD	Grüsch Dorf	768'490	205'450	615	13	Süd	Tal	759'471	193'157	556	9.79	8.01	9.84	1.2
NGS	Grüsch Schwellenen	768'760	205'060	607	6	Süd	Tal	759'471	193'157	556	8.08	2.66	4.28	1.2
NMS	Landquart Rütene	761'785	204'850	529	2	Süd	Ref	759'471	193'157	556	4.3	1.82	4.15	2.9
NV4	San Vittore	727'760	121'500	270	3	Süd	Tal	715'475	113'162	203	3.1	1.54	3.55	2.9
NW01	Stans Galgenried N	669'232	202'160	439	8	Süd	Ref	665'540	209'848	454	6.2	3.85	5.11	1.9
NW02	Stans Galgenried S	669'272	201'761	440	3	Süd	Ref	665'540	209'848	454	7.13	3.66	5.67	1.9
NW03	Oberdorf Schiesstand	672'375	200'273	466	5	Süd	Ref	665'540	209'848	454	6.68	5.26	7.51	1.9
NZI	Zizers Neulöser	761'250	201'200	527	2	Süd	Ref	759'471	193'157	556	4.61	1.46	3.68	2.9
OS01	Oberschrot 1	586'700	175'800	900	14	Nord	Tal	586'808	177'400	1042	3.39	4.1	2.58	4.9
OW01	Obwalden 1	664'271	195'471	558	3	Süd	Ref	665'540	209'848	454	7.06	3.86	5.98	1.9
OW02	Obwalden 2	664'518	195'592	560	3	Süd	Ref	665'540	209'848	454	6.76	3.79	5.87	1.9
OW03	Obwalden 3	664'798	195'978	560	2	Süd	Ref	665'540	209'848	454	4.19	3.65	6.04	1.9
PAY	Payeme	562'285	184'775	489	3	Nord	Ref	562'127	184'612	490	3.21	2.31	3.26	7.9
RAP	Rapperswil	704'500	231'520	430	6	Nord	Ref	693'849	230'708	485	3.64	1.99	2.7	9
RIG	Rigi-Seebodenalp	677'845	213'462	1031	55	Nord	Berg	677'845	213'462	1031	1.34	2.01	1.13	7.9

Tabelle 7.3: Standorte der Passivsammler 3

Abkürzung	Standort	E	N	H	H ^(map,sd)	Region	Typ	E ^(meteo)	N ^(meteo)	H ^(meteo)	NH ₃ ^(meteoacor)	NH ₃ ^(map)	NH ₃ ^(mapcor)	Beob- dauer
		[m]	[m]	[m]	[m]			[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[μg/m ³]	
RO	Root Michaelskreuz	673'847	218'489	791	25	Nord	Ref	677'845	213'462	1031	2.99	4.44	3.08	7.9
SA	Sagno	723'550	80'100	600	52	Süd	Berg	716'034	77'964	353	1.56	0.88	1.68	7.7
SAM1	Suhretal 1	646'092	235'172	474	3	Nord	Ref	648'389	248'365	387	5.31	4.84	5.53	1.8
SAM2	Suhretal 2	646'488	236'250	493	9	Nord	Ref	648'389	248'365	387	4.98	3.54	3.46	1.8
SAM3	Suhretal 3	646'624	235'565	476	2	Nord	Ref	648'389	248'365	387	5.53	3.58	4.41	1.8
SCH	Schänis	722'923	223'521	630	91	Nord	Ref	726'349	237'167	623	1.84	2.14	1.83	7.9
SCHUE00	Schüpfheim0	644'727	201'091	735	14	Nord	Ref	628'005	198'792	745	5.58	5.3	4.75	8
SCHUE01	Schüpfheim 1	645'021	201'587	708	14	Nord	Ref	628'005	198'792	745	11.4	10.86	9.73	4.6
SCHUE02	Schüpfheim2	644'537	201'575	700	5	Nord	Ref	628'005	198'792	745	6.68	5.39	5.68	4.6
SIN1	Freiamt 1	669'329	227'946	570	12	Nord	Ref	677'825	226'880	440	4.66	4.95	4.55	1.8
SIN2	Freiamt 2	669'710	226'212	541	4	Nord	Ref	677'825	226'880	440	6.16	6.05	6.61	1.8
SIN3	Freiamt 3	670'061	227'561	519	8	Nord	Ref	677'825	226'880	440	6.94	6.81	6.67	1.8
SIO	Sion-Aeroport	592'540	118'755	483	0	Süd	Tal	591'630	118'575	482	3.9	1.35	3.94	8
SOAL	Solothum Altwyberh.	607'067	229'174	453	5	Nord	Ref	626'400	233'850	422	2.46	1.99	2.78	0.9
STU1	Stuelegg 1	747'600	252'530	920	16	Nord	Berg	747'861	254'586	776	2.41	4.69	2.85	1.8
SZ01	Bauschli	692'420	207'555	490	7	Süd	Ref	690'174	193'558	438	4.39	4.14	5.61	1.9
SZ02	Tändlen	692'890	207'272	510	9	Süd	Ref	690'174	193'558	438	3.98	4.23	5.51	1.9
SZ03	Rossmattli	692'550	207'040	500	5	Süd	Ref	690'174	193'558	438	4.63	3.68	5.26	1.9
TAE	Tänikon	710'500	259'810	539	4	Nord	Ref	710'500	259'810	539	5.51	10.32	11.27	8
URI01	Uri 1	691'655	188'171	455	2	Süd	Ref	690'174	193'558	438	5.58	2.48	4.9	1.9
URI02	Uri 2	691'718	188'555	455	5	Süd	Ref	690'174	193'558	438	6.21	2.34	4.12	1.9
URI03	Uri 3	691'372	189'215	455	2	Süd	Ref	690'174	193'558	438	6.85	2.72	5.15	1.9

