

Nasse Deposition in Tirol im Zeitraum Oktober 2017 – September 2018

Bericht erstellt von

Thomas Steinkogler und Anne Kasper-Giebl

Institut für Chemische Technologien und Analytik, TU Wien

Georg Lair und Walter Egger

Abteilung Waldschutz, Amt der Tiroler Landesregierung

Wien, Innsbruck 2019

Inhalt

Kurzfassung	3
1. Hintergrund und Ziel der Studie	4
2. Probenahme, Analysen und Auswertung der nassen Deposition	6
2.1. Beschreibung des Probenahmegerätes	6
2.2. Beschreibung der aktuellen Messstationen in Tirol	7
2.3. Chemische Analysen der Niederschlagswässer und Auswertung der Ergebnisse	10
3. Ergebnisse und Diskussion	11
3.1. Konzentrations- und Depositionsergebnisse für das Untersuchungsjahr Oktober 2017 bis September 2018	11
3.2. Veränderung der Konzentrations- und Depositionswerte im Jahresverlauf	13
3.3. Entwicklung der jährlichen Konzentrations- und Depositionswerte seit Beginn der Messungen	24
3.4. Vergleich der Tiroler Messstellen mit Ergebnissen aus den anderen Bundesländern	36
3.5. Zusammenhang zwischen den Niederschlagsmengen und den Stoffkonzentrationen bzw. Stoffeinträgen	45
4. Zusammenfassung	51
5. Literatur	52

Bericht CTA-EAC-04/19

*Im Auftrag der Tiroler Landesregierung, Abteilung Waldschutz, Bürgerstraße 36, A-6020 Innsbruck
Institut für Chemische Technologien und Analytik, TU Wien, Getreidemarkt 9/164-UPA, A - 1060 Wien*

Kurzfassung

Zwischen dem 1.10.2017 und 30.09.2018 wurden an den drei Tiroler Messstellen in Höfen (Bezirk Reutte), Niederndorferberg (Bezirk Kufstein) und Innervillgraten (Bezirk Lienz) täglich Niederschlagsproben gesammelt. Im Labor wurden der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit und der Ionengehalt (NH_4^+ -, Na^+ -, K^+ -, Ca^{2+} -, Mg^{2+} -, Cl^- -, NO_3^- - und SO_4^{2-} -Konzentrationen) der Niederschlagswässer bestimmt. Insgesamt wurden 394 Niederschlagsproben gesammelt und ausgewertet (153 aus Höfen, 130 aus Innervillgraten, 111 aus Niederndorferberg).

Wie auch in den Vorjahren beobachtet, streuten die täglichen Niederschlagsmengen sehr stark. Ebenso variierten auch die Konzentrationswerte der täglichen Niederschlagsproben. Allgemein hatten einzelne ergiebige Niederschlagsereignisse einen großen Anteil am gesamten Ioneneintrag. Betrachtet man nur die Tage mit Niederschlagsmengen über 16 mm (das sind je nach Station zwischen 11 % und 19 % aller Niederschlagstage), so bewirkten diese bereits 43% bis 55% der gesamten Niederschlagseinträge. Der Eintrag durch nasse Deposition erfolgte dementsprechend im Jahresverlauf schubweise.

Die Auswertungen der Messdaten ergaben Einträge über die nasse Deposition von **1,6** und **1,7 kg S/ha/a** sowie **6,3** und **9,2 kg N/ha/a** an den Messstellen in Nordtirol, während in Innervillgraten (Osttirol) Einträge von **1,4 kg S/ha/a** und **6,3 kg N/ha/a** festgestellt wurden. Damit wird in Tirol für Schwefel keine Überschreitung der kritischen Belastungsgrenze von Ökosystemen (= 3 kg Schwefeleintrag/ha/a gemäß dem „Critical Load“- Konzept; WHO, 1995) registriert. Stickstoffeinträge über 10 kg/ha/a werden von der WHO (1995) als deutliche Belastung eingestuft, die zu negativen Veränderungen in nährstoffarmen Ökosystemen führen. Berücksichtigt man, dass der Gesamteintrag nicht nur mit dem Niederschlag erfolgt, sondern auch über die trockene Deposition und den Nebel gegeben ist, so ist hier eine weitere Beobachtung der Stickstoffeinträge in die Umwelt von großer Bedeutung.

Einen Vergleich der Tiroler Messstellen mit jenen in ganz Österreich zeigt Abbildung 1. Da in diesem Jahr nicht alle Messpunkte betrieben wurden fehlen die Ergebnisse von zwei Messpunkten in Niederösterreich. Der Eintrag von Schwefel liegt im Vergleich zu den übrigen Stationen im üblichen, aber unteren Bereich. Für Stickstoff wurde in Niederndorferberg der höchste Stoffeintrag bestimmt. Die Einträge in Höfen und Innervillgraten entsprechen durchschnittlichen Werten. Weiters sind die Konzentrationswerte im inneralpinen Raum tendenziell geringer als nördlich oder östlich der Alpen, wobei in den hochalpinen Lagen aufgrund höherer Niederschlagssummen trotzdem ökologisch relevante Ionenmengen deponiert werden.

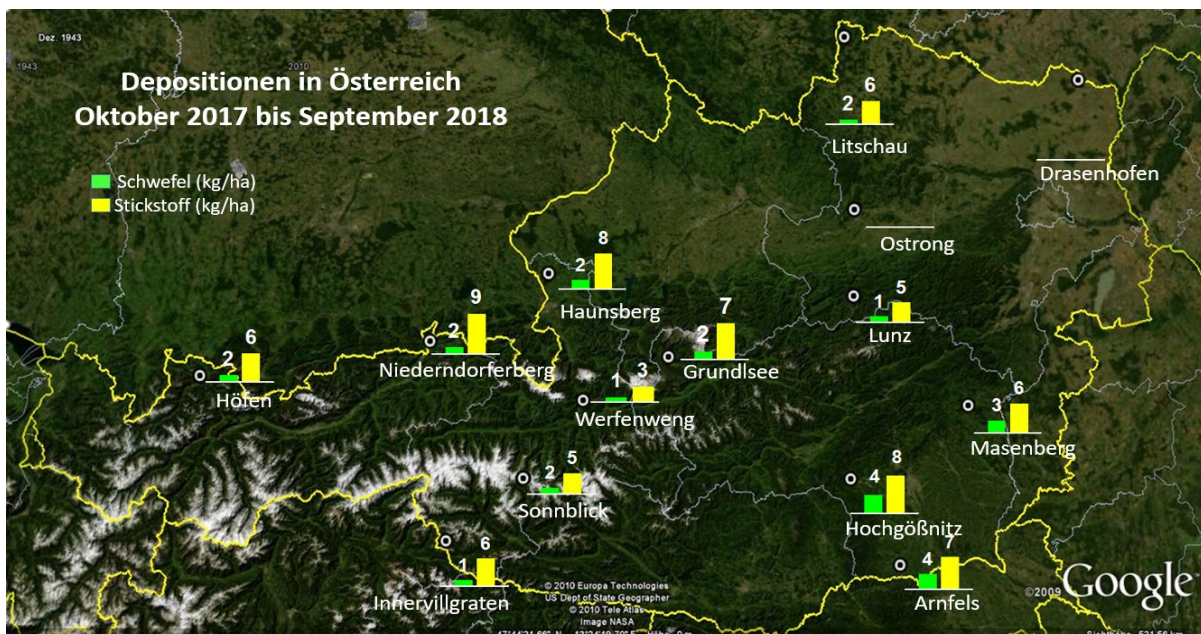


Abbildung 1: Vergleich der Schwefel- und Stickstoffdepositionen in Österreich *Durch die Außerbetriebnahme des WADOS an der Station Ostrong und Drasenhofen konnten für das Jahr 2017/18 keine Daten erhoben werden.

1. Hintergrund und Ziel der Studie

In den 1970er Jahren traten in Mitteleuropa großflächig neuartige Waldschäden, meist unabhängig von Klima, Standort und waldbaulichen Praktiken, auf. Die Schäden an Bäumen umfassten zum einen eine Auflichtung des Kronenbereichs aufgrund vorzeitigen Blattfalls, kleinere und weniger Blattoorgane wie auch Verzweigungsanomalien. Zum anderen zeigten sich auch Schädigungen am Wurzelsystem durch ein starkes Absterben von Feinwurzeln, geringe Reproduktionsfähigkeiten und verminderte Mykorrhizierung. Als Verursacher für dieses sogenannte „Waldsterben“ wurde die komplexe Wirkung verschiedener Luftschadstoffe erkannt, welche über große Distanzen transportiert werden können und vor allem in Form von nasser Deposition (bekannt als „Saurer Regen“) in die Ökosysteme eingetragen werden. Weitere Phänomene dieses grenzüberschreitenden Eintrags atmosphärischer Spurenstoffe waren die Abnahme des pH-Wertes, die Mobilisierung toxischer Kationen in Böden und aquatischen Systemen, aber auch die Eutrophierung und die strukturelle Verarmung terrestrischer Ökosysteme. Als Konsequenz wurden in Tirol, wie auch in anderen Bundesländern, an mehreren Standorten Messstationen zur Quantifizierung der Schadstoffeinträge über die nasse Deposition errichtet (Tabelle 1). In den späten 1980er- und in den 1990er-Jahren konnte aufgrund von Luftreinhaltegesetzen, den zwingenden Einbau von Rauchgasentschwefelungsanlagen in Kraftwerken und durch die Abschaltung einiger Braunkohlekraftwerke, auch in der ehemaligen DDR und CSSR, eine kontinuierliche Abnahme der Schwefeleinträge beobachtet werden. In Tirol wurde die Anzahl der Messstandorte für die nasse Deposition in den späten 1980er Jahren sukzessive dezimiert, sodass ab dem Jahr 1990 nur mehr jene drei Stationen mit den damals höchsten Schadstoffeinträgen weiter erhalten wurden. Diese drei Stationen werden auch heute noch im Sinne des Langzeitmonitorings und zur aktuellen Überwachung der nassen Deposition betrieben. Zwei Standorte befinden sich am Alpennordrand in Höfen/Bezirk Reutte (bis Oktober 2015 in Wängle/Bezirk Reutte) und Niederndorferberg/Bezirk Kufstein und eine Station südlich des Alpenhauptkamms in Innervillgraten/Bezirk Lienz.

Tabelle 1: Ehemalige und aktuelle(*) Messstandorte in Tirol zur Bestimmung der nassen Deposition.

Ort	Messstellenbezeichnung (interne Kennnummer der Abt. Waldschutz, Land Tirol)	Messungszeitraum
Innsbruck	Seegrube (2123)	Dezember 1985 – März 1988
Innsbruck	Gramartboden (2131)	Dezember 1985 – März 1988
Innsbruck	Reichenau (2135)	Dezember 1985 – März 1988
Nöblach	Kalkschmied (2214)	Dezember 1984 – September 1986
Schmirn	Obern (2219)	Oktober 1985 – September 1986
Niederndorferberg*	Niederndorferberg (2526)	November 1983 - dato
Reutte	Wängle (2701)	November 1983 – 18.10.2015
Höfen*	Schiliftweg 3 (2711)	01.12.2015 - dato
Achenkirch	Ampelsbacherhof (2810)	Oktober 1983 – Juni 1989
Innervillgraten*	Innervillgraten 27 (2903)	August 1984 - dato

Derzeit sind in Österreich 18 Messstellen in Betrieb, die von den jeweiligen für Umwelt- bzw. Immissionsschutz zuständigen Landesbehörden betrieben werden. Nähere Angaben zu diesen, sowie den in der Vergangenheit betriebenen Messpunkten befinden sich im Anhang. Die Abbildung 2 zeigt die Lage der einzelnen Stationen. Die Zahlen beziehen sich auf die Stationskennungen, die auch in den Tabellen im Datenanhang angegeben sind (Tabelle A 18 und Tabelle A 19).

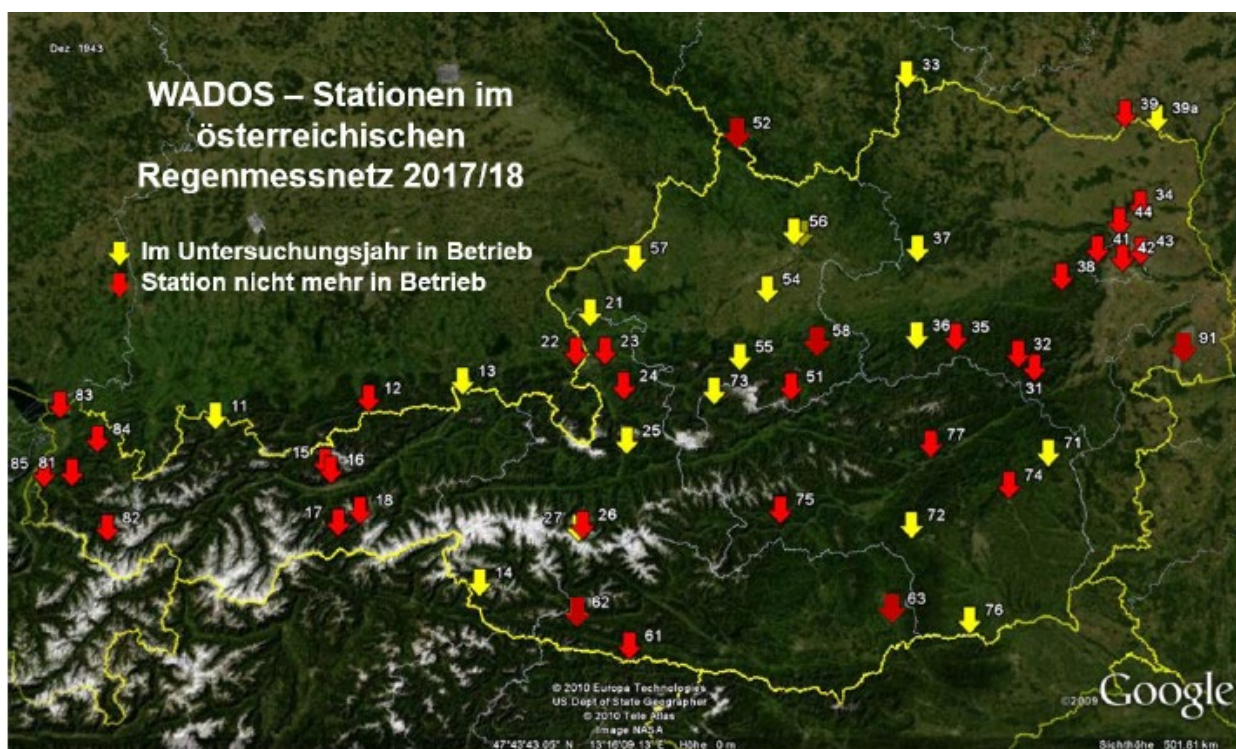


Abbildung 2: Lage der ehemaligen und aktuellen Messtationen zur Bestimmung der nassen Deposition von Luftschadstoffen im österreichischen Niederschlagsmessnetz im Untersuchungsjahr 2017/2018.

Die Niederschlagsmessungen dienen der Erfassung der zeitlichen und räumlichen Trends der Stoffeinträge von Schwefel und Stickstoffverbindungen, freier Säure sowie von neutralisierenden Kationen. Die Bestimmung des Stoffeintrags durch die nasse Deposition ist für die Abschätzung des Zustands und der zukünftigen Entwicklung von Ökosystemen gemäß dem "Critical Load"-Konzept von Bedeutung. Seit den ersten Arbeiten zur Darstellung der Umweltprobleme durch den Stoffeintrag von z.B. Schwefel- und Stickstoffverbindungen (Granat 1978) liegen nun Zeitreihen von etwa 40 Jahren vor, die für Europa beispielsweise von Torseth et al. (2012) dargestellt werden. Eine globale Bewertung des Stoffeintrags und der Niederschlagschemie im Zeitraum 2000 bis 2007, mit einem Vergleich von Messungen und Modellrechnungen, erfolgte in der Arbeit von Vet et al. (2014). Auch für Österreich werden Zeitreihen zum Stoffeintrag in der Literatur beschrieben (Tsakovski et al. 2000, Greilinger et al. 2016).

Im vorliegenden Bericht werden nun die Messergebnisse der nassen Deposition in Tirol von Oktober 2017 bis September 2018 zusammengefasst und erläutert. Neben der Darstellung der Jahreseinträge wird die zeitliche Variabilität der Einträge einerseits anhand der Monatsmittel und andererseits über ihr Langzeitverhalten (z.B. Trends seit Beginn der Messungen) mit Schwergewicht auf die Hauptkomponenten (S- und N-Verbindungen) dargestellt. Ein Überblick über die Messergebnisse im österreichischen WADOS-Messnetz sowie der Zusammenhang zwischen Regenmenge und Stoffkonzentrationen sollen weitere Grundinformationen über die nasse Deposition in Tirol und Österreich für die Leserin und den Leser liefern.

2. Probenahme, Analysen und Auswertung der nassen Deposition

2.1. Beschreibung des Probenahmegerätes

Der WADOS (**W**et **A**nd **D**ry **O**nly **P**recipitation **S**ampler) ist ein Probenahmegerät, das die getrennte Sammlung von nasser und trockener Deposition ermöglicht. Unter „nasser Deposition“ versteht man den Eintrag durch Niederschlagsereignisse in Form von Regen oder Schnee, während unter „trockener Deposition“ der direkte Eintrag von Staub oder gasförmigen Luftinhaltsstoffen verstanden wird. In Österreich wird der WADOS nur zur Probenahme der nassen Deposition verwendet. Abbildung 3 zeigt ein Photo des WADOS. Auf der linken Seite des Bildes befindet sich der Auffangbehälter für die nasse Deposition, der mit einem Deckel verschlossen ist. Im rechten Bildteil ist im Hintergrund der schwarze Niederschlagssensor zu sehen. Davor befindet sich der Auffangbehälter für die trockene Deposition. Sobald der Regensensor einen Niederschlag meldet, wird der Auffangbehälter für die nasse Deposition geöffnet und der Deckel über das Sammelgefäß für die trockene Deposition bewegt. Regen oder Schnee werden somit gesammelt, und die Niederschlagsprobe rinnt durch einen Trichter in eine unten angeschraubte Probenflasche. Um zu verhindern, dass eine grobe Verschmutzung in die Probeflasche gelangt, ist ein auswechselbares Sieb eingebaut. Die Probenflasche selbst ist durch das verlängerte Mantelrohr vor Strahlung geschützt. Das Wechseln der Probenflasche geschieht durch einfaches Ab- und Aufschrauben der Reserve-Probeflasche täglich zwischen 7 und 8 Uhr morgens. Der Messstellenbetreuer misst dabei den gesammelten Niederschlag und transferiert eine Teilprobe (ca. 50 ml) in ein wesentlich kleineres Probenfläschchen. Dadurch wird das Sammeln, Aufbewahren (gekühlt und im Dunkeln) und der Transport der Proben für eine spätere chemische Analyse erleichtert.



Abbildung 3: WADOS der Firma Kroneis GmbH (Messtechnik für die Umwelt-Meteorologie A-1190 Wien, Iglaseegasse 30-32). Links befindet sich die Vorrichtung zur Messung der nassen Deposition, rechts der Auffangbehälter für die trockene Deposition. Der Deckel wird je nach Witterung über die Vorrichtungen geschwenkt.

Der WADOS ist standardmäßig mit einer Heizung inklusive Thermostat ausgerüstet. Der Schnee, der vom Sammelgefäß aufgefangen wird, schmilzt im Inneren und tropft in die untere Probenflasche, wo er wieder gefrieren kann. Die Heizwicklung ist im unteren Drittel an der Außenwand des Auffanggefäßes angebracht. Dies hat zur Folge, dass der Schnee, der im oberen Bereich aufgefangen wird, nicht sofort abgeschmolzen wird. Erst wenn der Deckel wieder geschlossen wird, schmilzt der Schnee ab. Damit können Verdunstungsverluste vermieden werden. Die Temperatur zwischen 8 und 10 °C wird durch ein Thermostat im Sammelgefäß gehalten.

Ist der Niederschlag zu Ende, dann trocknen die Tropfen auf der Regensensoroberfläche durch eine erhöhte Heizstufe (Oberflächentemperatur ca. 50°C) relativ rasch ab. Nach einer Schaltverzögerung von ca. 5 Minuten geht der Deckel wieder auf das Sammelgefäß für nasse Deposition zurück. Die Sensoroberfläche wird jetzt nur mehr auf ca. 20°C gehalten, damit Nebel und Taubildung keine Regenmeldung auslösen. Ein direkter Vergleich zwischen den Regenmengen im WADOS und in einem Ombrometer (Messstelle Höfen, Untersuchungsjahr 2016), der von der Abteilung Waldschutz durchgeführt wurde, ergab eine um ca. 10% verringerte Regenmenge durch das Funktionsprinzip des WADOS-Messgeräts. Eine Datenauswertung ergab zudem, dass Regenmengen unter 0,3 mm/Tag aufgrund des

verspäteten Öffnungsmechanismus und der Benetzungsverluste im WADOS nicht mehr erfasst werden.

Die Probenahme der trockenen Deposition kann durch Austausch des dafür vorgesehenen Sammelgefäßes mit einem Ersatzgefäß erfolgen. In Tirol wird auf die Bestimmung der Einträge über die trockene Deposition mit dem WADOS verzichtet.

2.2. Beschreibung der aktuellen Messstationen in Tirol

Stationsbezeichnung:

Höfen

Gemeindekennziffer:

70816

Stationsnummer:

2711

Anschrift der Station:

6600 Höfen, Schiliftweg 3

Bezirk:

Reutte

Seehöhe der Station:

874 m

Geographische Länge (WGS84):

10° 40' 50,95" E

Geographische Breite (WGS84):

47° 28' 15,21" N

Topographie, Lage der Station:

Tal- und Beckenlage

Geologie:

Nördliche Kalkalpen. Im Bereich der Messstation liegen rigide Gesteine der Lechtaldecke wie Muschelkalk und Wettersteinkalk auf weichen, tonreichen Gesteinen der Allgäudecke wie Fleckenmergel und Kalkmergel (Röhring, 1997).

Klima:

Das Becken von Reutte gehört nach Walter und Lieth (1960) der Klimazone VI (X)3 mit temperiertem, im Gebirge kühlem, humidem Klima mit ausgeprägter kalter Jahreszeit und großen Schneemengen an. Die meisten Niederschläge fallen während der Vegetationszeit. Der durchschnittliche Jahresniederschlag beträgt auf 869 m Meereshöhe 1457 mm, und die Jahresmitteltemperatur liegt bei 6,9 °C (Tirol Atlas, 2017). In Höhen um 1500 m steigt die Niederschlagsmenge auf ca. 1600 bis 1800 mm an.

Boden:

Rendzinen, Braunlehme

Nutzung der Umgebung:

Ländliches Wohngebiet, Grünland (im Winter Schipiste)

Station besteht seit:

01.12.2015 - dato

Anmerkung:

Übersiedelung der Station Wängle/Reutte (Nov/83 bis 18.10.2015) nach Höfen im Herbst 2015.



Abbildung 4: WADOS am Standort Höfen/Bezirk Reutte mit Wetterstation des hydrographischen Dienstes Tirol.

Stationsbezeichnung:
Niederndorferberg

Gemeindekennziffer:
70519

Stationsnummer:
2526

Anschrift der Station:
6342 Niederndorferberg, Eiberg 7b

Bezirk:
Kufstein

Seehöhe der Station:
697 m

Geographische Länge (WGS84):
12° 13' 36,65" E

Geographische Breite (WGS84):
47° 39' 43,60" N

Topographie, Lage der Station:
Hanglage



Abbildung 5: WADOS am Standort Niederndorferberg/ Bezirk Kufstein.

Geologie:
Nördliche Kalkalpen. Die Gemeinde Niederndorferberg erstreckt sich über sanft hügelige Strukturen im Bereich der Bayrischen Voralpen über Höhenlagen zwischen ca. 550 m und knapp über 1000 m Seehöhe. Geologisch gesehen liegt der größte Teil des Gemeindegebietes über Fleckenmergeln und Kalken, daneben spielen auch die Kössener Schichten eine große Rolle. Kleinräumig treten dann noch Aptychenkalke, sowie Terrassensedimente und Gletschermoränen auf (Geologische Bundesanstalt, 2007).

Klima:
Die Gemeinde Niederndorferberg liegt nach Walter und Lieth (1960) in der Klimazone VI(X) mit temperiertem, im Gebirge kühlem, humidem Klima mit ausgeprägter kalter Jahreszeit und großen Schneemengen. Die meisten Niederschläge fallen während der Vegetationszeit (Tirol Atlas, 2017).

Boden:
Rendzinen, Braunlehme

Nutzung der Umgebung:
Ländliches Wohngebiet, Grünland

Station besteht seit:
November 1983 - dato

Stationsbezeichnung:
Innervillgraten

Gemeindekennziffer:
70710

Stationsnummer:
2903

Anschrift der Station:
9932 Innervillgraten Nr. 27

Bezirk:
Lienz

Seehöhe der Station:
1729 m

Geographische Länge (WGS84):
12° 21' 06,14" E

Geographische Breite (WGS84):
46° 49' 04,74" N

Topographie, Lage der Station:
Hanglage

Geologie:

Der größte Teil der Gemeinde liegt auf dem Altkristallin (Alte Gneise). Das Altkristallin wird in seinem Südabschnitt durch die Dominanz von Paragneisen, z.T. auch Marmore, v.a. bei Kalkstein, Glimmerschiefer, Amphibolite und Eklogite charakterisiert. Unmittelbar am Villgratenbach befinden sich vor allem Schwemm- bzw. Murenkegel und undifferenzierte Moränen (Geologische Bundesanstalt, 2006).

Klima:

Das Villgratental gehört, wie alle anderen größeren Täler und Seitentäler in Osttirol (mit Ausnahme des Tiroler Gailtales) zur temperierten Zwischenalpenzone (VI4). Die Winter sind zwar ausgeprägt, dauern jedoch nicht sehr lange. Die Jahresniederschläge liegen um ca. 1.100 mm, wobei im Sommer mittlere und im Winter mäßige Niederschlagsmengen zu erwarten sind (Walter und Lieth, 1960). Für Innervillgraten auf 1400 m Meereshöhe wurde für die Periode 1980-2000 ein mittlerer Jahresniederschlag von ca. 1000 mm und eine mittlere Jahrestemperatur von 3,6 °C gemessen (Tirol Atlas, 2017). Die meisten Niederschläge wurden für diese Periode im Juni und Juli verzeichnet, die geringsten im Jänner und Februar.

Boden:

Ranker, Braunerden

Nutzung der Umgebung:

Ländliches Wohngebiet, Grünland

Station besteht seit:

August 1984 – dato



Abbildung 6: WADOS am Standort Innervillgraten/Bezirk Lienz.

2.3. Chemische Analysen der Niederschlagswässer und Auswertung der Ergebnisse

Im Analysenlabor des Landes Tirol (Sachgebiet Chemische Technische Umweltschutzanstalt) werden der pH-Wert (Maß für die Acidität), die elektrische Leitfähigkeit und die anorganischen Ionen Chlorid, Nitrat und Sulfat sowie Natrium, Ammonium, Kalium, Kalzium und Magnesium bestimmt. Angaben zu den Analysemethoden und Verfahrenskennndaten befinden sich im Datenanhang (Tab. A 20 und A 21).

Bei der Analyse werden die Konzentrationswerte der Tagesproben bestimmt. Zur Bestimmung der mittleren Konzentrationswerte über z.B. einen Monat dürfen diese Werte nicht einfach gemittelt werden, da Tage mit großer Niederschlagsmenge stärker zur Bildung einer Mischprobe beitragen als Tage mit geringem Niederschlag. Es ist eine Gewichtung der Tagesproben über die Niederschlagsmenge vorzunehmen. Diese Mittelwertbildung ist in Formel 1 beschrieben.

Formel 1: Berechnung der gewichteten mittleren Konzentration

$$C = \frac{\sum_i c_i V_i}{\sum_i V_i} = \frac{c_1 * V_1 + c_2 * V_2 + c_3 * V_3 + \dots + c_n * V_n}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n}$$

C...gewichtete mittlere Konzentration [mg/l]
c ...Konzentration [mg/l]
V...Niederschlagsmenge [mm]

Die Stoffeinträge (Depositionswerte) werden gemäß der Formel 2 aus den Konzentrationswerten und der Niederschlagsmenge berechnet. Hohe Einträge können sowohl durch hohe Konzentrationswerte als auch durch große Niederschlagsmengen verursacht werden.

Formel 2: Berechnung der Deposition

$$D = \frac{c * V}{100}$$

D...Deposition [kg/ha]
c ...Konzentration [mg/l]
V...Volumen [mm]

Die untersuchten Kationen und Anionen werden im weiteren Bericht wie in Tabelle 2 abgekürzt.

Tabelle 2: Abkürzungen der untersuchten Kationen und Anionen

Kationen		Anionen	
NH ₄ ⁺	Ammonium	Cl ⁻	Chlorid
NH ₄ ⁺ - N	Ammonium - Stickstoff ¹	NO ₃ ⁻	Nitrat
Na ⁺	Natrium	NO ₃ ⁻ - N	Nitrat - Stickstoff ²
K ⁺	Kalium	SO ₄ ²⁻	Sulfat
Ca ²⁺	Kalzium	SO ₄ ²⁻ - S	Sulfat - Schwefel ³
Mg ²⁺	Magnesium		

Die Azidität des Niederschlagswassers wird als pH-Wert und als H⁺-Konzentration dargestellt. Der Eintrag an freier Säure wird als H⁺-Eintrag angegeben. Die Analysendaten der einzelnen Tagesproben sind im Datenanhang dieses Berichts aufgelistet.

¹ Ammonium-Stickstoff bezeichnet die Menge/Konzentration an Stickstoff (N), die in Form des Ammoniumions vorliegt.

² Nitrat-Stickstoff bezeichnet die Menge/Konzentration an Stickstoff (N), die in Form des Nitrations vorliegt.

³ Sulfat-Schwefel bezeichnet die Menge/Konzentration an Schwefel (S), die in Form des Sulfations vorliegt.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1. Konzentrations- und Depositionsergebnisse für das Untersuchungsjahr Oktober 2017 bis September 2018

Die mengengewichteten Jahresmittelwerte der Konzentration sowie die Jahreseinträge an den drei Tiroler Messstationen sind in den Tabellen 3 und 4 angeführt. Im Datenanhang sind ergänzend zu den Jahresmittelwerten die Ergebnisse für die einzelnen Quartale sowie die Sommer- und Winterhalbjahre dargestellt (Tab. A 22 - A 25). Zusätzlich werden alle Ergebnisse auch als Äquivalentkonzentrationen gelistet (Tab. A 26 und A 27).

Tabelle 3: Mengengewichtete Jahresmittelwerte der Konzentration (mg/L) an Niederschlagsinhaltsstoffen im Zeitraum 01.10.2017 bis 30.09.2018.

NS [mm]	pH [-]	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻ -S
[mg/L]													
Höfen													
1142,4	5,8	0,001	0,10	0,43	0,34	0,07	0,57	0,12	0,14	0,97	0,22	0,43	0,14
Niederndorferberg													
1137,8	5,6	0,003	0,15	0,67	0,52	0,10	0,18	0,03	0,14	1,28	0,29	0,44	0,15
Innervillgraten													
844,0	5,9	0,001	0,08	0,72	0,56	0,12	0,34	0,04	0,10	0,83	0,19	0,50	0,17

Tabelle 4: Jahreseintrag (kg/ha) der Niederschlagsinhaltsstoffe (nasse Deposition) im Zeitraum 01.10.2017 bis 30.09.2018.

NS [mm]	pH [-]	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻ -S
[kg/ha]													
Höfen													
1142,4	5,8	0,017	1,13	4,95	3,85	0,74	6,55	1,32	1,65	11,04	2,49	4,86	1,62
Niederndorferberg													
1137,8	5,6	0,031	1,66	7,64	5,94	1,17	2,08	0,32	1,60	14,58	3,29	4,96	1,65
Innervillgraten													
844,0	5,9	0,010	0,69	6,11	4,75	1,00	2,87	0,34	0,83	6,99	1,58	4,18	1,39

Für die Bestimmung des Gesamtsäureeintrags mit dem Niederschlag sind der pH-Wert sowie die Ionen Sulfat, Nitrat und Ammonium interessant. Im Jahresmittel wurden pH-Werte zwischen 5,6 und 5,9 gemessen. Eine Belastung durch ‚Saurer Regen‘ ist im Jahresmittel nicht mehr zu erkennen. Erst ab einem pH von kleiner 5,0 wird der Niederschlag als ‚Saurer Regen‘ bezeichnet.

Sulfat und Nitrat stellen die Anionen der starken Säuren Schwefelsäure und Salpetersäure dar. Schwefelsäure bildet sich in der Atmosphäre aus Schwefeldioxid, während Salpetersäure aus den Stickstoffoxiden (NO_x, i.e. Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid) gebildet wird. Schwefeldioxid entsteht vor allem bei der Verbrennung von schwefelhaltigen Brennstoffen (z.B. Kohle) und bei industriellen Prozessen. Die Umwandlung von Schwefeldioxid zu Schwefelsäure dauert mehrere Stunden bis wenige Tage. In dieser Zeit können die Luftschadstoffe (die Ausgangsprodukte aber auch das gebildete Sulfat) durch Windströmungen mehrere 100 km transportiert werden und so große Gebiete beeinflussen. In den vergangenen Jahrzehnten wurden die Emissionen von Schwefeldioxid in Österreich und in den Nachbarländern deutlich

reduziert. Entsprechend sind die Konzentrationswerte für Sulfat an den drei Messstandorten in Tirol gering und relativ ähnlich. Stickoxide entstehen hauptsächlich bei Verbrennungsprozessen. Die Hauptquellen sind Verbrennungsmotoren und Feuerungsanlagen für Kohle, Öl, Gas, Holz und Abfälle. Die Stickoxide fördern die Feinstaubbildung und treiben zusammen mit flüchtigen Kohlenwasserstoffen die sommerliche Ozonbildung voran. Stickoxide und deren Umwandlungsprodukte (wie z.B. Nitrat) werden ebenfalls mit dem Wind verfrachtet und tragen daher sowohl lokal, als auch regional zu einer Belastung der Atmosphäre und von Ökosystemen bei. In der Atmosphäre können Schwefelsäure und Salpetersäure von Ammoniak neutralisiert werden, wobei sich Ammoniumsulfat und Ammoniumnitrat bilden. Der wichtigste Emittent von Ammoniak ist die Landwirtschaft. Aus diesem Grund können gerade in ländlichen Gebieten deutliche lokale Unterschiede in den Konzentrationswerten für Ammonium auftreten. Nach dem Eintrag wird Ammonium abgebaut, was zur Säurebildung in Gewässern und Böden führt. Daher werden Ammoniumionen im Niederschlag auch als Säurebildner angeführt. Abgesehen von der Bildung des ‚Sauren Regens‘ können die Einträge von Nitrat-Stickstoff und Ammonium-Stickstoff zu einer Überdüngung des Bodens und der Gewässer führen (Eutrophierung) und müssen auch deshalb überwacht werden. Im Vergleich zum Beginn der Niederschlagsmessungen in Tirol vor etwa 30 Jahren, hat die relative Bedeutung dieser Eutrophierung im Vergleich zum Säureeintrag deutlich zugenommen.

Der Jahresmittelwert der Nitrat-Konzentration an der Messstelle Niederndorferberg war im Untersuchungszeitraum etwas höher als an den anderen beiden Messstationen in Tirol (Tabelle 3). Dies zeigt, dass für diesen Luftschadstoff bzw. dessen Vorläufersubstanzen größere lokale Unterschiede in Tirol vorherrschen als vergleichsweise für Schwefeldioxid bzw. Sulfat. Dies kann auch durch lokale Unterschiede in den Emissionsmengen bedingt sein.

Für die Konzentrationswerte von Kalzium, Magnesium, Natrium, Kalium und Chlorid sind unterschiedliche Emissionsquellen verantwortlich. So führt beispielsweise eine Beeinflussung durch Mineralstaub, der lokal oder auch über Ferntransport (z.B. Wüstenstaub, der in Österreich großteils aus der Sahara stammt) eingebracht werden kann, zu einer Erhöhung der Werte. Entsprechend kommt es lokal und auch zeitlich zu deutlichen Unterschieden der Konzentrationswerte. Weiters können auch Verbrennungsprozesse zu einer Erhöhung der Kalium- oder Chloridkonzentrationen führen. Die basischen Kationen (Kalzium, Magnesium, Natrium und Kalium) reduzieren den Säureeintrag, da sie vorhandene Säuren neutralisieren.

Die jährliche Niederschlagsmenge ist an der inneralpinen Messstelle Innervillgraten geringer als an den Messstellen in Höfen und Niederndorferberg am nördlichen Alpenhauptkamm. Da sich der Stoffeintrag aus dem Produkt von Niederschlagsmenge und Konzentration berechnet (Formel 2), ergeben sich andere Verteilungsmuster bei den Eintragsmengen als bei den Konzentrationswerten (vgl. Tabellen 3 und 4). So ist der Eintrag an Sulfat an der inneralpinen Messstelle Innervillgraten etwas geringer als beispielsweise in Niederndorferberg, obwohl der Konzentrationswert in Innervillgraten geringfügig höher ist. Ähnliche Unterschiede treten auch für Ammonium auf. So wird in Innervillgraten im Jahresmittel die höchste Ammoniumkonzentration gemessen, der Stoffeintrag ist allerdings in Niederndorferberg etwas höher. Kalzium und Magnesium zeigen in Höfen sowohl die höchsten Konzentrations- als auch Depositionswerte. Dies kann auf eine Periode in den Monaten November und Dezember mit hohen Kalzium- und Magnesiumkonzentrationswerten zurückgeführt werden.

Abbildung 7 zeigt einen Vergleich der jährlichen Depositionsmengen der untersuchten Ionen. Ammonium, Nitrat und Kalzium zeigten im Untersuchungsjahr die höchsten Stoffeinträge (kg/ha).

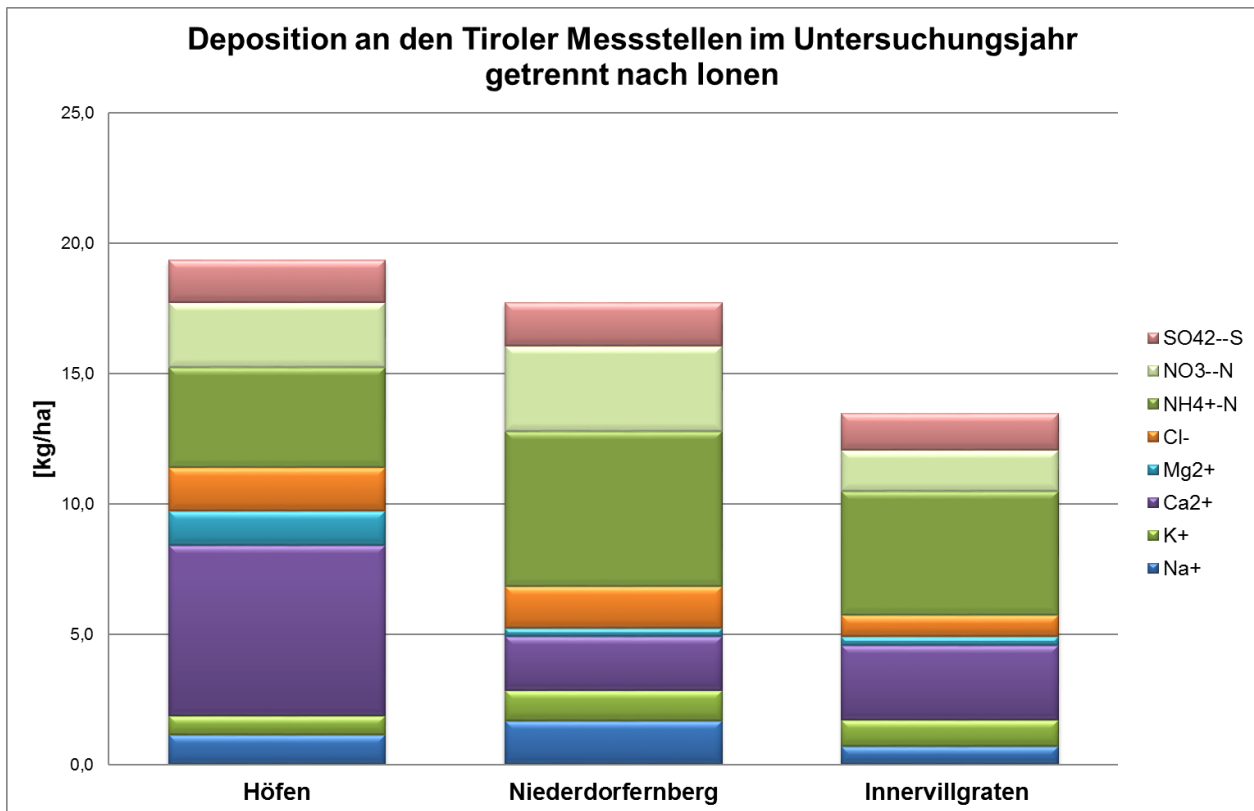


Abbildung 7: Deposition der einzelnen Komponenten an den Tiroler Messstellen im Jahr 2017/18.

3.2. Veränderung der Konzentrations- und Depositionswerte im Jahresverlauf

Bereits Horváth und Mészáros (1984) sowie Rodhe und Granat (1984) untersuchten die jahreszeitlichen Abhängigkeiten der Sulfat- und Nitratkonzentrationen im Niederschlagswasser an verschiedenen Standorten in Europa. Übereinstimmend stellten sie die geringsten Ionenkonzentrationen während der Wintermonate fest und beschrieben ein Konzentrationsmaximum im Frühjahr (März bis April). Auch die Messungen in Österreich zeigen diese saisonabhängigen Veränderungen, die neben Sulfat und Nitrat auch für Ammonium beobachtet werden können. Jahreszeitlich unterschiedlich starke Emissionen der Vorläufersubstanzen (Schwefeldioxid, Ammoniak), Unterschiede bei luftchemischen Prozessen (Oxidation von Schwefeldioxid und den Stickstoffoxiden) und Änderungen in den meteorologischen Ausbreitungsbedingungen bewirken diese saisonabhängigen Veränderungen der Ionenkonzentrationswerte im Niederschlagswasser (Hedin et al. 1991, Kasper und Puxbaum 1994, Hand et al. 2012).

Für Natrium, Kalium, Magnesium, Calcium und Chlorid sind keine so stetigen saisonalen Änderungen der Konzentrationswerte zu erkennen. Hier werden die Konzentrationsverläufe viel stärker durch Episoden (z.B. lokaler Einfluss oder Ferntransport von Mineralsstaub) geprägt.

Betrachtet man die saisonalen Verläufe der Depositionswerte, so ergibt sich ein verändertes Bild. Im Sommer treten zumeist die höchsten Niederschlagsmengen auf. Daraus ergeben sich auch höhere Ioneneinträge in dieser Zeit. Besonders deutlich wird dies im Beobachtungszeitraum 2017/2018 an der Station Innervillgraten. Die entsprechenden Niederschlagsmengen waren 274 mm im Winterhalbjahr und 570 mm im Sommerhalbjahr. In Kombination mit den saisonalen Konzentrationswerten ergibt sich eine mehr als achtmal so hohe Deposition von Sulfat-Schwefel im Sommer als im Winterhalbjahr. Auch die Deposition von Ammonium-Stickstoff war im Sommer fünfmal so hoch, die Deposition von Nitrat-Stickstoff 3,6 mal höher als im Winterhalbjahr. In Höfen und Niederdorferberg sind die Unterschiede in den Niederschlagsmengen nicht so deutlich.

Die Tabellen 5 bis 7 listen die Monatsmittelwerte der Konzentrationswerte und die Tabellen 8 bis 10 die dazugehörigen monatlichen Depositionsraten auf, die an den drei Messstellen in Tirol bestimmt wurden.

Tabelle 5: Mengengewichtete Monatsmittelwerte der Konzentration an Niederschlagsinhaltsstoffen (in mg/L) in **Höfen**

Monat	NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻ -S
	[mm]	[-]					[mg/L]				
Okt.17	120,7	5,6	0,003	0,09	0,21	0,03	0,19	0,05	0,13	0,14	0,07
Nov.17	122,0	5,5	0,003	0,15	0,13	0,11	0,66	0,15	0,17	0,16	0,15
Dez.17	105,4	6,4	0,000	0,16	0,08	0,05	2,16	0,37	0,24	0,19	0,29
Jän.18	217,0	5,6	0,002	0,13	0,08	0,03	0,13	0,04	0,22	0,08	0,03
Feb.18	51,0	5,8	0,001	0,10	0,11	0,03	0,14	0,04	0,15	0,11	0,03
Mär.18	33,9	6,5	0,000	0,19	0,75	0,05	0,84	0,26	0,27	0,62	0,18
Apr.18	26,4	6,8	0,000	0,12	0,79	0,40	1,89	0,32	0,16	0,38	0,30
Mai.18	98,9	6,6	0,000	0,05	0,83	0,13	0,66	0,16	0,08	0,36	0,23
Jun.18	111,8	6,6	0,000	0,07	0,47	0,06	0,58	0,09	0,09	0,27	0,19
Jul.18	61,6	6,2	0,001	0,05	0,76	0,05	0,38	0,06	0,09	0,44	0,23
Aug.18	107,3	6,1	0,001	0,06	0,52	0,05	0,34	0,06	0,09	0,28	0,16
Sep.18	86,4	6,0	0,001	0,03	0,32	0,03	0,22	0,04	0,05	0,19	0,09

Tabelle 6: Mengengewichtete Monatsmittelwerte der Konzentration an Niederschlagsinhaltsstoffen (in mg/L) in **Niederndorferberg**

Monat	NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻ -S
	[mm]	[-]					[mg/L]				
Okt.17	112,0	5,4	0,004	0,16	0,30	0,05	0,11	0,02	0,25	0,21	0,09
Nov.17	100,4	5,4	0,004	0,21	0,38	0,05	0,13	0,02	0,14	0,36	0,13
Dez.17	108,0	5,0	0,011	0,45	0,15	0,05	0,13	0,02	0,23	0,40	0,13
Jän.18	135,6	5,5	0,003	0,17	0,08	0,03	0,09	0,01	0,10	0,12	0,05
Feb.18	31,6	5,7	0,002	0,35	0,26	0,04	0,15	0,03	0,32	0,36	0,11
Mär.18	45,2	5,5	0,003	0,12	0,92	0,05	0,19	0,02	0,14	0,82	0,23
Apr.18	22,4	6,2	0,001	0,16	0,98	0,49	0,95	0,11	0,19	0,46	0,37
Mai.18	84,5	6,5	0,000	0,09	1,22	0,30	0,25	0,05	0,13	0,31	0,27
Jun.18	144,1	6,3	0,001	0,10	0,87	0,29	0,30	0,05	0,17	0,27	0,24
Jul.18	103,3	6,0	0,001	0,04	0,65	0,04	0,10	0,02	0,07	0,25	0,13
Aug.18	166,2	6,0	0,001	0,05	0,56	0,06	0,20	0,03	0,07	0,26	0,11
Sep.18	84,5	5,8	0,001	0,04	0,40	0,04	0,16	0,02	0,06	0,22	0,11

Tabelle 7: Mengengewichtete Monatsmittelwerte der Konzentration an Niederschlagsinhaltsstoffen (in mg/L) in **Innervillgraten**

Monat	NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻ -S
	[mm]	[-]					[mg/L]				
Okt.17	7,9	6,1	0,001	0,09	0,82	0,14	0,15	0,03	0,19	0,40	0,28
Nov.17	55,5	6,1	0,001	0,03	0,29	0,03	0,02	0,00	0,05	0,09	0,06
Dez.17	56,2	6,4	0,000	0,05	0,22	0,04	0,07	0,02	0,06	0,08	0,02
Jän.18	70,8	5,7	0,002	0,26	0,13	0,11	0,15	0,02	0,11	0,06	0,04
Feb.18	20,5	5,7	0,002	0,06	0,18	0,03	0,07	0,01	0,03	0,13	0,01
Mär.18	63,1	5,9	0,001	0,06	0,51	0,04	0,07	0,02	0,11	0,23	0,08
Apr.18	51,6	6,6	0,000	0,11	0,54	0,09	1,04	0,09	0,14	0,25	0,30
Mai.18	119,8	6,2	0,001	0,12	0,53	0,24	0,92	0,08	0,16	0,20	0,35
Jun.18	73,9	6,2	0,001	0,07	0,86	0,20	0,38	0,06	0,11	0,28	0,22
Jul.18	97,4	6,5	0,000	0,08	1,36	0,25	0,49	0,06	0,15	0,23	0,18
Aug.18	193,5	5,7	0,002	0,03	0,49	0,05	0,11	0,03	0,04	0,19	0,15
Sep.18	33,6	5,7	0,002	0,04	0,41	0,03	0,08	0,02	0,07	0,19	0,12