Tabelle 7.4: Standorte der Passivsammler 4

Abkürzung	Standort	E	N	H	H ^(map,sd)	Region	Typ	E ^(meteo)	N ^(meteo)	H ^(meteo)	NH ₃ ^(meteocor)	NH ₃ ^(map)	NH ₃ ^(mapcor)	Beob- dauer
		[m]	[m]	[m]	[m]			[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[μg/m ³]	
VTG	Gwatt	614'540	174'585	558	2	Nord	Ref	601'930	204'410	553	2.91	1.63	2.88	3.7
VU01	Vuisternens-en-Ogoz	569'708	173'324	850	11	Nord	Ref	586'808	177'400	1042	3.08	3.31	2.55	6
WA	Wengernalp	637'640	158'280	1880	79	Süd	Berg	609'400	148'975	1320	0.24	0.39	0.23	7.8
WAEL	Wäldi TG	723'863	276'672	572	4	Nord	Ref	738'420	273'960	440	6.05	5.91	6.45	3.4
WAEN	Wängi TG	713'920	259'410	641	10	Nord	Ref	710'500	259'810	539	5.16	9.08	8.58	3.4
WAU10	Wauwil 10	644'735	224'950	500	1	Nord	Ref	626'400	233'850	422	7.42	5.52	7.5	8
WAU13	Wauwil 13	644'669	224'165	501	1	Nord	Ref	626'400	233'850	422	8.78	5.39	7.32	8
WAU14	Wauwil 14	643'364	224'124	500	5	Nord	Ref	626'400	233'850	422	7.34	5.26	5.54	5.9
WAU16.2	Wauwil 16	643'707	224'651	499	1	Nord	Ref	626'400	233'850	422	4.79	4.5	6.11	5.9
WAU16.4	Wauwil 16	643'707	224'651	499	1	Nord	Ref	626'400	233'850	422	5.45	4.5	6.11	5.9
WAU17	Wauwil 17	643'451	225'590	500	1	Nord	Ref	626'400	233'850	422	6.8	6.31	8.57	5.8
WAU19	Wauwil 19	644'113	224'324	500	1	Nord	Ref	626'400	233'850	422	6.74	4.89	6.64	4.6
WEIN	Weinfelden	723'552	270'148	422	1	Nord	Ref	738'420	273'960	440	7.29	3.26	4.67	3.4
WIE	Schimmelstrasse	681'950	247'250	415	3	Nord	Ref	681'950	247'250	415	4.77	2.49	3.4	3.9
WTGI	Gimmiz Dach	585'511	211'410	444	0	Nord	Ref	601'930	204'410	553	3.79	2.56	4.11	3.7
WTGN	Gimmiz Nord	585'777	211'848	444	0	Nord	Ref	601'930	204'410	553	6.04	3.5	4.86	2.5
WTGS	Gimmiz Süd	585'417	211'024	444	1	Nord	Ref	601'930	204'410	553	4.31	2.25	3.83	2.5
WTGW	Gimmiz West	585'039	211'522	444	1	Nord	Ref	601'930	204'410	553	5.05	2.88	4.38	1.4
ZB01	Zugerberg 1	683'000	220'500	990	6	Nord	Berg	677'845	213'462	1031	1.6	2.82	2.01	7.8
ZG01	Arnold	676'343	229'868	430	5	Nord	Ref	677'825	226'880	440	11.51	5.14	5.42	1.9
ZG02	Grob	676'164	229'277	420	7	Nord	Ref	677'825	226'880	440	6.96	4.61	4.61	1.9
ZG03	Ulrich	675'708	229'387	420	4	Nord	Ref	677'825	226'880	440	8.7	5.41	5.91	1.9
ZIGE	Zigerhüttli	691'689	220'849	989	27	Nord	Ref	677'845	213'462	1031	1.87	3.04	1.62	4.9

Tabelle 7.5: Standorte der Passivsammler 5