Tabelle 8: Monatliche nasse Deposition der Niederschlagsinhaltsstoffe (in kg/ha) in **Höfen**

Monat	NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻ -S
	[mm]	[-]					[kg/ha]				
Okt.17	120,7	5,6	0,003	0,10	0,25	0,03	0,23	0,06	0,16	0,17	0,08
Nov.17	122,0	5,5	0,004	0,18	0,16	0,14	0,80	0,18	0,20	0,20	0,18
Dez.17	105,4	6,4	0,000	0,17	0,09	0,05	2,28	0,39	0,25	0,20	0,31
Jän.18	217,0	5,6	0,005	0,28	0,18	0,07	0,29	0,09	0,47	0,16	0,06
Feb.18	51,0	5,8	0,001	0,05	0,05	0,02	0,07	0,02	0,08	0,06	0,01
Mär.18	33,9	6,5	0,000	0,07	0,25	0,02	0,28	0,09	0,09	0,21	0,06
Apr.18	26,4	6,8	0,000	0,03	0,21	0,11	0,50	0,08	0,04	0,10	0,08
Mai.18	98,9	6,6	0,000	0,05	0,82	0,13	0,65	0,16	0,07	0,35	0,22
Jun.18	111,8	6,6	0,000	0,08	0,53	0,06	0,65	0,10	0,10	0,30	0,21
Jul.18	61,6	6,2	0,000	0,03	0,47	0,03	0,24	0,04	0,05	0,27	0,14
Aug.18	107,3	6,1	0,001	0,06	0,55	0,06	0,37	0,07	0,09	0,30	0,17
Sep.18	86,4	6,0	0,001	0,03	0,27	0,03	0,19	0,04	0,04	0,16	0,08

Tabelle 9: Monatliche nasse Deposition der Niederschlagsinhaltsstoffe (in kg/ha) in **Niederndorferberg**

Monat	NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻ -S
	[mm]	[-]					[kg/ha]				
Okt.17	112,0	5,4	0,004	0,17	0,33	0,05	0,13	0,02	0,28	0,23	0,10
Nov.17	100,4	5,4	0,004	0,21	0,38	0,05	0,13	0,02	0,14	0,36	0,13
Dez.17	108,0	5,0	0,012	0,48	0,17	0,05	0,14	0,02	0,25	0,43	0,14
Jän.18	135,6	5,5	0,004	0,22	0,11	0,04	0,13	0,01	0,14	0,16	0,07
Feb.18	31,6	5,7	0,001	0,11	0,08	0,01	0,05	0,01	0,10	0,11	0,03
Mär.18	45,2	5,5	0,001	0,05	0,41	0,02	0,09	0,01	0,07	0,37	0,11
Apr.18	22,4	6,2	0,000	0,03	0,22	0,11	0,21	0,02	0,04	0,10	0,08
Mai.18	84,5	6,5	0,000	0,08	1,03	0,25	0,21	0,04	0,11	0,26	0,23
Jun.18	144,1	6,3	0,001	0,14	1,26	0,41	0,44	0,07	0,25	0,39	0,35
Jul.18	103,3	6,0	0,001	0,04	0,67	0,04	0,11	0,02	0,07	0,26	0,14
Aug.18	166,2	6,0	0,001	0,08	0,93	0,09	0,33	0,05	0,11	0,43	0,19
Sep.18	84,5	5,8	0,001	0,03	0,34	0,04	0,13	0,02	0,05	0,19	0,09

Tabelle 10: Monatliche nasse Deposition der Niederschlagsinhaltsstoffe (in kg/ha) in **Innervillgraten**

Monat	NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻ -S
	[mm]	[-]					[kg/ha]				
Okt.17	7,9	6,1	0,000	0,01	0,06	0,01	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02
Nov.17	55,5	6,1	0,000	0,02	0,16	0,02	0,01	0,00	0,03	0,05	0,03
Dez.17	56,2	6,4	0,000	0,03	0,12	0,02	0,04	0,01	0,04	0,05	0,01
Jän.18	70,8	5,7	0,001	0,19	0,09	0,07	0,11	0,01	0,08	0,04	0,03
Feb.18	20,5	5,7	0,000	0,01	0,04	0,01	0,01	0,00	0,01	0,03	0,00
Mär.18	63,1	5,9	0,001	0,04	0,32	0,03	0,05	0,01	0,07	0,15	0,05
Apr.18	51,6	6,6	0,000	0,05	0,28	0,05	0,53	0,05	0,07	0,13	0,15
Mai.18	119,8	6,2	0,001	0,15	0,63	0,29	1,10	0,09	0,20	0,24	0,42
Jun.18	73,9	6,2	0,001	0,05	0,64	0,15	0,28	0,04	0,08	0,21	0,16
Jul.18	97,4	6,5	0,000	0,08	1,32	0,25	0,48	0,06	0,15	0,22	0,18
Aug.18	193,5	5,7	0,004	0,07	0,94	0,11	0,21	0,05	0,08	0,37	0,29
Sep.18	33,6	5,7	0,001	0,01	0,14	0,01	0,03	0,01	0,02	0,06	0,04

In der Folge werden die Ergebnisse für Ammonium-N, Nitrat-N und Sulfat-S, geordnet nach den drei Messstellen in Tirol, graphisch dargestellt. Diese Auswahl wurde getroffen, da die genannten Komponenten für den Säureeintrag und die Eutrophierung von Ökosystemen wesentlich sind. Die Abbildungen 8, 10 und 12 zeigen die Jahresgänge der vergangenen Jahre sowie die aktuellen Konzentrationswerte. Die Abbildungen 9, 11 und 13 stellen die Ergebnisse der Depositionswerte analog dar. Im Anhang sind die Abbildungen der restlichen Komponenten ersichtlich.

Zur Berechnung der mittleren Jahresgänge wurden jeweils die Konzentrationswerte oder Ioneneinträge eines jeden Monats (also alle Jännerwerte, alle Februarwerte, usw.) seit Beginn der Messungen volumengewichtet gemittelt. Der direkte Vergleich zwischen aktuellem und langjährigem Mittel ermöglicht ein unmittelbares Erkennen von Besonderheiten der diesjährigen Untersuchungsperiode. Der grau markierte Bereich stellt die maximalen und minimalen Monatsmittelwerte dar, die seit Beginn der Messungen in jedem Monat erfasst wurden. Diese Flächen drücken somit die Schwankungsbreite der bisher erfassten Monatsmittelwerte aus.

Zusätzlich zu den saisonabhängigen Unterschieden des Ioneneintrags, die über die Monatsmittelwerte und den daraus abgeleiteten Jahresgängen ausgedrückt werden, treten starke tägliche Unterschiede auf. Der Ioneneintrag durch die nasse Deposition ist ungleichmäßig verteilt (Smith und Hunt, 1978). Durch Phasen ohne Niederschlag unterbrochen, werden die Ionen "schubweise" deponiert. Diese Aussage kann durch folgendes Beispiel verdeutlicht werden: an der Station Innervillgraten fielen am niederschlagsstärksten Tag (25.08.2018) 48 mm Niederschlag, während im Vergleich dazu im Oktober 2017 nur insgesamt 7,9 mm zu verzeichnen waren. Eine detailliertere Betrachtung der Tagesproben und des Zusammenhangs zwischen der Niederschlagsmenge und der Stoffkonzentration erfolgt im Abschnitt 3.5.

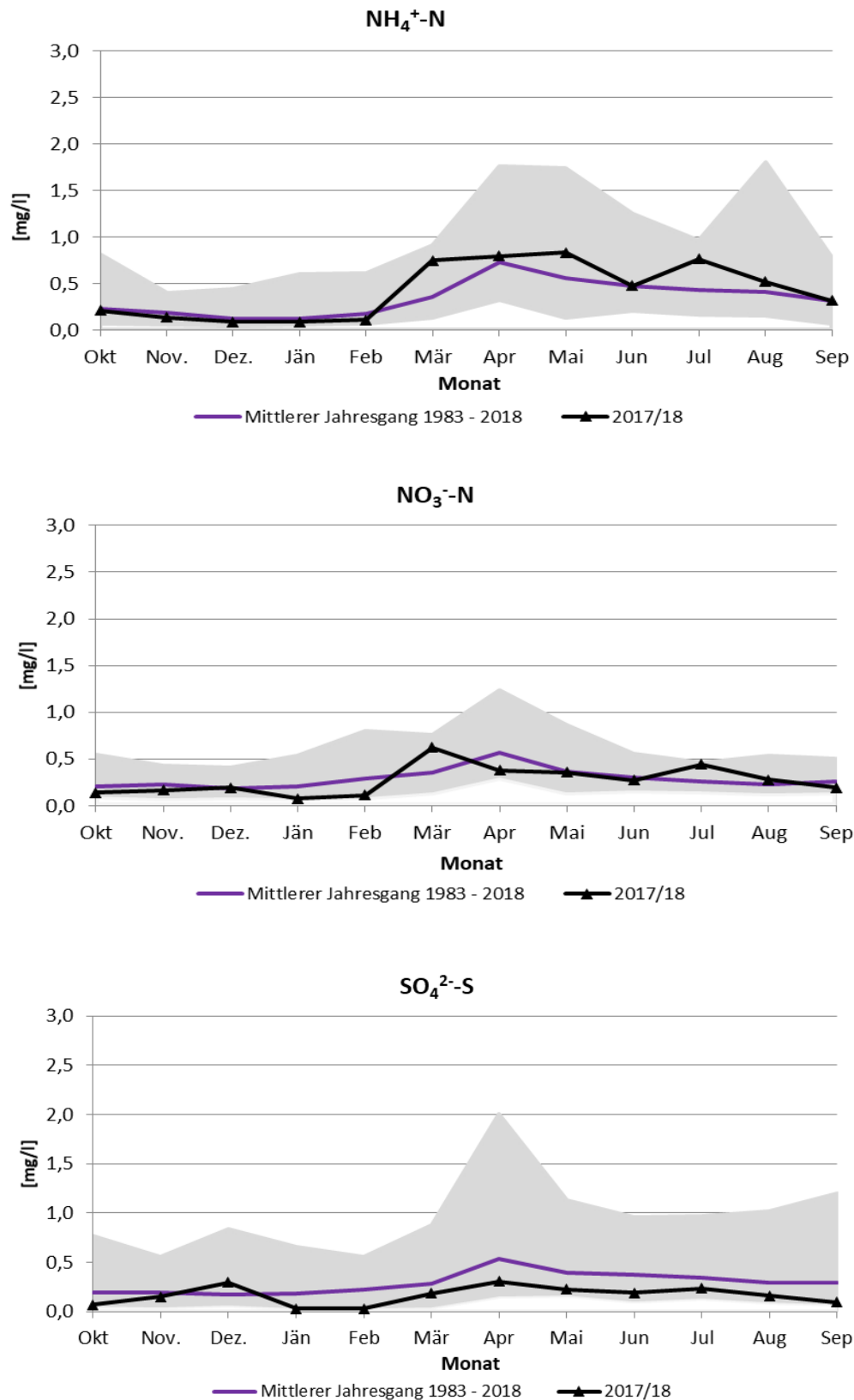


Abbildung. 8: Darstellung der mittleren monatlichen **Konzentrationen** in der Untersuchungsperiode 2017/18 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messstelle in **Höfen**. Die grau hinterlegte Fläche stellt den Bereich zwischen den bisher aufgetretenen Minima und Maxima der Monatswerte dar.

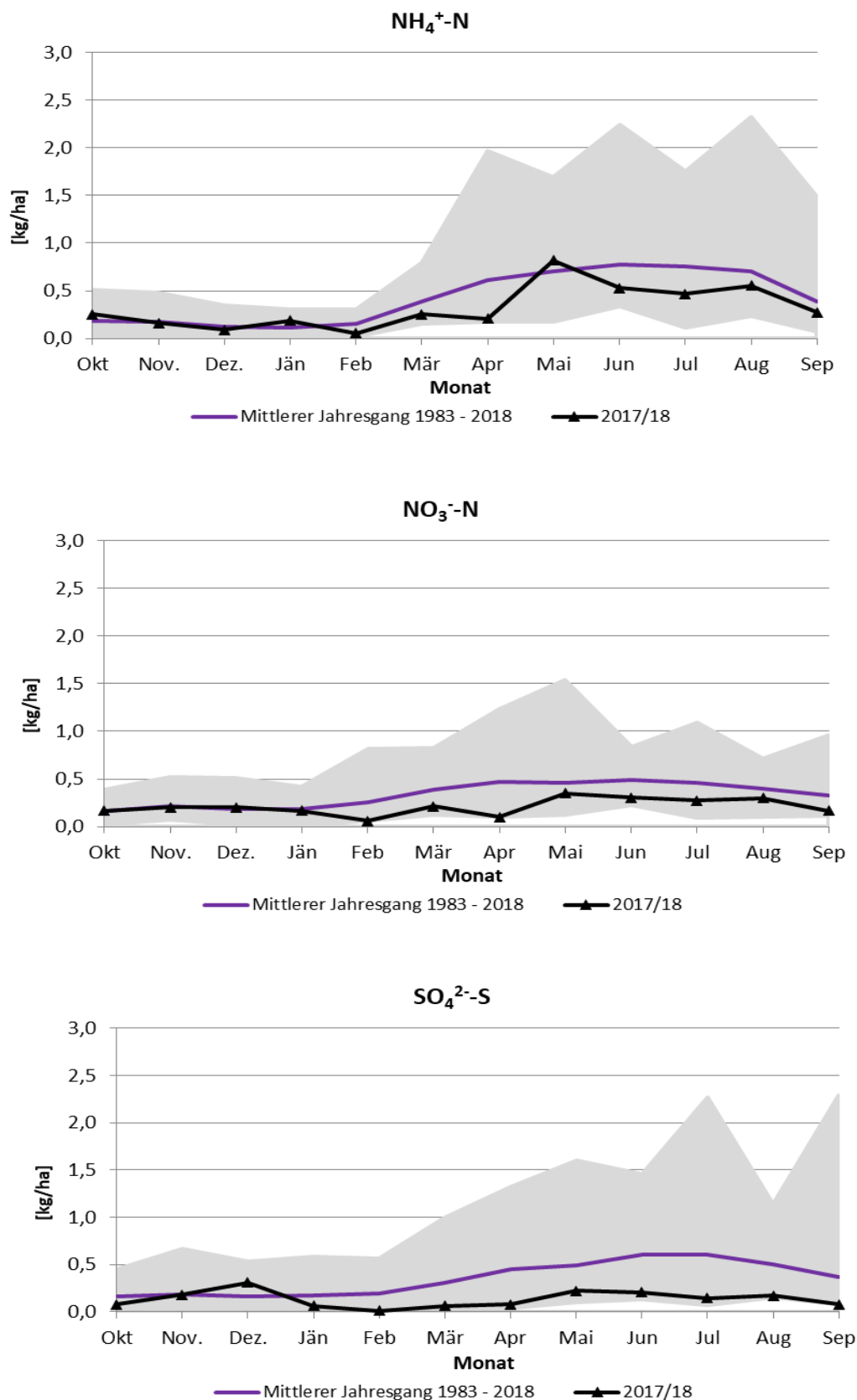


Abbildung 9: Darstellung der mittleren monatlichen **Einträge** in der Untersuchungsperiode 2017/18 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messstelle in **Höfen**. Die grau hinterlegte Fläche stellt den Bereich zwischen den bisher aufgetretenen Minima und Maxima der Monatseinträge dar.

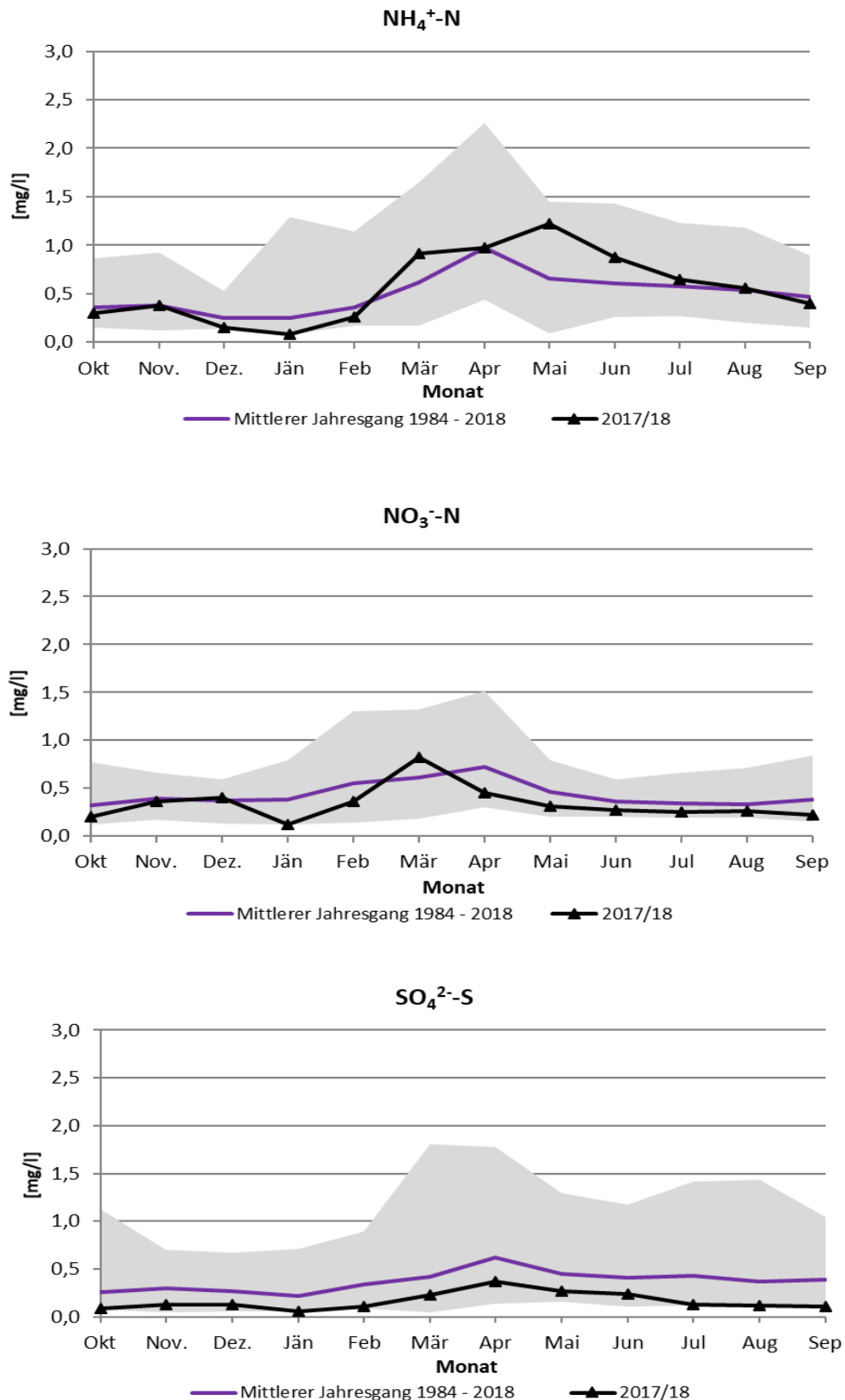


Abbildung. 10: Darstellung der mittleren monatlichen **Konzentrationen** in der Untersuchungsperiode 2017/18 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messstelle in **Niederndorferberg**. Die grau hinterlegte Fläche stellt den Bereich zwischen den bisher aufgetretenen Minima und Maxima der Monatswerte dar.

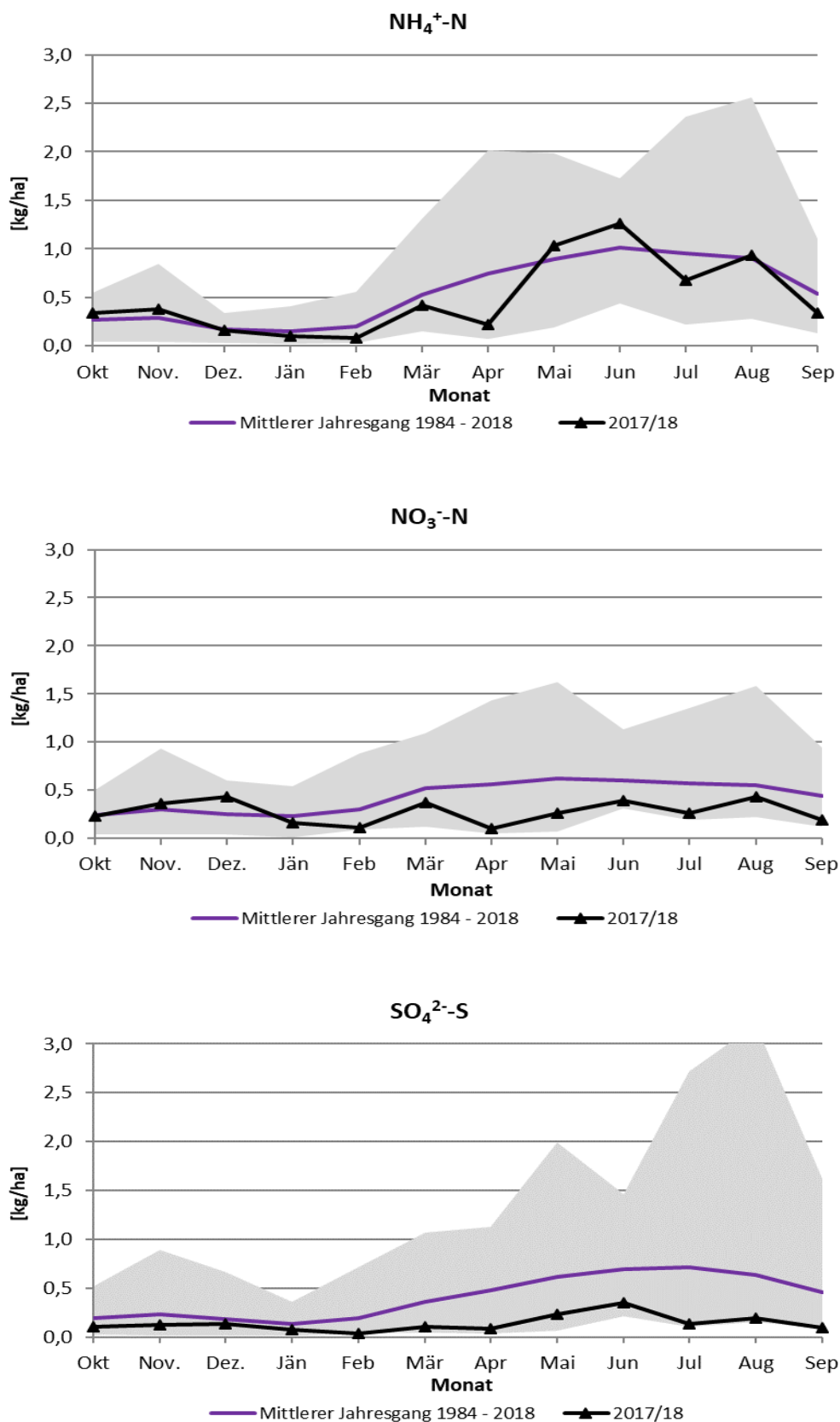


Abbildung 11: Darstellung der mittleren monatlichen **Einträge** in der Untersuchungsperiode 2017/18 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messstelle in **Niederndorferberg**. Die grau hinterlegte Fläche stellt den Bereich zwischen den bisher aufgetretenen Minima und Maxima der Monatseinträge dar.

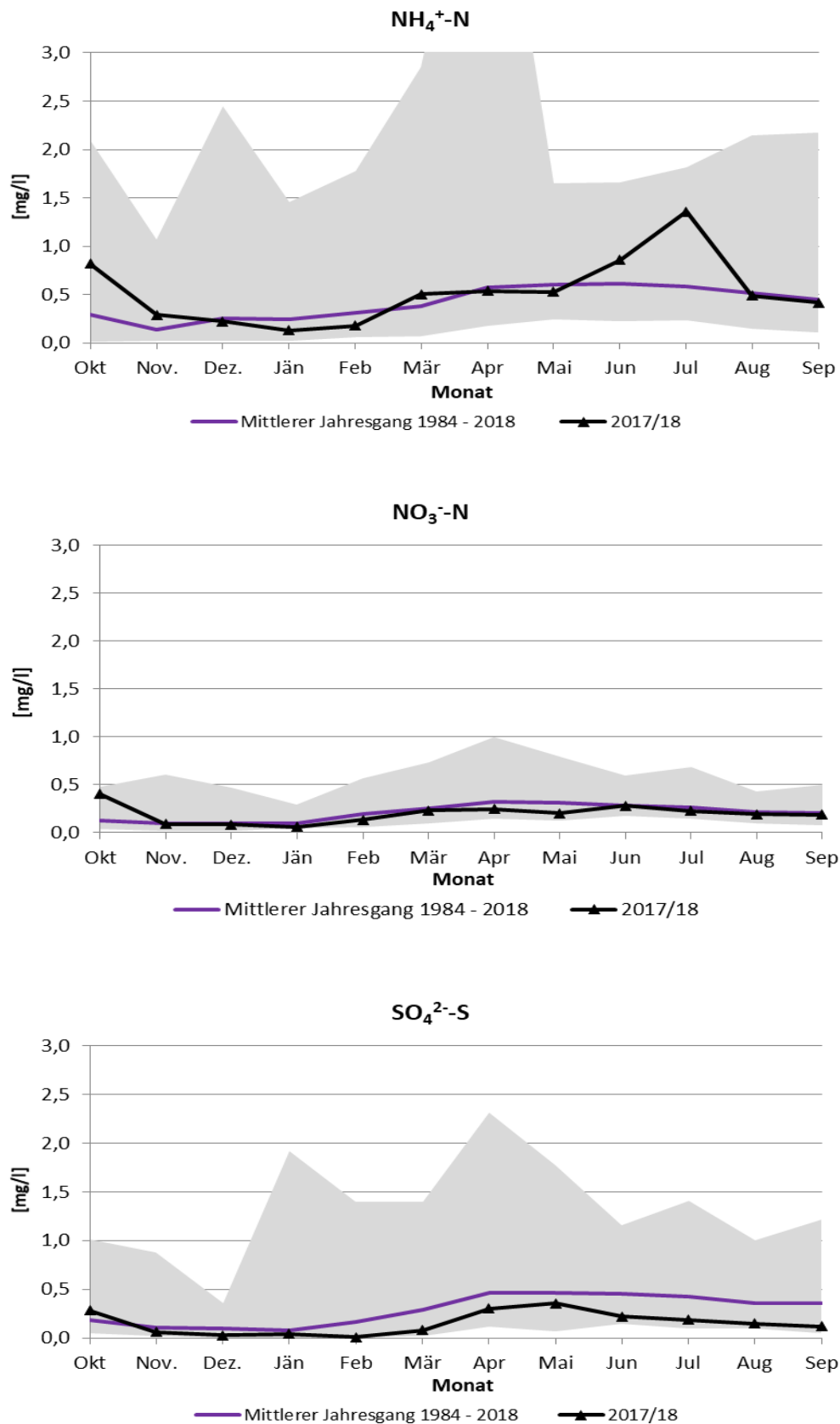


Abbildung. 12: Darstellung der mittleren monatlichen **Konzentrationen** in der Untersuchungsperiode 2017/18 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messstelle in **Innervillgraten**. Die grau hinterlegte Fläche stellt den Bereich zwischen den bisher aufgetretenen Minima und Maxima der Monatswerte dar.

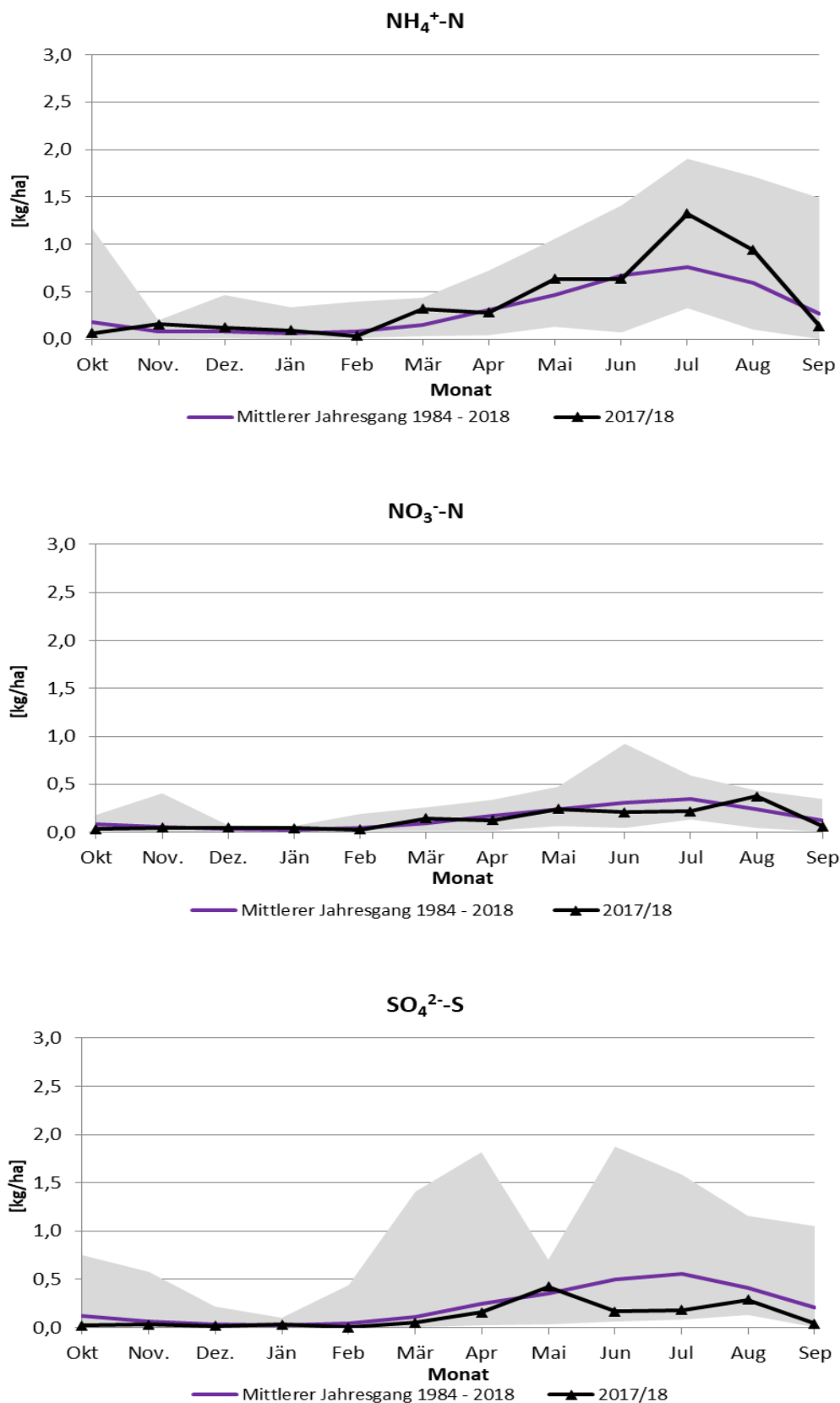


Abbildung 13: Darstellung der mittleren monatlichen **Einträge** in der Untersuchungsperiode 2017/18 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messstelle in **Innervillgraten**. Die grau hinterlegte Fläche stellt den Bereich zwischen den bisher aufgetretenen Minima und Maxima der Monatseinträge dar.

Im aktuellen Beobachtungszeitraum 2017/18 lagen die Konzentrations- und Depositionswerte für Sulfat in nahezu allen Monaten unter dem langjährigen Trend. Ausnahmen traten in Höfen und Innervillgraten auf. So lagen in Höfen die mittleren Konzentrationswerte für Sulfat im November und Dezember im Bereich oder leicht über den jeweiligen langjährigen Mitteln. In beiden Monaten wurden vereinzelt hohe Konzentrationswerte gemessen. Aufgrund von, verglichen mit den Vorjahren, überdurchschnittlich hohen Niederschlagsmengen waren im November und Dezember auch die Depositionswerte für Sulfat über den langjährigen Mitteln. In Innervillgraten überstieg die mittlere monatliche Sulfatkonzentration im Oktober das langjährige Mittel. Dies ist auf wenige Ereignisse mit geringen Niederschlagsmengen, aber hohen Konzentrationswerten zurückzuführen. Aufgrunddessen war zwar die mittlere monatliche Konzentration erhöht, der mittlere Sulfat-Schwefeleintrag im Oktober in Innervillgraten allerdings unter dem langjährigen Mittel. Betrachtet man den mittleren und den aktuellen Jahresgang im Vergleich zu den bisher bestimmten Maximalwerten, so fallen an dieser Station die hohen Werte der Sulfat-Schwefeleinträge in den Monaten März, April und Juni auf. Diese Monatsmittel sind auf die Ergebnisse in den Anfangsjahren (1985/86) zurückzuführen und wurden später nie mehr erreicht.

Die Konzentrationswerte von Ammonium und Nitrat folgten an allen drei Tiroler Stationen weitestgehend dem langjährigen Trend, wobei die aktuellen Jahresgänge natürlich stärkere Schwankungen zeigen als das langjährige Mittel. Das zeigt sich in Nordtirol speziell in den Frühlings- und Sommermonaten und kann durch lokale (z.B. landwirtschaftliche Aktivität), aber auch meteorologische Gegebenheiten (z.B. die Niederschlagsmenge) beeinflusst sein. Beispielhaft ist hier der Monat März zu nennen. Sowohl in Höfen als auch in Niederndorferberg waren die Konzentrationswerte von Ammonium und Nitrat über dem jeweiligen langjährigen Mittel. Aufgrund der geringen Niederschlagsmengen führten die erhöhten Konzentrationswerte in Nordtirol im März aber zu Stickstoffeinträgen unter dem langjährigen Mittel. An der inneralpinen Station Innervillgraten zeigte sich im März ein anderes Bild. Während die Konzentrationswerte von Ammonium-Stickstoff und Nitrat-Stickstoff im Bereich oder unter dem langjährigen Trend lagen, waren die Depositionswerte von Ammonium- und Nitrat-Stickstoff in Innervillgraten aufgrund der höheren Niederschlagsmenge über dem langjährigen Mittel. An dieser Station wurden außerdem, ähnlich zu Sulfat-Schwefel, im Oktober Ammonium- und Nitrat-Stickstoffkonzentrationswerte über dem langjährigen Mittel gefunden. Bei der Deposition relativiert sich dieses Phänomen, ähnlich wie bei Sulfat-Schwefel aufgrund der geringen Niederschlagsmenge.

Zusätzlich neben den drei genannten Komponenten zeigten die basischen Kationen einige Besonderheiten. Im April des Untersuchungsjahres wurde an allen Stationen eine mittlere Calciumkonzentration über dem langjährigen Mittel gemessen. Außerdem waren im April an den Stationen Höfen und Niederndorferberg auch die Magnesium- und die Kaliumkonzentrationen erhöht. Ein Abgleich mit Messungen am Sonnblick Observatorium zeigt, dass die erhöhten Calciumkonzentrationen im April mit dem Ferntransport von Mineralstaub aus Wüstengegenden in Einklang gebracht werden können. In Höfen wurde außerdem im Dezember und weniger deutlich im November Calciumkonzentrationen über den langjährigen Mitteln verzeichnet. Hier gibt es nach derzeitigem Informationsstand keine Beeinflussung durch Wüstensand, es sind lokale Effekte zu vermuten. In der Deposition der basischen Kationen relativiert sich dieser Effekt für die Monate März und April aufgrund der geringen Niederschlagsmenge.

Der pH-Wert lag an allen Stationen ganzjährig über dem langjährigen Trend, wobei im April an allen Stationen der jeweils höchste mittlere pH-Wert bisher verzeichnet werden konnte.

3.3. Entwicklung der jährlichen Konzentrations- und Depositionswerte seit Beginn der Messungen

Zur Ermittlung zeitlicher Trends werden in den Abbildungen 14 bis 17 die jährlichen Niederschlagsmengen, die Jahresmittel des pH-Werts und der Ionenkonzentrationen sowie die Jahreseinträge der Schwefel- und Stickstoffkomponenten im zeitlichen Verlauf dargestellt. Über „Kendalls Tau“ wird statistisch geprüft, ob eine signifikante Veränderung der Konzentrations- oder der Depositionswerte vorliegt (Signifikanzniveau $p=0,05$). Für die Parameter, die eine signifikante Veränderung zeigen, wird die absolute Änderung der Konzentrations- oder Depositionswerte über den gesamten Beobachtungszeitraum berechnet. Dies erfolgt über die Theil Sen's Regression. Auf signifikante Änderungen wird im Text verwiesen.

3.3.1. Entwicklung der Niederschlagsmengen

In Höfen und Niederndorferberg wurden stets höhere Niederschlagsmengen verzeichnet als am inneralpinen Standort in Innervillgraten (Abb. 14). Von Jahr zu Jahr treten teilweise deutliche Unterschiede in den Niederschlagsmengen auf. So liegen in Niederndorferberg und Höfen die Niederschlagsmengen nur selten unter 1200 mm. In Innervillgraten hingegen wurde bisher nur während zwei Saisons eine Niederschlagsmenge von mehr als 1000 mm verzeichnet. In der aktuellen Untersuchungsperiode unterschieden sich die Niederschlagsmengen in Höfen und Niederndorferberg mit 1142 mm und 1138 mm kaum, während in Innervillgraten lediglich 844 mm erfasst wurden.

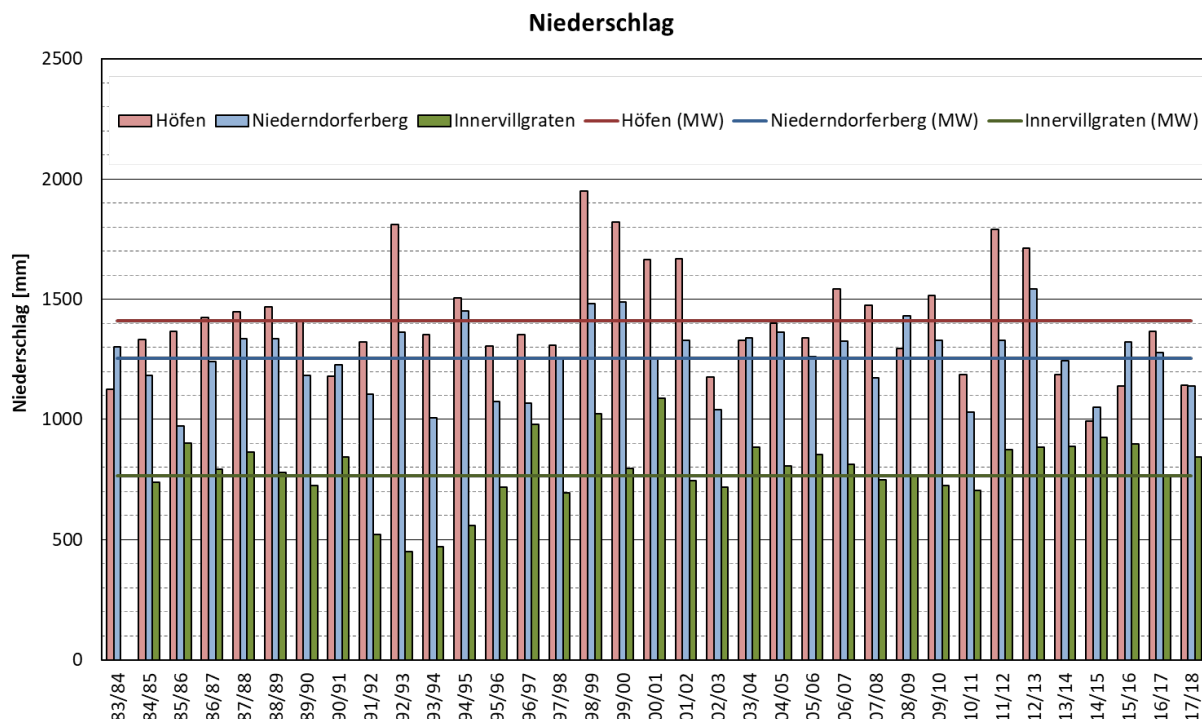


Abbildung 14: Darstellung der jährlichen Niederschlagsmengen seit Beginn der Messungen. Die Linien zeigen die durchschnittlichen Regenmengen erfasst durch das WADOS-Messgerät an den jeweiligen Messstellen seit Beginn der Messungen.

3.3.2. Entwicklung der pH-Werte der Regenwässer an den Messstellen

Seit den 1980er-Jahren ist eine signifikante Zunahme des pH-Wertes zu erkennen. Wurden in der Periode 1983/84 mittlere pH-Werte von rund 4,5 bestimmt, so waren es nun mittlere pH-Werte von 5,6-5,9 (Abb. 15). Diese Werte liegen nun in einem Bereich, der hinsichtlich der Azidität dem wenig bis unbelasteten Regen entspricht. Dies bringt die abnehmende Schadstoffbelastung der Luft, speziell mit Sulfat, zum Ausdruck (siehe folgender Abschnitt).

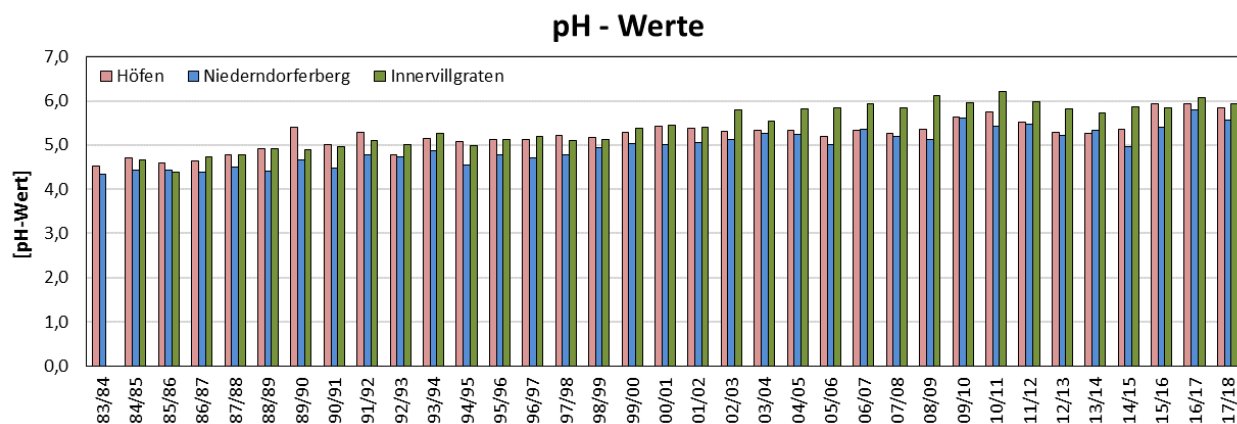


Abbildung 15: Jahresmittelwerte der pH-Werte seit Beginn der Messungen an den drei Tiroler Messstellen.

3.3.3. Entwicklung der Sulfatkonzentrationen und Sulfatdepositionen

Der zeitliche Verlauf zeigt an allen Messstellen fallende Konzentrationswerte für Sulfat, auch wenn in einzelnen Jahren wieder eine vorübergehende Zunahme zu erkennen war (Abb.16). In den letzten Jahren sind, bei allgemein geringen Konzentrationswerten, die Unterschiede zwischen den drei Tiroler Messstellen deutlich geringer als zu Beginn der Messungen.

Auch die heutigen Depositionswerte für Sulfat-Schwefel sind im Vergleich zu den Messungen der 80er-Jahre an allen Stationen deutlich geringer (Abb. 17). Ab der Untersuchungsperiode 2009/10 wurde keine Überschreitung der kritischen Belastungsgrenze von Ökosystemen (entspricht mehr als 3 kg Schwefeleintrag pro Hektar und Jahr gemäß „Critical load“-Konzept, WHO 1995) mehr festgestellt.

SO₄²⁻-S-Konzentrationen

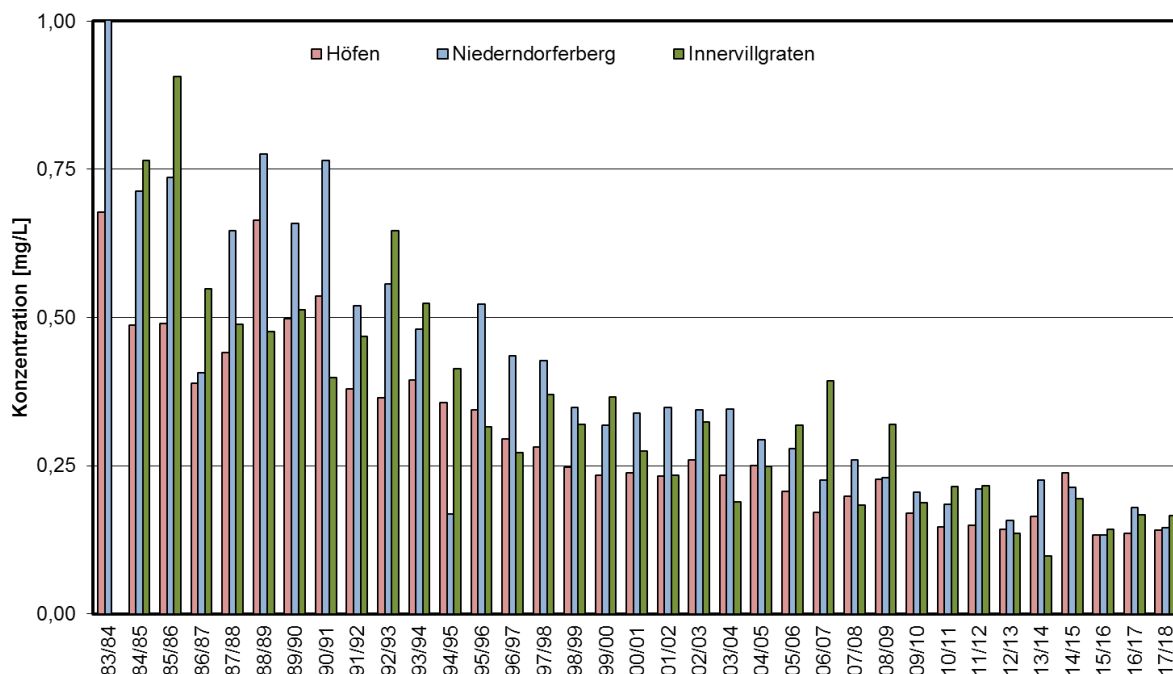


Abbildung 16: Jahresmittelwerte der Konzentration an Sulfat-Schwefel seit Beginn der Messungen.

SO₄²⁻-S-Depositionen

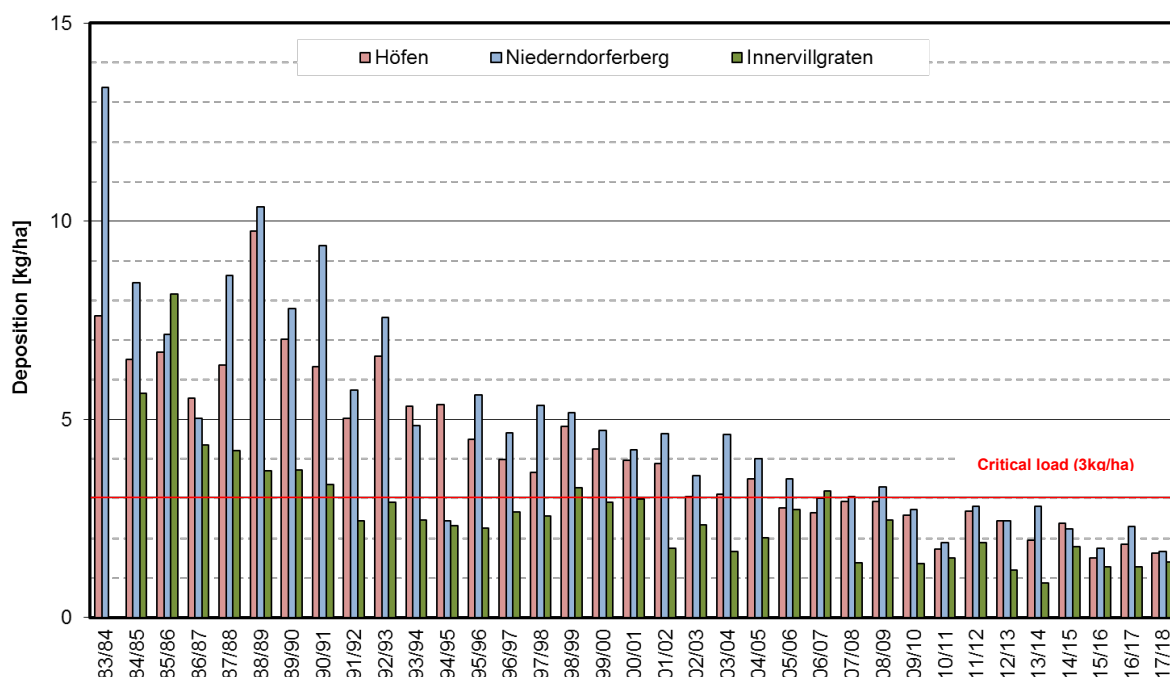


Abbildung 17: Einträge an Sulfat-Schwefel seit Beginn der Messungen an den drei Tiroler Messstellen.

Die Abnahmen der Konzentrations- und Depositionswerte für Sulfat-S sind an allen Messstellen signifikant ($p < 0,05$; Abb. 18). Über den gesamten Untersuchungszeitraum liegt die Abnahme der Konzentrationswerte zwischen 0.4 und 0.6 mg/l, was zu einer Verringerung der jährlichen Depositionswerte um 3 bis 7 kg/ha führte. An der am deutlichsten belasteten Station (Niederndorferberg) nahm der Schwefeleintrag am stärksten ab. Der Rückgang der Konzentrationswerte von Sulfat-S ermöglichte eine Erhöhung der pH-Werte in den Niederschlagsproben (vgl. 4.3.2).

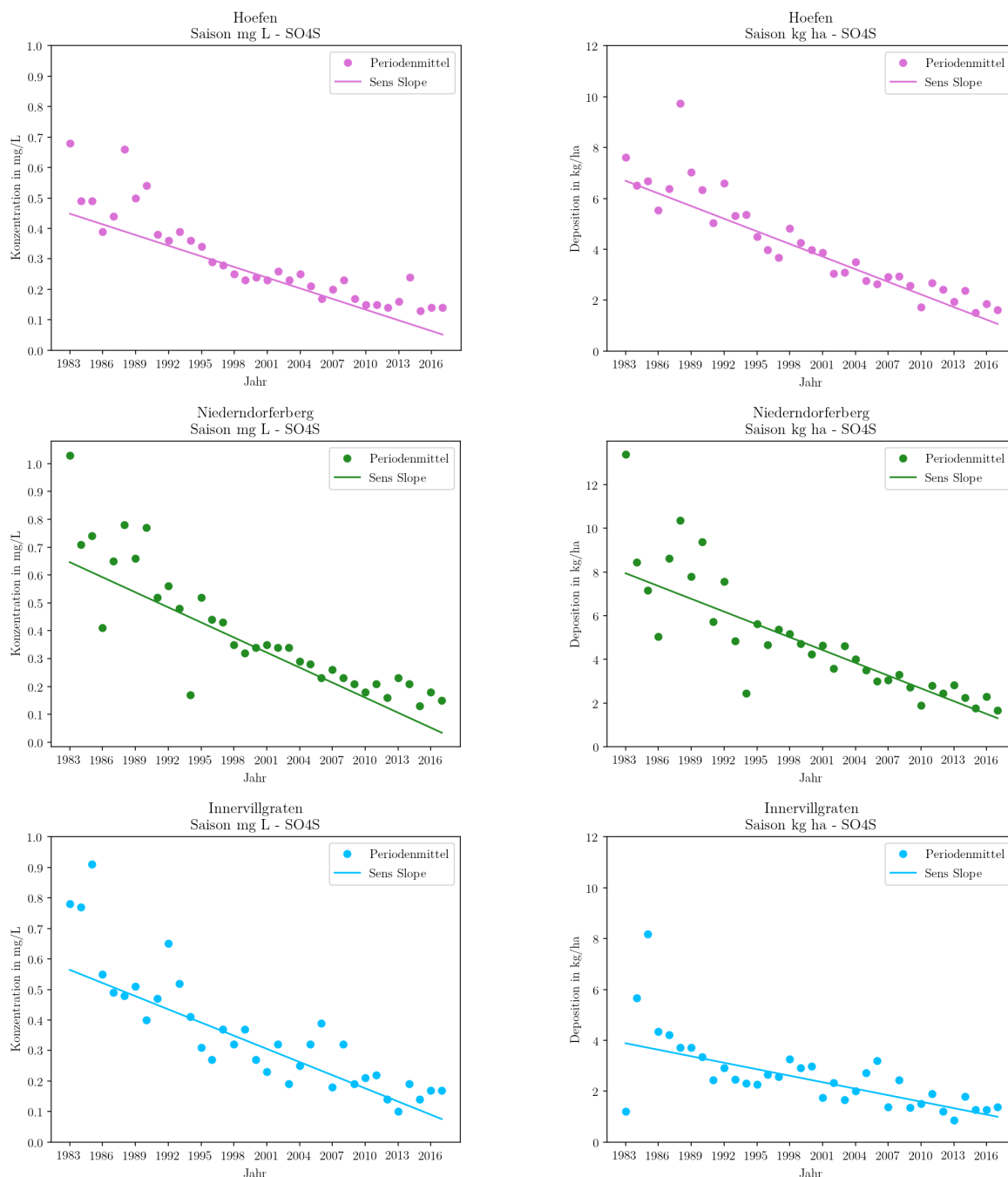


Abbildung 18: Trendverläufe für die Konzentration und Deposition von Sulfat-S seit dem Beginn der Untersuchungen.

3.3.4. Entwicklung der Ammoniumkonzentration und der Ammoniumdeposition

In der aktuellen Untersuchungsperiode wurde der höchste Jahresmittelwert der Ammoniumkonzentration in Innervillgraten und der geringste in Höfen bestimmt (Abb. 19). Die Konzentrationsunterschiede zwischen den Messstellen sind im Vergleich zum Vorjahr wieder kleiner geworden. Generell zeigen die Werte von Jahr zu Jahr deutliche Unterschiede. Dies gilt speziell für die Station Innervillgraten.

Der Ammoniumeintrag zeigt geringere Unterschiede als der Verlauf der Konzentrationswerte. In der aktuellen Untersuchungsperiode ist die Deposition in Niederndorferberg noch etwas höher als in Innervillgraten. In Höfen ist der Eintrag am geringsten (Abb. 20).

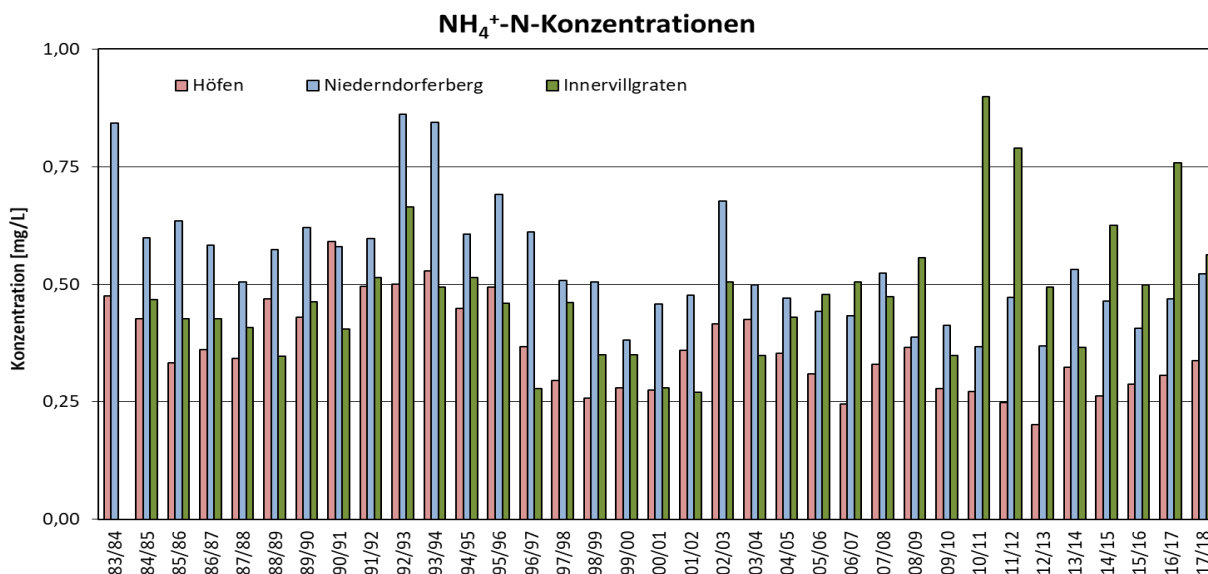


Abbildung 19: Jahresmittelwerte der Konzentration an Ammonium-Stickstoff seit Beginn der Messungen.

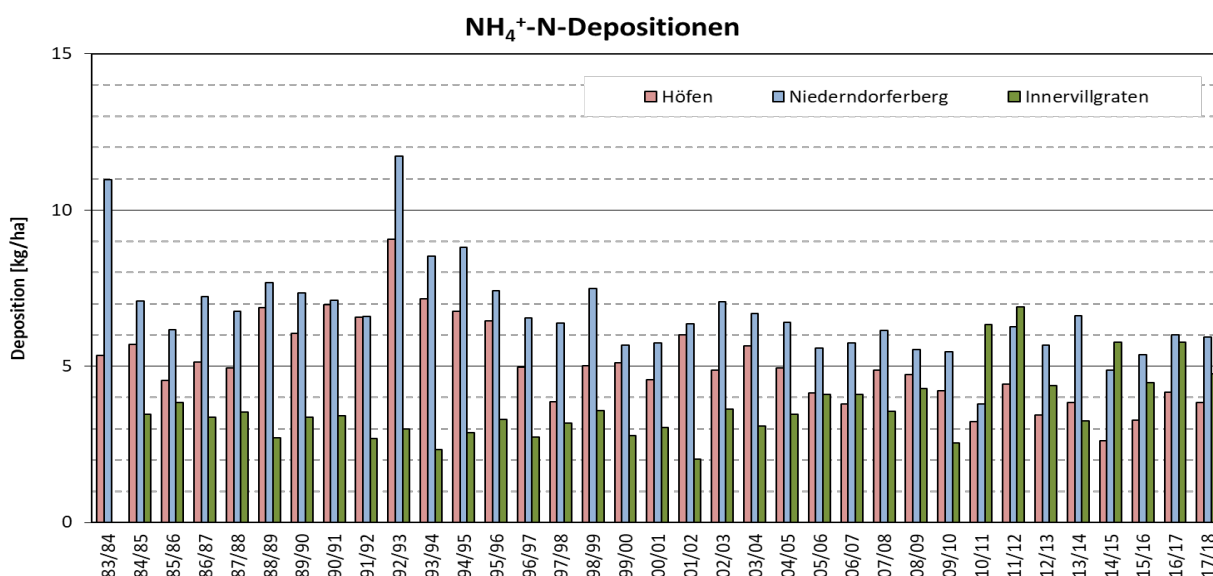


Abbildung 20: Einträge an Ammonium-Stickstoff seit Beginn der Messungen.

Seit Beginn der Untersuchungen sind für Höfen und Niederndorferberg signifikant fallende Trends sowohl für die Konzentrations- als auch für die Depositionswerte von Ammonium feststellbar (Abb. 21). Über den gesamten Untersuchungszeitraum lagen die Abnahmen der Konzentrationswerte bei 0,2 mg/l (Höfen) beziehungsweise 0,3 mg/l (Niederndorferberg). Die Abnahmen der jährlichen Depositionswerte für NH_4^+ -N lagen bei 3,0 kg/ha (Höfen) und 2,4 kg/ha (Niederndorferberg). Für Innervillgraten ist kein statistisch signifikanter Trend der Konzentrationswerte zu erkennen, weshalb die Daten hier nicht dargestellt werden. Die jährlichen Depositionsmengen in Innervillgraten zeigen eine signifikante Zunahme, die im gesamten Beobachtungszeitraum knapp über 2 kg NH_4^+ -N /ha beträgt. Diese Änderung ist offensichtlich auf eine geänderte landwirtschaftliche Nutzung der unmittelbaren Umgebung der Station zurückzuführen und setzt den Trend der letzten Jahre fort.

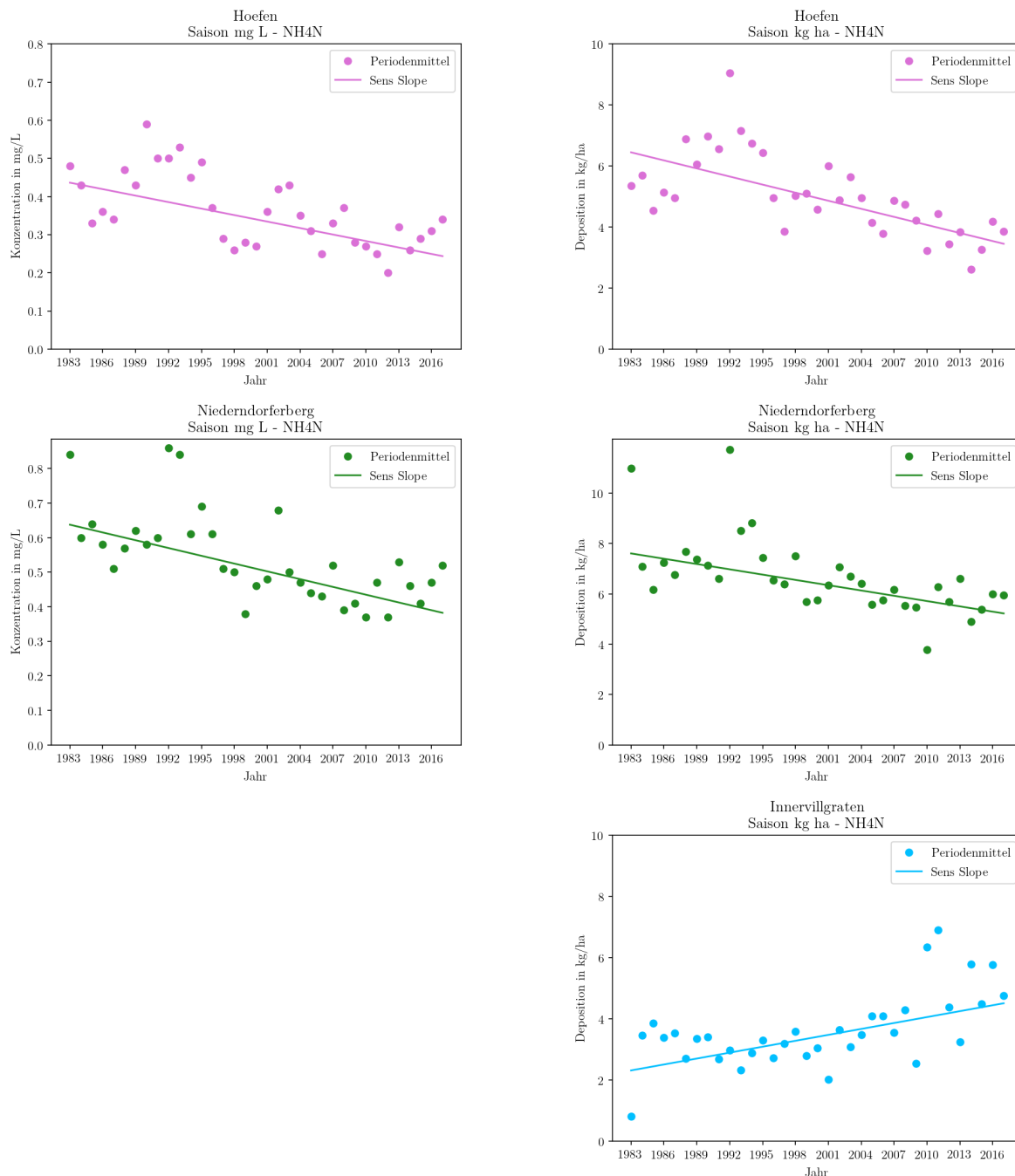


Abbildung 21: Trendverläufe für die Konzentration und Deposition von Ammonium-N seit dem Beginn der Untersuchungen.

3.3.5. Entwicklung der Nitratkonzentration und Nitratdeposition

Bezüglich der Konzentrationswerte werden in Niederndorferberg immer die höchsten, in Innervillgraten zumeist die geringsten Jahresmittelwerte für Nitrat-N bestimmt (Abb. 22). Die Konzentrationswerte sind jenen zum Vorjahr sehr ähnlich. Vergleicht man die zeitliche Abfolge der einzelnen Periodenmittel, so treten deutlich geringere Schwankungen auf als bei Ammonium-N. In Innervillgraten werden immer die geringsten Einträge an Nitrat-Stickstoff bestimmt (Abb. 23). In Höfen ist der Nitrat-N Eintrag im Vergleich zum Vorjahr wieder leicht gefallen.

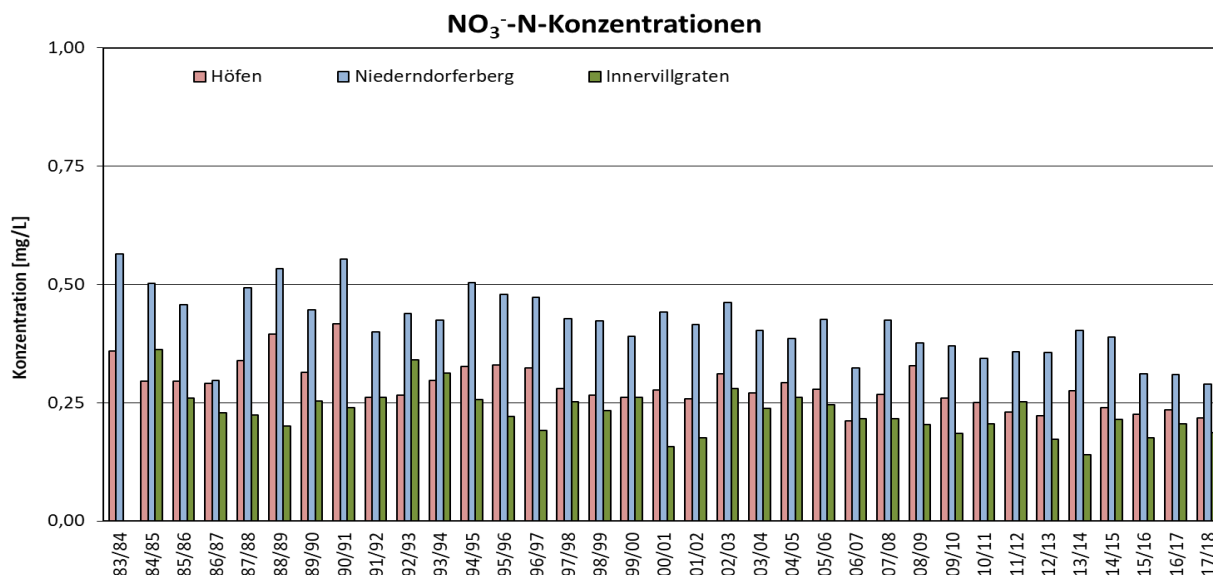


Abbildung 22: Jahresmittelwerte der Konzentration an Nitrat-Stickstoff seit Beginn der Messungen.

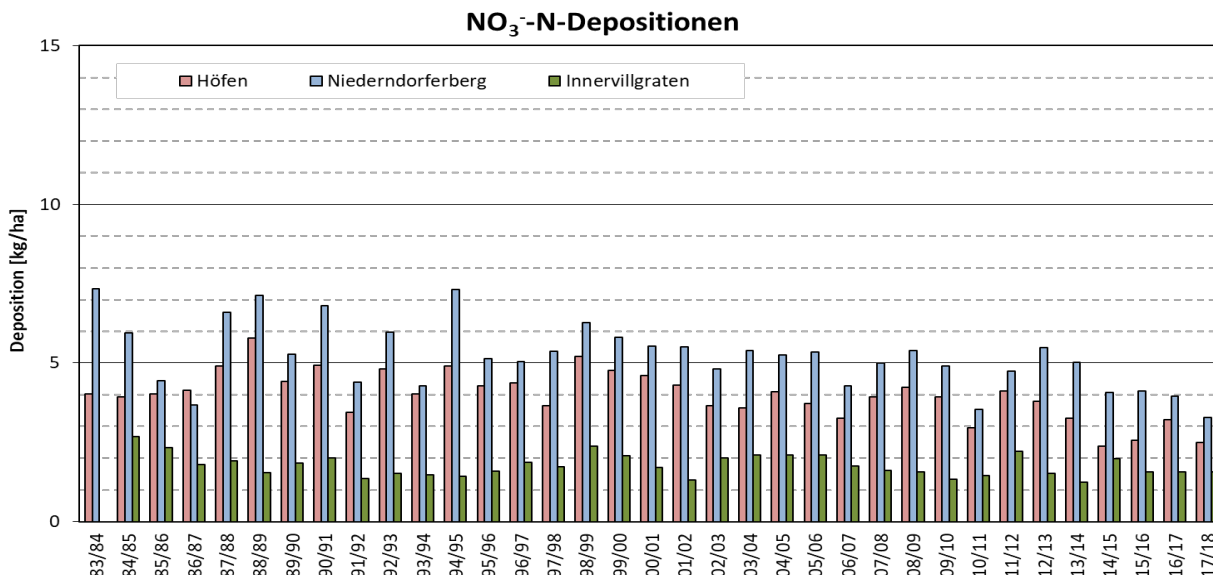


Abbildung 23: Einträge an Nitrat-Stickstoff seit Beginn der Messungen.

Für die Konzentrationswerte von Nitrat-N konnte für alle Messstellen in Tirol ein signifikant fallender Trend bestimmt werden (Abb. 24). Die Abnahmen über den gesamten Messzeitraum lagen in Höfen und Innervillgraten bei 0,1 mg/l und in Niederndorferberg bei 0,2 mg/l. Für die Deposition konnte nur für Höfen und Niederndorferberg ein signifikant fallender Trend festgestellt werden. Hier beträgt, wenn der gesamte Untersuchungszeitraum betrachtet wird, die Abnahme der jährlich deponierten Stoffmengen 1,6 kh/ha in Höfen und 2,2 kh/ha in Höfen. In Innervillgraten wurde die die jährlichen Depositionsmengen kein signifikanter Trend festgestellt.

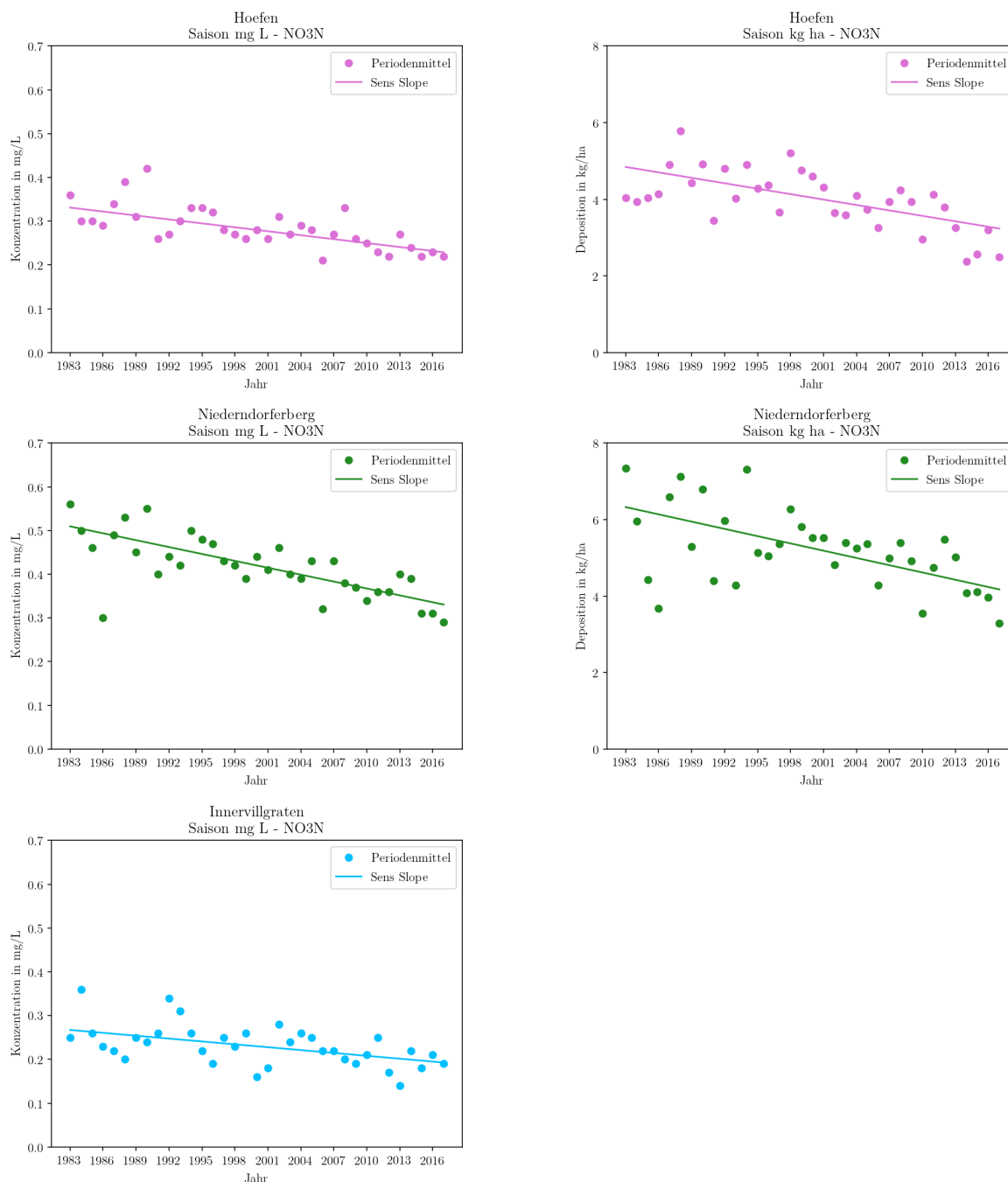


Abbildung 24: Trendverläufe für die Konzentration und Deposition von Nitrat-N seit dem Beginn der Untersuchungen.

3.3.6. Entwicklung der Gesamtstickstoff-Konzentration und des Gesamtstickstoffeintrags

Die Gesamtstickstoff-Konzentration ist die Summe aus den Ammonium- und Nitrat-Konzentrationen und wurde, besonders in den letzten Jahren, von der Ammoniumkonzentration stärker beeinflusst. Die Konzentrationen in Innervillgraten unterlagen in den letzten Jahren starken Schwankungen (Abb. 25). Die höchsten Gesamtstickstoff-Einträge durch die nasse Deposition in Tirol werden auch in diesem Jahr in Niederndorferberg bestimmt (Abb. 26 und Tabelle 11). In der aktuellen Saison liegt der Gesamtstickstoffeintrag durch die nasse Deposition zwischen 6 und 9 kg/ha und Jahr.

Der Gesamtstickstoffeintrag (N_{gesamt}) stellt eine aus ökologischer Sicht wichtige Kenngröße dar. In der Literatur sind Richtwerte für kritische Gesamtstickstoffeinträge (Critical Loads) in empfindliche Ökosysteme definiert (WHO 1995, Nagel und Gregor 1999). Stickstoffeinträge über 10 kg/ha/Jahr werden gemäß dem Critical Load-Konzept als deutliche Belastung eingestuft, die zu negativen Veränderungen in nährstoffarmen Ökosystemen führen.

Zur Beschreibung der Gesamtdeposition in ein Ökosystem sind neben der nassen Deposition (Eintrag durch Regen und Schnee) auch die Eintragswege über die trockene Deposition (direkter Eintrag reaktiver Gase bzw. Partikel) und über die okkulte Deposition (Interzeption von Nebelwasser) zu berücksichtigen. Der gesamte Eintrag an eutrophierendem (reaktiven) Stickstoff kann daher wesentlich höher sein als hier gemessen. In der Vergangenheit wurden umfassende Untersuchungen zur Darstellung der relativen Beiträge aus nasser, trockener und okkultur Deposition in Tirol durchgeführt (z.B. Kalina et al. 2002), die diese Tatsache unterstreichen. Besondere Beachtung verdient der Nordalpenraum, wo erhöhte N-Einträge besonders Nährstoffungleichgewichte und die Destabilisierung von Waldökosystemen fördern. Im Grünland sind derartige Nährstoffungleichgewichte aufgrund der schnelleren Anpassung der Vegetation (insbesondere bei Gräsern) von geringerer Bedeutung, jedoch aber für die Vegetation in nährstoffarmen Feuchtflächen oder Trockenrasen.

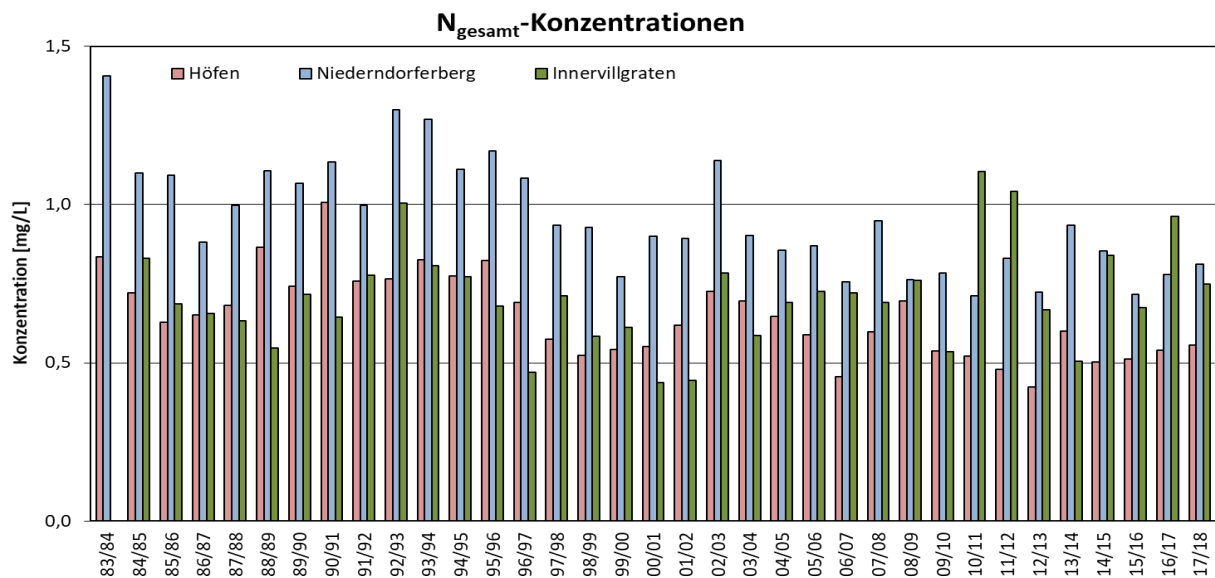


Abbildung 25: Jahresmittelwerte der Konzentration an Gesamtstickstoff seit Beginn der Messungen.

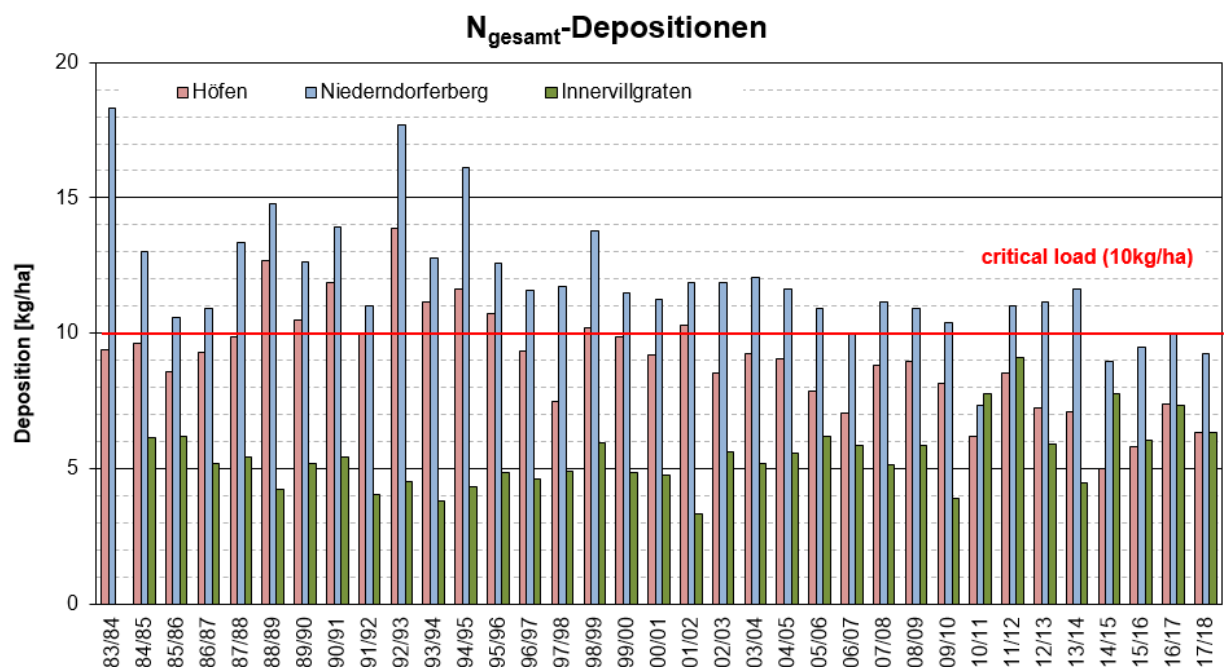


Abbildung 26: Eintrag an Gesamtstickstoff seit Beginn der Messungen.

Für Gesamtstickstoff werden für die Depositionswerte signifikante Trends festgestellt. In diesem Jahr gilt dies für alle Messstationen. Über den gesamten Beobachtungszeitraum von 1983 bis 2018 wird für Höfen und Niederndorferberg eine theoretische jährliche Abnahme der Depositionsmengen von 4.9 kg/ha bzw 4.3 kg/ha berechnet. In Innervillgraten ergibt die Berechnung eine theoretische Zunahme der Gesamtstickstoffdeposition um 2 kg/ha pro Jahr im Untersuchungsraum 1983 bis 2018 (Abb. 27). Hier ist allerdings die starke Streuung der jährlichen Depositionsmengen zu beachten. Im vergangenen Jahr wurde das Signifikanzniveau noch nicht erreicht.

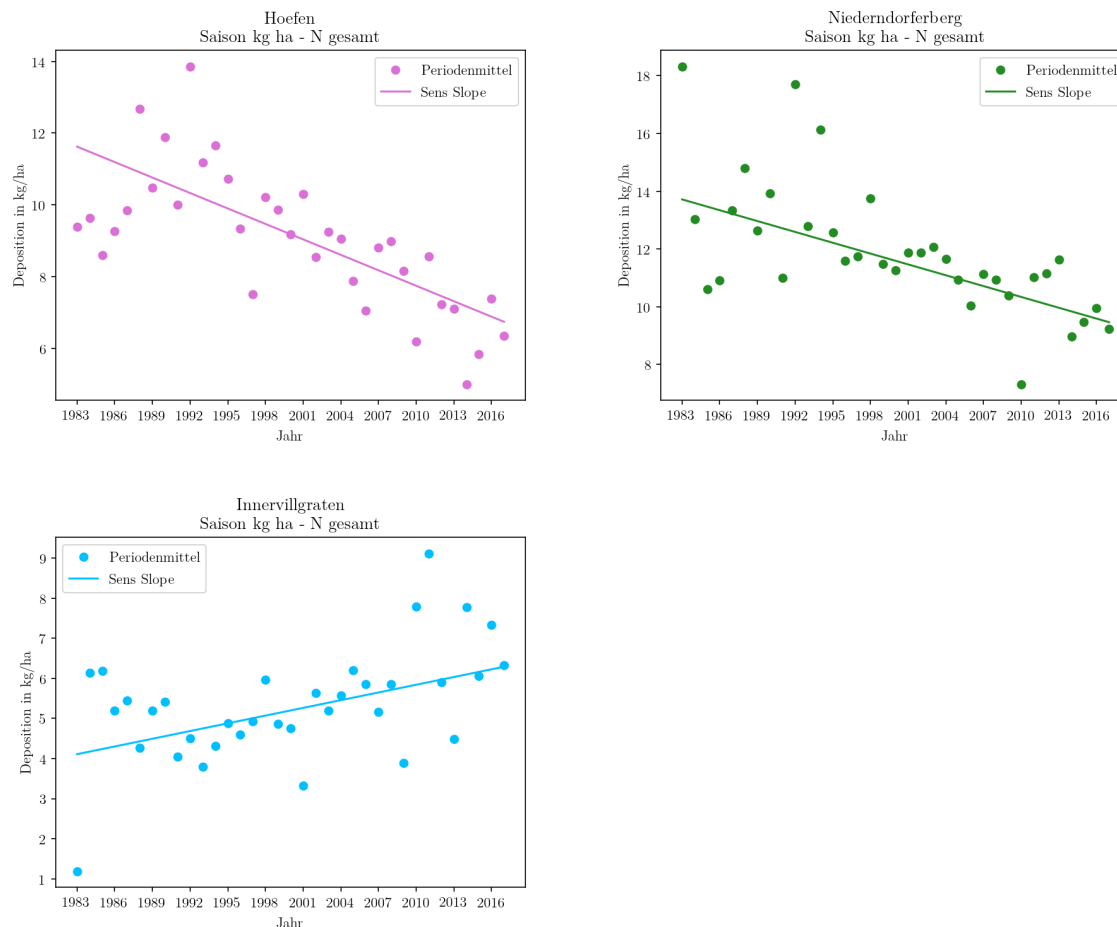


Abbildung 27: Trendverläufe für die nasse Deposition von Gesamt-N seit Beginn der Messungen.

Tabelle 11: Stickstoffeinträge durch nasse Deposition ($\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$) an den Stationen im Untersuchungsgebiet zusammen mit Critical Loads für den Gesamtstickstoffeintrag (N_{gesamt}).

Untersuchungs- periode	Stickstoffeintrag [kg/ha.a] (nasse Deposition von $\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$)		
	Höfen	Niederndorferberg	Innervillgraten
1983/84	9,0	17,3	
1984/85	9,6	13,0	6,1
1985/86	8,6	10,6	6,2
1986/87	9,3	10,9	5,2
1887/88	9,9	13,3	5,5
1988/89	12,7	14,8	4,3
1989/90	10,5	12,6	5,2
1990/91	11,9	13,9	5,4
1991/92	10,0	11,0	4,0
1992/93	13,9	15,6	4,5
1993/94	11,2	12,8	3,8
1994/95	11,7	16,1	4,3
1995/96	10,7	12,6	4,7
1996/97	9,3	11,6	4,6
1997/98	7,5	11,8	4,9
1998/99	10,2	13,8	6,0
1999/00	9,9	11,5	4,9
2000/01	9,2	11,3	4,7
2001/02	10,3	11,9	3,3
2002/03	8,5	11,9	5,6
2003/04	9,2	12,1	5,2
2004/05	9,2	11,8	5,6
2005/06	7,9	10,9	6,2
2006/07	7,1	10,0	5,9
2007/08	8,8	11,1	5,2
2008/09	9,0	10,9	5,9
2009/10	8,1	10,4	3,9
2010/11	6,1	7,3	7,8
2011/12	8,6	11,0	9,1
2012/13	7,2	11,2	5,9
2013/14	(7,1)*	11,6	4,5
2014/15	5,0	9,0	7,8
2015/16	5,8	9,5	6,1
2016/17	7,4	10,0	7,3
2017/18	6,3	9,2	6,3
Critical Loads für N_{gesamt}	10 kg/ha.a (WHO 1995)		

* Die Werte in Klammern stammen von unvollständigen Untersuchungsperioden und sind als unterer Schätzwert anzusehen.

3.4. Vergleich der Tiroler Messstellen mit Ergebnissen aus den anderen Bundesländern

In der Folge werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur nassen Deposition in Tirol mit den Ergebnissen aus den Bundesländern Steiermark, Niederösterreich und Salzburg verglichen. Dies erfolgt auf Basis der für den Untersuchungszeitraum Oktober 2017 bis September 2018 berechneten Jahresmittelwerte der Ionenkonzentrationen und der Jahresdeposition für Schwefel- und Stickstoffkomponenten. In Tabelle 12 sind die Konzentrationsmittelwerte in mg/L, in Tabelle 13 die jährlichen Depositionssummen in kg/ha angegeben. Die räumliche Verteilung der mengengewichteten Jahreskonzentrationen im Niederschlag sowie der Einträge an Sulfat-Schwefel, Ammonium-Stickstoff und Nitrat-Stickstoff ist darüberhinaus in den Abbildungen 28 bis 33 dargestellt. Dabei stellen die linken Balken einen Mittelwert über die letzten 5 Saisons an diesem Messstandort dar, die rechten Balken entsprechen den Werten der Saison 2017/18. Daraus ist ersichtlich, wie sich die Konzentrationen und Depositionen im letzten Jahr entwickelt haben.

Bei der räumlichen Verteilung der Ionenkonzentrationen waren in den letzten Jahren die Konzentrationswerte für Sulfat und weniger deutlich auch für Nitrat im Osten beziehungsweise im Norden tendenziell höher als im Westen und im Süden. In diesem Jahr konnte dieser Trend nicht so deutlich dargestellt werden, da nicht alle Messpunkte betrieben wurden. Ein weiterer Unterschied besteht zwischen den Stationen im inneralpinen Raum und den Stationen nördlich und östlich der Alpen. In inneralpinen Gebieten sind die Ionenkonzentrationen eher geringer als im Alpenvorland. Die Station Innervillgraten gehört zu diesem inneralpinen Typus. Diese Gradienten wurden bei Puxbaum et al. (1991) im Vergleich mit den Stationen Höfen, Niederndorferberg und Haunsberg mit Daten aus den Jahren 1987/88 und 1988/89 aufgezeigt und können in der vorliegenden Periode auch erkannt werden. Für Ammonium treffen diese Trends nicht zu. Hier kann es, offensichtlich durch die stärkere lokale Beeinflussung, von Jahr zu Jahr zu geänderten Verteilungsmustern kommen.

Der durch Niederschläge deponierte Eintrag ist sowohl von der Konzentration an Ionen im Niederschlagswasser als auch von der Niederschlagsmenge abhängig. Da die Niederschlagsmengen am Rande der Alpen verhältnismäßig hoch sind, verändern sich die für die Konzentrationswerte erkennbaren Gradienten. Sie werden abgeschwächt oder sogar aufgehoben. Der Einfluss der Niederschlagsmenge zeigt sich beispielsweise beim Vergleich der Messstellen Innervillgraten (844 mm Niederschlag) mit den Messstellen Niederndorferberg (1138 mm Niederschlag) oder Lunz (Niederösterreich, 1134 mm Niederschlag).

Durch nasse Deposition wurden im Untersuchungsjahr 2017/18 an den Messstellen in Nordtirol 2 kg Schwefel und 6 bis 9 kg Stickstoff pro Hektar eingetragen. An der inneralpinen Messstelle Innervillgraten betrug der Eintrag 1 kg Schwefel und 6 kg Stickstoff pro Hektar. Im Vergleich dazu variieren die Einträge in den Bundesländern Steiermark, Salzburg und Niederösterreich zwischen 1 und 4 kg Schwefel pro Hektar und 3 und 8 kg Stickstoff pro Hektar. Der Eintrag von 9 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr an der Station Niederndorferberg markiert damit den höchsten Stoffeintrag.

Tabelle 12: Bundesländervergleich der am Institut für CTA der TU Wien ausgewerteten mengengewichteten Jahresmittelwerte der Konzentration an Niederschlagsinhaltsstoffen für den Zeitraum 01.10.2017 bis 30.09.2018 (in mg/L); *Durch die Außerbetriebnahme des WADOS an der Station Ostrong und Drasenhofen konnten für das Jahr 2017/18 keine Daten erhoben werden.

Station	NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻ -S
	[mm]	[-]					[mg/L]				
Tirol:											
Höfen	1142	5,8	0,001	0,10	0,34	0,07	0,57	0,12	0,14	0,22	0,14
Niederndorferberg	1138	5,6	0,003	0,15	0,52	0,10	0,18	0,03	0,14	0,29	0,15
Innervillgraten	844	5,9	0,001	0,08	0,56	0,12	0,34	0,04	0,10	0,19	0,17
Salzburg:											
Haunsberg	721	6,0	0,001	0,17	0,66	0,15	0,33	0,08	0,22	0,42	0,26
Werfenweng	618	6,0	0,001	0,13	0,27	0,84	0,56	0,22	0,24	0,27	0,15
Sonnblick	1751	5,4	0,0	0,1	0,16	0,04	0,26	0,02	0,09	0,12	0,09
Niederösterreich:											
Litschau	650	4,8	0,015	0,15	0,39	0,07	0,40	0,06	0,18	0,53	0,26
Lunz	1134	5,5	0,003	0,16	0,22	0,11	0,36	0,05	0,23	0,18	0,13
Ostrong*											
Drasenhofen											
Steiermark:											
Arnfels	993	5,4	0,004	0,11	0,47	0,08	0,51	0,06	0,14	0,28	0,37
Grundlsee	1081	5,5	0,004	0,13	0,39	0,08	0,26	0,03	0,17	0,28	0,15
Hochgößnitz	1045	5,5	0,003	0,09	0,51	0,12	0,66	0,06	0,13	0,28	0,37
Masenberg	709	5,4	0,004	0,11	0,54	0,12	0,50	0,05	0,14	0,30	0,38

Tabelle 13: Bundesländervergleich der am Institut für CTA der TU Wien ausgewerteten Jahreseinträge der Niederschlagsinhaltsstoffe (nasse Deposition) für den Zeitraum 01.10.2017 bis 30.09.2018 (in kg/ha); *Durch die Außerbetriebnahme des WADOS an der Station Ostrong und Drasenhofen konnten für das Jahr 2017/18 keine Daten erhoben werden.

Station	NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻ -S
	[mm]	[-]					[kg/ha]				
Tirol:											
Höfen	1142	5,8	0,02	1,1	3,9	0,7	6,5	1,3	1,7	2,5	1,6
Niederndorferberg	1138	5,6	0,03	1,7	5,9	1,2	2,1	0,3	1,6	3,3	1,7
Innervillgraten	844	5,9	0,01	0,7	4,8	1,0	2,9	0,3	0,8	1,6	1,4
Salzburg:											
Haunsberg	721	6,0	0,01	1,2	4,8	1,1	2,4	0,6	1,6	3,1	1,9
Werfenweng	618	6,0	0,01	0,8	1,6	5,2	3,5	1,3	1,5	1,7	0,9
Sonnblick	1751	5,4	0,07	1,5	2,8	0,6	4,6	0,3	1,6	2,1	1,6
Niederösterreich:											
Litschau	650	4,8	0,10	1,0	2,5	0,5	2,6	0,4	1,2	3,5	1,7
Lunz	1134	5,5	0,04	1,8	2,5	1,2	4,1	0,6	2,6	2,0	1,4
Ostrong*											
Drasenhofen											
Steiermark:											
Arnfels	993	5,4	0,04	1,0	4,7	0,8	5,0	0,6	1,4	2,8	3,6
Grundlsee	1081	5,5	0,04	1,4	4,2	0,9	2,8	0,4	1,8	3,1	1,7
Hochgölnitz	1045	5,5	0,03	1,0	5,3	1,2	6,9	0,6	1,4	3,0	3,9
Masenbergr	709	5,4	0,029	0,7	3,9	0,9	3,5	0,4	1,0	2,2	2,7

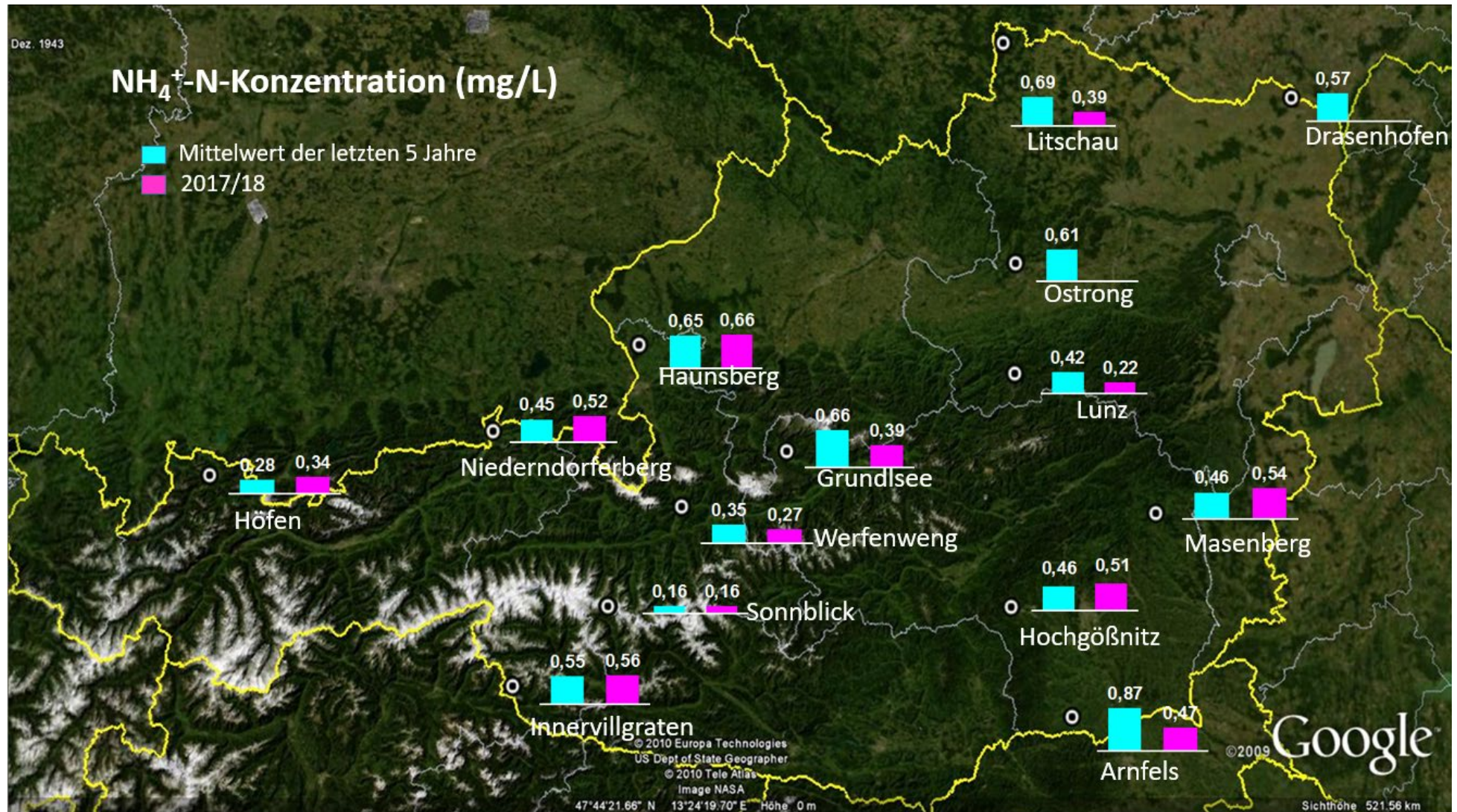


Abbildung 28: Räumliche Verteilung der mengengewichteten NH_4^+ -N Jahreskonzentrationen für den Zeitraum Oktober 2017 bis September 2018 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahre. *Durch die Außerbetriebnahme des WADOS an der Station Ostrong und Drasenhofen konnten für das Jahr 2017/18 keine Daten erhoben werden.

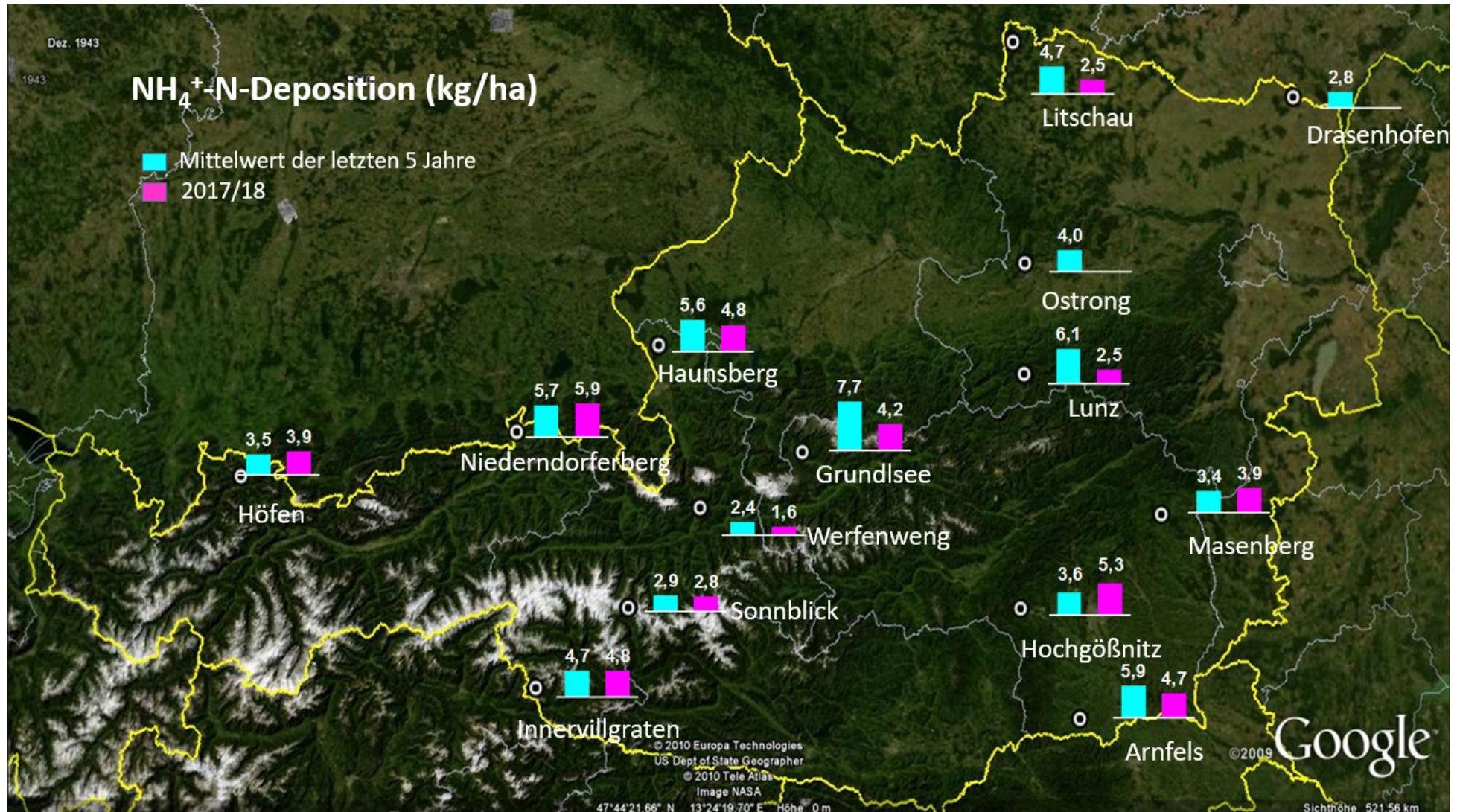


Abbildung 29: Räumliche Verteilung der NH₄⁺-N Jahreseinträge für den Zeitraum Oktober 2017 bis September 2018 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahre. *Durch die Außerbetriebnahme des WADOS an der Station Ostrong und Drasenhofen konnten für das Jahr 2017/18 keine Daten erhoben werden.

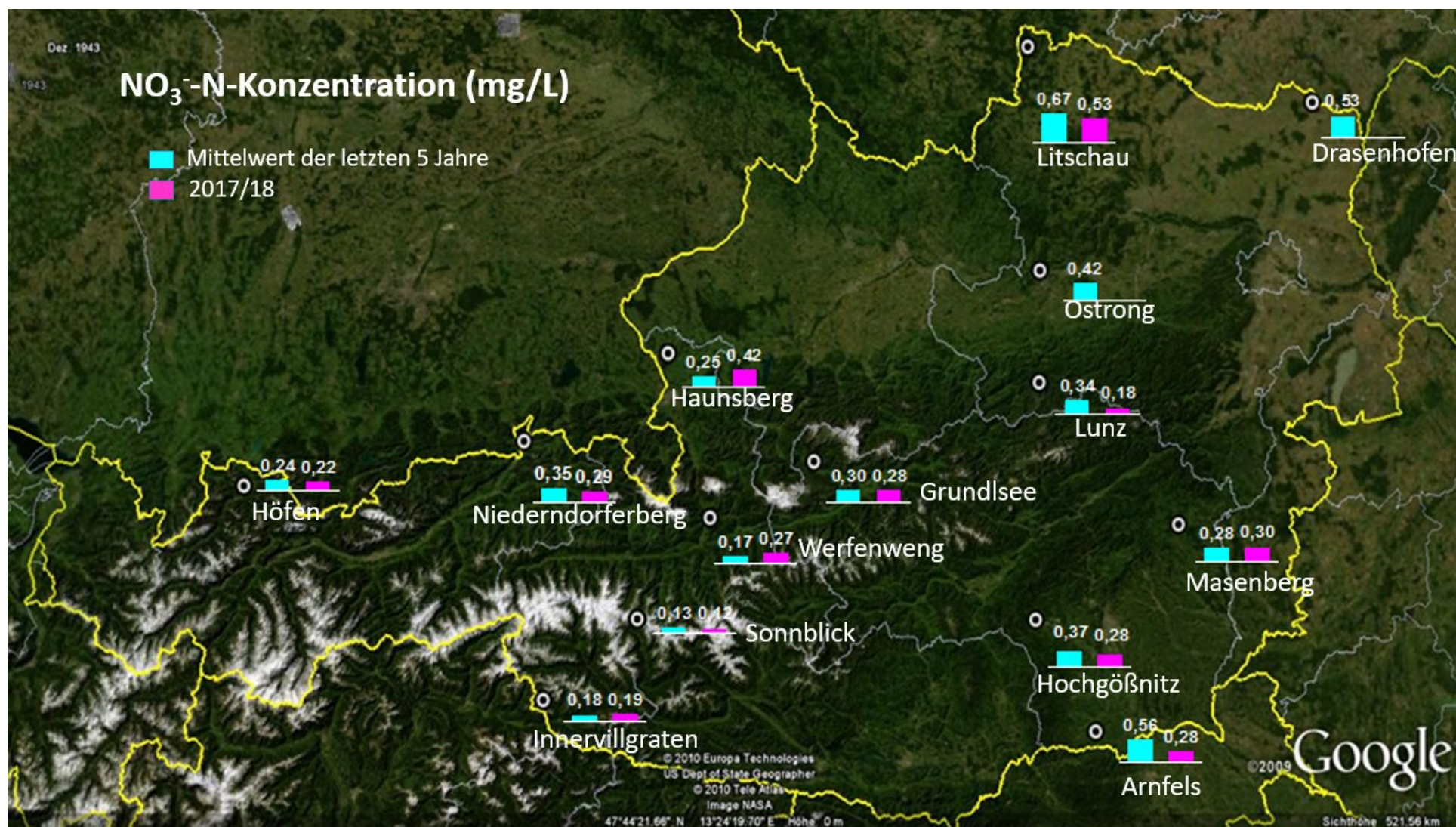


Abbildung 30: Räumliche Verteilung der mengengewichteten NO₃-N Jahreskonzentrationen im Niederschlag für den Zeitraum Oktober 2017 bis September 2018 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahre. *Durch die Außerbetriebnahme des WADOS an der Station Ostrong und Drasenhofen konnten für das Jahr 2017/18 keine Daten erhoben werden.

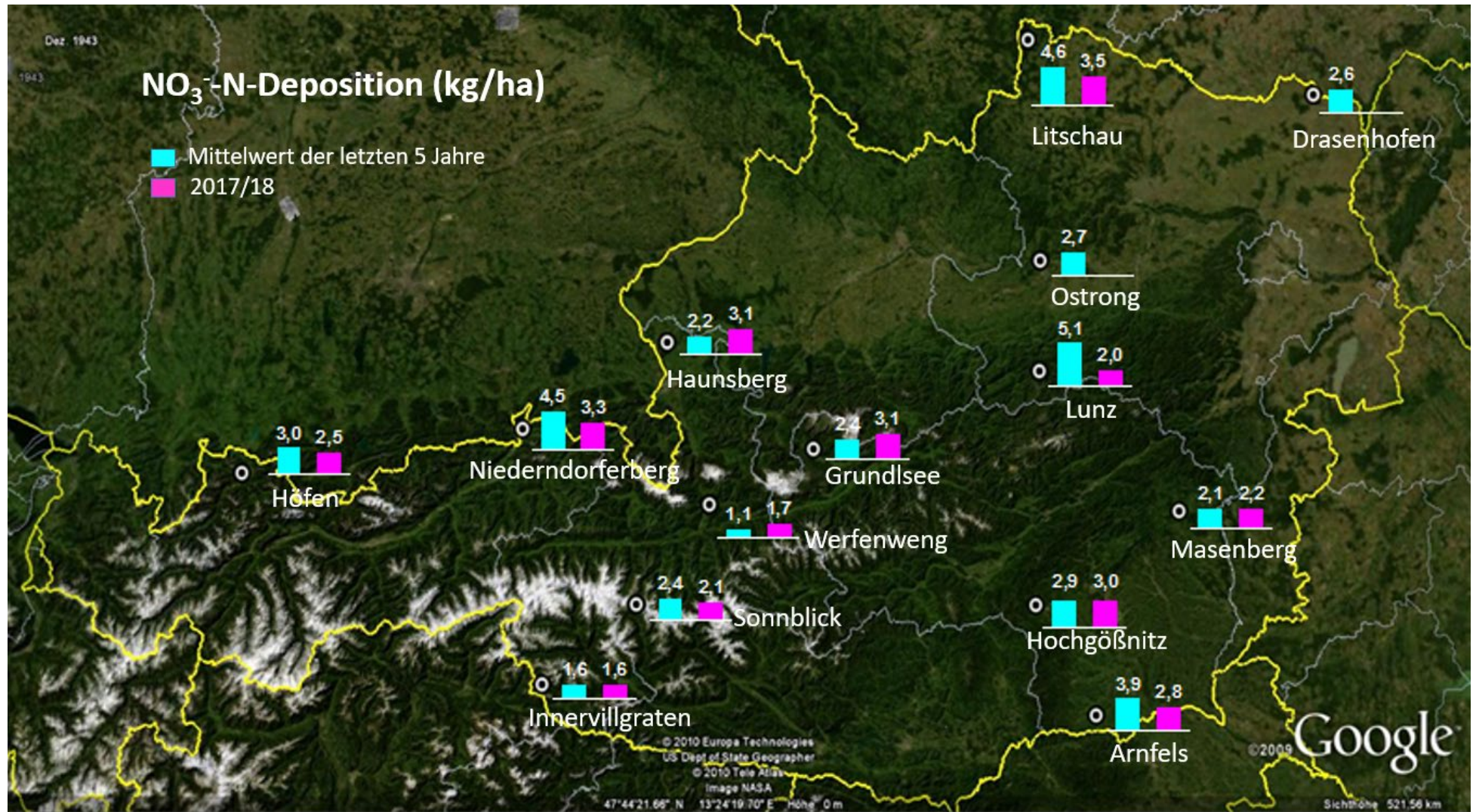


Abbildung 31: Räumliche Verteilung der NO₃⁻-N Jahreseinträge für den Zeitraum Oktober 2017 bis September 2018 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahre. *Durch die Außerbetriebnahme des WADOS an der Station Ostrong und Drasenhofen konnten für das Jahr 2017/18 keine Daten erhoben werden.

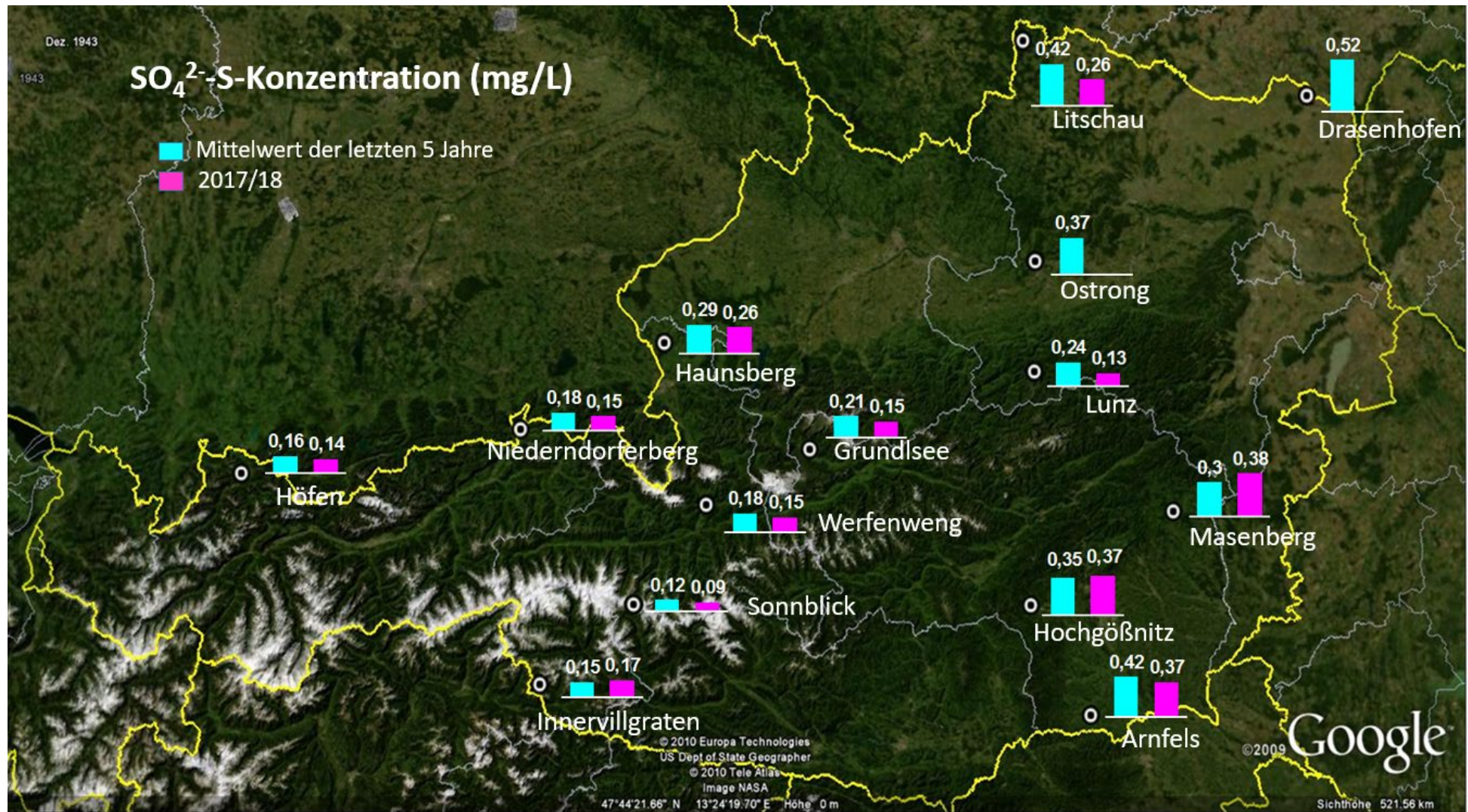


Abbildung 32: Räumliche Verteilung der mengengewichteten SO₄²⁻-S Jahreskonzentrationen im Niederschlag für den Zeitraum Oktober 2017 bis September 2018 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahre. *Durch die Außerbetriebnahme des WADOS an der Station Ostrong und Drasenhofen konnten für das Jahr 2017/18 keine Daten erhoben werden.

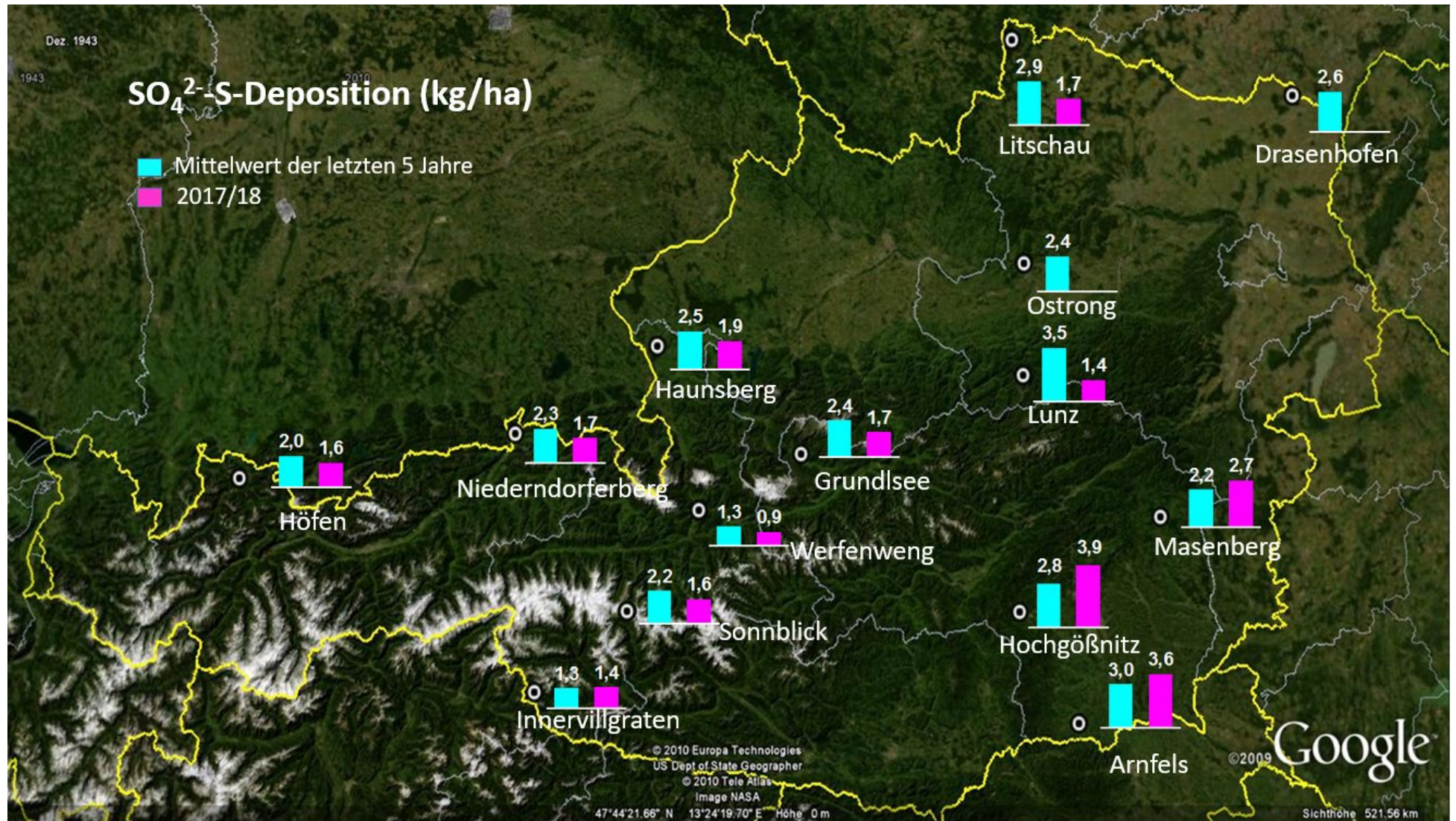


Abbildung 33: Räumliche Verteilung der SO₄²⁻-S Jahreseinträge für den Zeitraum Oktober 2017 bis September 2018 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahre. *Durch die Außerbetriebnahme des WADOS an der Station Ostrong und Drasenhofen konnten für das Jahr 2017/18 keine Daten erhoben werden.

3.5. Zusammenhang zwischen den Niederschlagsmengen und den Stoffkonzentrationen bzw. Stoffeinträgen

Die Auswertung der Tagesproben zeigt eine hohe Variabilität der täglichen Niederschlagsmengen, der Konzentrationswerte und entsprechend auch der täglichen Depositionsmengen. Daher wurden Häufigkeitsverteilungen und zusätzliche Parameter zur Beschreibung der Messwertverteilungen erstellt. Aufgrund der Häufigkeitsverteilung der täglichen Niederschlagsmengen wurden logarithmisch skalierte Niederschlagsklassen verwendet.

Zur Beschreibung der asymmetrischen Verteilungen der Messwerte eignen sich Perzentilwerte und davon abgeleitete Parameter als Lokalisations- und Dispersionsmaßzahlen. Eine kurze Erläuterung zu diesen Maßzahlen und die dazugehörigen Auswertungen befindet sich im Anhang (Tabellen A 28 bis A 31).

Die Häufigkeiten der täglichen **Niederschlagsmengen** sind in den Abbildungen 34 bis 36 dargestellt. Erkennbar ist, dass Tage mit sehr niedrigen bzw. sehr hohen Niederschlagsmengen selten auftreten und dass die Bereiche der Niederschlagsmengen an den einzelnen Stationen unterschiedlich sind. Die Tabellen 14 bis 16 listen die in den Abbildungen gezeigten absoluten Häufigkeiten sowie die relativen Häufigkeiten der Niederschlagsklassen und Niederschlagsmengen auf. Betrachtet man Tage mit mehr als 16 mm Niederschlag, so fielen in Höfen an 23 Tagen (nur 15 % aller Regentage) 55% des Jahresniederschlags und in Niederdorferberg an 21 Tagen (19 % aller Regentage) 47 % des Jahresniederschlags. In Innervillgraten brachten 14 Tage mit mehr als 16 mm (11% aller Regentage) 43 % des Jahresniederschlags. (vergleiche Tabellen 14 - 16).

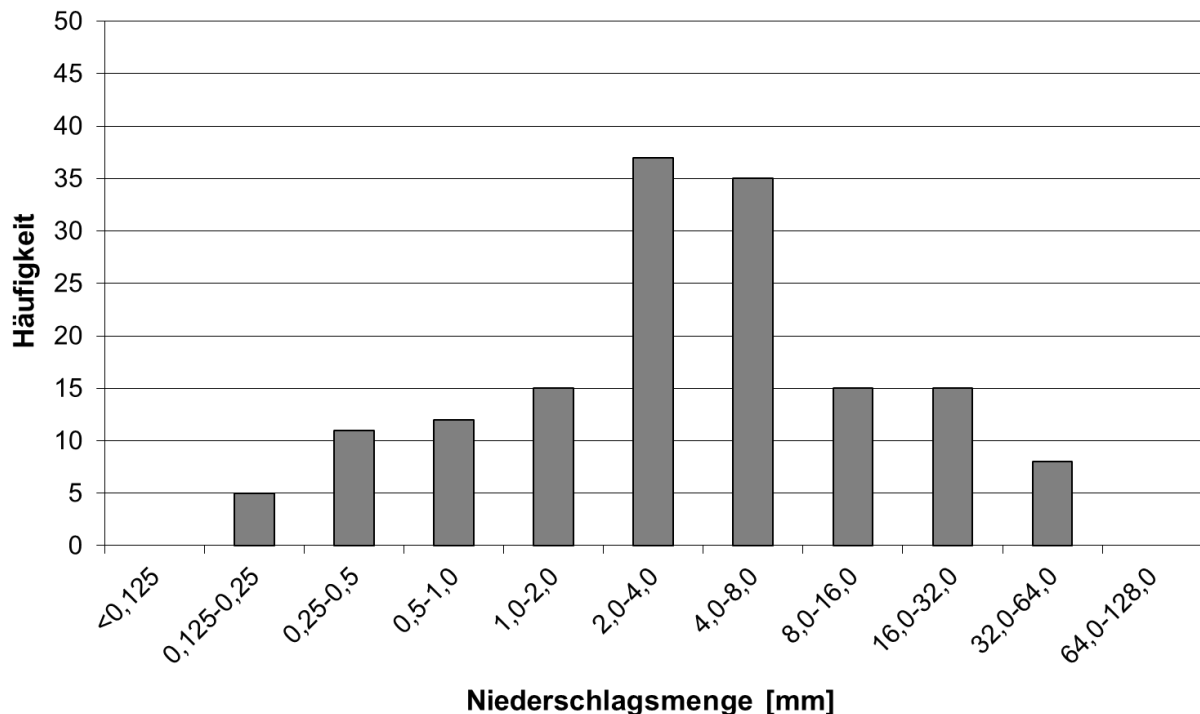


Abbildung 34: Anzahl der Regentage in den jeweiligen Niederschlagsklassen an der Messstelle **Höfen**.

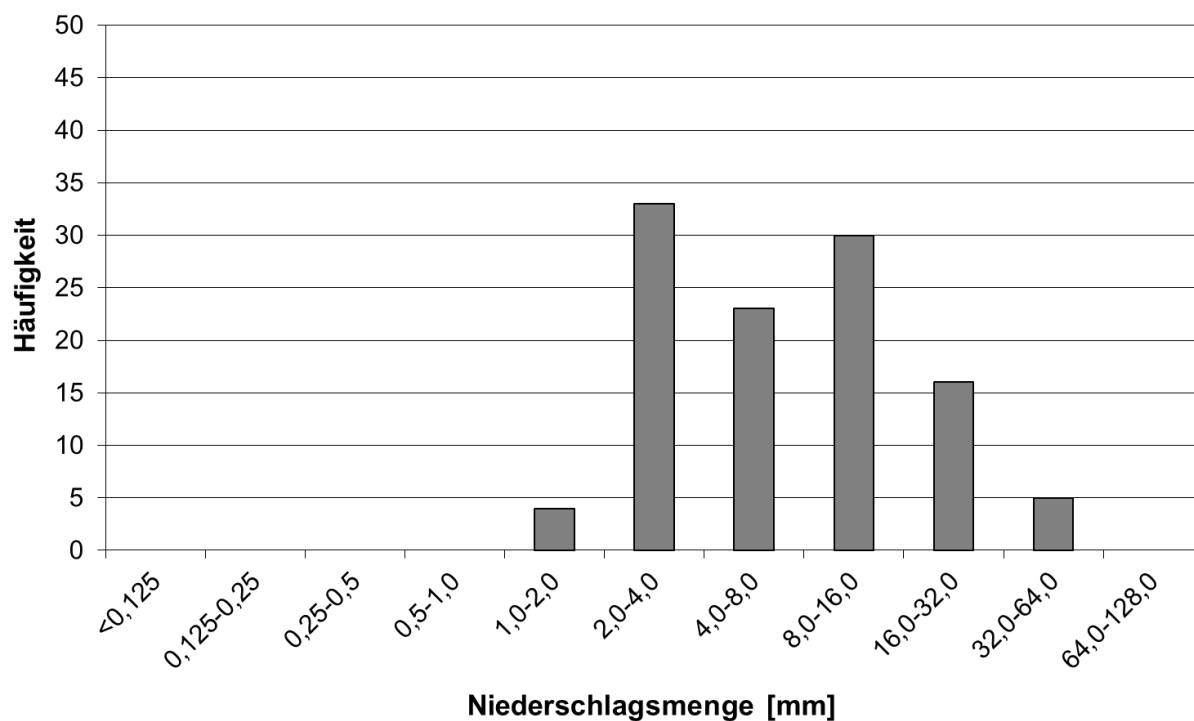


Abbildung 35: Anzahl der Regentage in den jeweiligen Niederschlagsklassen an der Messstelle Niederndorferberg.

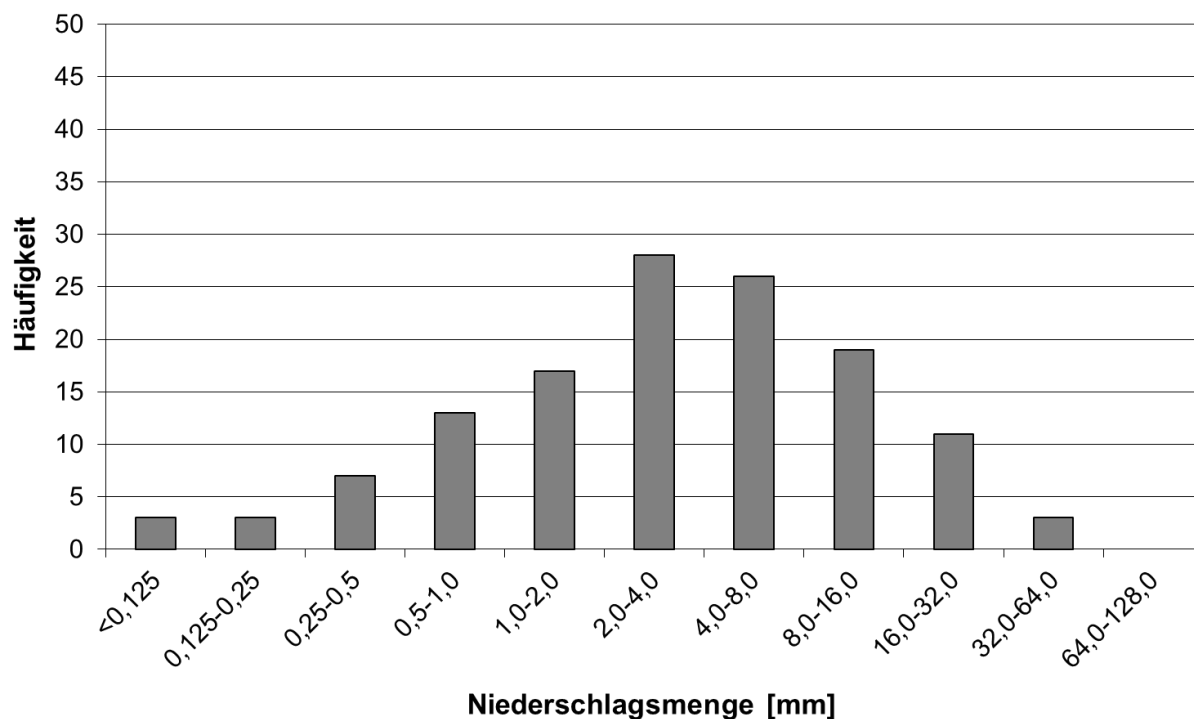


Abbildung 36: Anzahl der Regentage in den jeweiligen Niederschlagsklassen an der Messstelle Innervillgraten.

Tabelle 14: Absolute und relative Häufigkeit sowie Niederschlagsmenge in den Niederschlagsklassen für den Zeitraum 01.10.2017 bis 30.09.2018 an den Messstellen.

Niederschlagsklasse			Häufigkeit		Niederschlagsmenge	
[mm]			N	[%]	[mm]	[%]
Höfen						
	bis	0,125	-	-	-	-
0,125	-	0,25	5	3,3	1,0	0,1
0,25	-	0,5	11	7,2	3,9	0,3
0,5	-	1	12	7,8	9,6	0,8
1	-	2	15	9,8	21,8	1,9
2	-	4	37	24,2	105,5	9,2
4	-	8	35	22,9	202,5	17,7
8	-	16	15	9,8	172,0	15,1
16	-	32	15	9,8	333,7	29,2
32	-	64	8	5,2	292,3	25,6
64	-	128	-	-	-	-
Niederndorferberg						
	bis	0,125	-	-	-	-
0,125	-	0,25	-	-	-	-
0,25	-	0,5	-	-	-	-
0,5	-	1	-	-	-	-
1	-	2	4	3,6	6,4	0,6
2	-	4	33	29,7	102,4	9,0
4	-	8	23	20,7	139,2	12,2
8	-	16	30	27,0	358,5	31,5
16	-	32	16	14,4	370,2	32,5
32	-	64	5	4,5	161,3	14,2
64	-	128	-	-	-	-
Innervillgraten						
	bis	0,125	3	2,3	0,2	0,0
0,125	-	0,25	3	2,3	0,4	0,1
0,25	-	0,5	7	5,4	2,7	0,3
0,5	-	1	13	10,0	10,1	1,2
1	-	2	17	13,1	23,5	2,8
2	-	4	28	21,5	84,2	10,0
4	-	8	26	20,0	155,4	18,4
8	-	16	19	14,6	204,3	24,2
16	-	32	11	8,5	246,5	29,2
32	-	64	3	2,3	116,7	13,8
64	-	128	-	-	-	-

Mit zunehmender Niederschlagsmenge nehmen die Ionenkonzentrationen im Mittel ab. Während die Konzentrationswerte der Niederschlagsproben mit geringen Niederschlagsmengen stark streuen, weisen die Tagesproben mit hohen Niederschlagsmengen generell geringe Ionenkonzentrationen auf. Diese Beobachtung kann auf das „Auswaschen“ der Stoffe aus der Atmosphäre zurückgeführt werden. In den Tabellen 15 bis 17 sind die volumengewichteten Mittelwerte der Ionenkonzentrationen und die pH-Werte je Niederschlagsklasse angegeben. Da bei geringen Niederschlagsmengen teilweise nicht alle Analysen durchgeführt werden können, fehlen in den folgenden Tabellen einzelne Ergebnisse.

Tabelle 15: Mittlerer pH Wert und mengengewichtete Konzentrationen in den Niederschlagsklassen für den Zeitraum 01.10.2017 bis 30.09.2018 an den Messstellen.

Niederschlagsklasse	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻ -S
[mm]	[-]					[mg/L]				
Höfen										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	3,36	-	1,19	18,00	18,00	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	0,50	0,92	0,25	7,05	0,88	0,52	0,63	1,00
0,5 - 1	-	-	0,30	1,24	0,13	1,23	0,36	0,40	1,29	0,53
1 - 2	6,1	0,001	0,16	0,54	0,22	1,13	0,31	0,22	0,49	0,22
2 - 4	6,1	0,001	0,19	0,62	0,15	0,80	0,18	0,27	0,43	0,24
4 - 8	6,2	0,001	0,12	0,42	0,07	1,17	0,24	0,17	0,32	0,27
8 - 16	6,2	0,001	0,13	0,48	0,05	0,44	0,09	0,21	0,27	0,16
16 - 32	5,7	0,002	0,09	0,26	0,07	0,50	0,08	0,12	0,13	0,09
32 - 64	5,7	0,002	0,03	0,13	0,03	0,17	0,03	0,06	0,09	0,04
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Niederndorferberg										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,5 - 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 - 2	6,2	0,001	0,11	0,58	0,08	0,23	0,02	0,11	0,43	0,13
2 - 4	5,8	0,002	0,20	0,92	0,13	0,41	0,05	0,24	0,60	0,27
4 - 8	5,5	0,003	0,29	0,58	0,10	0,21	0,03	0,15	0,42	0,20
8 - 16	5,4	0,004	0,20	0,52	0,13	0,19	0,03	0,21	0,33	0,16
16 - 32	5,6	0,003	0,06	0,41	0,08	0,09	0,02	0,07	0,18	0,10
32 - 64	6,0	0,001	0,07	0,41	0,06	0,20	0,02	0,08	0,15	0,09
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Innervillgraten										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	0,21	-	0,28	0,03	0,01	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	0,19	0,80	0,17	0,21	0,06	0,15	0,36	0,03
0,5 - 1	-	-	0,08	2,94	0,09	0,26	0,06	0,28	0,37	0,19
1 - 2	5,9	0,001	0,18	1,02	0,26	0,80	0,09	0,21	0,35	0,28
2 - 4	6,0	0,001	0,10	0,67	0,17	0,51	0,06	0,11	0,24	0,18
4 - 8	6,0	0,001	0,08	0,47	0,10	0,44	0,05	0,13	0,21	0,21
8 - 16	6,0	0,001	0,08	0,44	0,08	0,52	0,05	0,09	0,22	0,20
16 - 32	6,0	0,001	0,05	0,63	0,14	0,15	0,03	0,08	0,15	0,13
32 - 64	5,7	0,002	0,13	0,32	0,11	0,11	0,02	0,07	0,10	0,09
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tage mit geringen Niederschlägen liefern relativ wenig Stoffeintrag. Die ergiebigen Niederschläge (16 bis 128 mm pro Tag) verursachten dagegen größere Stoffeinträge, wie in der Tabelle 16 zu erkennen ist. Ergänzend zu den absoluten Stoffeinträgen werden in der Tabelle 17 auch die relativen Beiträge, aufgeteilt auf die einzelnen Niederschlagsklassen, angegeben.

Als Beispiel für die Bedeutung von Starkregenereignissen sei an dieser Stelle die Station Niederndorferberg angeführt. In der Untersuchungsperiode 2017/18 führten 90 Regentage mit Niederschlagsmengen bis 16 mm (das sind 81% aller Niederschlagstage) zu etwa 69% des gesamten Sulfatschwefeleintrages, während 5 Ereignisse mit > 32 mm Niederschlag (4,5 % aller Niederschlagstage) bereits 9 % des Eintrags an Sulfat-S bewirkten.

Tabelle 16: Nasse Deposition je Niederschlagsklasse für den Zeitraum 01.10.2017 bis 30.09.2018 an den Messstellen.

Niederschlagsklasse	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻ -S
[mm]	[-]					[kg/ha]				
Höfen										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	0,03	-	0,01	0,18	0,18	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	0,02	0,04	0,01	0,28	0,03	0,02	0,02	0,04
0,5 - 1	-	-	0,03	0,12	0,01	0,12	0,03	0,04	0,12	0,05
1 - 2	6,1	0,00	0,04	0,12	0,05	0,25	0,07	0,05	0,11	0,05
2 - 4	6,1	0,00	0,20	0,66	0,15	0,85	0,19	0,28	0,46	0,25
4 - 8	6,2	0,00	0,24	0,86	0,14	2,38	0,48	0,35	0,64	0,55
8 - 16	6,2	0,00	0,23	0,83	0,09	0,75	0,16	0,36	0,46	0,28
16 - 32	5,7	0,01	0,31	0,87	0,22	1,67	0,27	0,39	0,44	0,30
32 - 64	5,7	0,01	0,08	0,39	0,07	0,50	0,09	0,17	0,25	0,13
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Niederndorferberg										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,5 - 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 - 2	6,2	0,00	0,01	0,04	0,01	0,01	0,00	0,01	0,03	0,01
2 - 4	5,8	0,00	0,20	0,95	0,13	0,42	0,05	0,25	0,61	0,27
4 - 8	5,5	0,00	0,41	0,81	0,14	0,29	0,04	0,21	0,59	0,27
8 - 16	5,4	0,01	0,72	1,88	0,46	0,69	0,12	0,75	1,19	0,58
16 - 32	5,6	0,01	0,24	1,52	0,30	0,34	0,06	0,27	0,68	0,36
32 - 64	6,0	0,00	0,11	0,66	0,10	0,32	0,04	0,13	0,24	0,15
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Innervillgraten										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
0,5 - 1	-	-	0,01	0,30	0,01	0,03	0,01	0,03	0,04	0,02
1 - 2	5,9	0,00	0,04	0,24	0,06	0,19	0,02	0,05	0,08	0,07
2 - 4	6,0	0,00	0,09	0,57	0,14	0,43	0,05	0,10	0,20	0,15
4 - 8	6,0	0,00	0,12	0,73	0,16	0,68	0,07	0,21	0,33	0,32
8 - 16	6,0	0,00	0,16	0,91	0,16	1,06	0,09	0,19	0,45	0,41
16 - 32	6,0	0,00	0,12	1,56	0,34	0,37	0,07	0,19	0,36	0,32
32 - 64	5,7	0,00	0,16	0,38	0,13	0,13	0,03	0,08	0,12	0,10
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 17: Verteilung der Regeninhaltsstoffe je Niederschlagsklasse für den Zeitraum 01.10.2017 bis 30.09.2018 an den Messstellen.

Niederschlagsklasse	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻ -S
[mm]	[%]								
Höfen									
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	2,8	-	1,5	2,5	11,8	-	-	-
0,25 - 0,5	-	1,7	0,9	1,3	4,0	2,3	1,2	1,0	2,4
0,5 - 1	-	2,4	3,1	1,6	1,7	2,3	2,3	4,9	3,1
1 - 2	1,1	3,0	3,0	6,2	3,6	4,6	2,9	4,2	2,9
2 - 4	5,4	17,0	17,0	20,3	12,2	12,4	16,9	18,1	15,4
4 - 8	8,5	20,5	22,1	18,1	34,1	31,9	21,0	25,7	33,6
8 - 16	6,8	19,5	21,4	12,1	10,8	10,3	21,7	18,3	17,0
16 - 32	44,8	26,3	22,5	29,2	23,9	18,3	23,6	17,7	17,9
32 - 64	33,4	6,8	10,0	9,6	7,1	6,0	10,4	10,1	7,6
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Niederndorferberg									
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,5 - 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 - 2	0,1	0,4	0,6	0,4	0,7	0,5	0,4	0,8	0,5
2 - 4	5,7	12,0	16,2	11,4	20,4	16,0	15,4	18,3	16,7
4 - 8	13,5	24,2	13,9	12,1	13,9	14,0	13,1	17,7	16,6
8 - 16	43,3	42,6	32,1	40,2	33,2	38,2	46,5	35,6	35,3
16 - 32	32,1	14,1	26,0	26,7	16,5	19,0	16,4	20,3	22,0
32 - 64	5,3	6,8	11,3	9,2	15,3	12,2	8,1	7,3	9,0
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Innervillgraten									
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	0,1	-	0,1	0,0	0,0	-	-	-
0,25 - 0,5	-	0,7	0,5	0,4	0,2	0,4	0,5	0,6	0,1
0,5 - 1	-	1,1	6,3	0,9	0,9	1,7	3,3	2,4	1,4
1 - 2	2,9	6,0	5,1	6,0	6,5	5,9	5,9	5,2	4,7
2 - 4	8,8	12,3	12,1	14,2	15,0	13,9	11,4	12,5	11,0
4 - 8	16,7	17,5	15,6	16,3	23,5	20,8	24,6	20,6	22,9
8 - 16	22,2	22,7	19,3	15,7	36,6	27,4	22,4	28,3	29,3
16 - 32	24,8	17,1	33,1	33,6	12,8	21,9	22,3	22,7	23,0
32 - 64	24,6	22,4	8,0	12,7	4,4	8,0	9,5	7,7	7,5
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-

4. Zusammenfassung

- In der vorliegenden Untersuchungsperiode setzten sich die Trends der letzten Jahre fort. Dies bedeutet, dass die Trends der Konzentrationswerte für Sulfat und Nitrat im Niederschlagswasser weiterhin an allen Stationen abnehmend sind. Für die Ammoniumkonzentration gilt dies nur für die Stationen Niederndorferberg und Höfen. Bei dieser Auswertung zeigt sich, dass es wichtig ist auf langjährige Monitoringprogramme zurückgreifen zu können, denn bei der Betrachtung der Ergebnisse von 2017/18 mit jenen der Vorjahre zeigt sich, dass es teilweise zu einer Zunahme der Konzentrationswerte kommt. Diese Unterschiede liegen aber im Bereich der von Jahr zu Jahr möglichen Schwankungsbreite, die Trends bleiben bestehen.
- Seit Beginn der Messungen nahm der jährliche Eintrag von Sulfat-Schwefel durch nasse Deposition deutlich ab. Aus der Trendanalyse für nunmehr 34 Jahren ergeben sich Reduktionen um 3 kg/ha (Innervillgraten), 6 kg/ha (Höfen) und 8 kg/ha (Niederndorferberg). Auch der jährliche Eintrag an Gesamtstickstoff war an zwei Stationen rückläufig. In Niederndorferberg lag diese Abnahme über den gesamten Untersuchungszeitraum bei 5 kg/ha und in Höfen bei ebenfalls 5 kg/ha. Innervillgraten hingegen zeigt, bedingt durch einen hohen Beitrag an Ammonium-Stickstoff, eine Zunahme des Gesamtstickstoffeintrags um 2 kg/ha. Grund dafür scheint eine zunehmende Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung der Umgebung der Messstelle zu sein.
- Der jährliche Schwefeleintrag liegt weiterhin deutlich unter dem Grenzwert (3 kg/ha/Jahr) der WHO (1995). Im Vergleich zum Vorjahr liegt auch der Eintrag an Stickstoff durch nasse Deposition an allen Stationen erneut unter dem Grenzwert (10 kg/ha/Jahr) für sensible Ökosysteme gemäß dem Konzept der Critical Loads. Eine weitere Beobachtung der Stickstoffeinträge ist allerdings weiterhin wichtig, da neben der nassen Deposition auch die trockene Deposition und direkte Einträge über den Nebel nährstoffarme Ökosysteme beeinträchtigen.
- Die Konzentrationswerte der Ionen im Niederschlag nehmen zwar mit zunehmender Regenmenge ab, jedoch tragen Tage mit großen Regenmengen (>16 mm) überdurchschnittlich zu den Stoffeinträgen bei.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich bei Josef Bergmann (Innervillgraten), Richard Schwaighofer (Niederndorferberg) und Gertraud Scheiber (Höfen) für die tägliche Betreuung der WADOS-Messstellen und die zuverlässige Zusammenarbeit. Weiters gilt Dank Martin Perlornigg, Werner Nocker und Dionys Schatzer (alle Abt. Waldschutz) für die Unterstützung bei den WADOS Messungen und Manfred Recheis (Sg. Chemisch-technische Umweltschutzanstalt) für die Abwicklung der Probenanalysen.

5. Literatur

Bundesministerium für Gesundheit und Umweltschutz (1984) Richtlinie 11, Immissionsmessung des nassen Niederschlags und des sedimentierten Staubes, Luftverunreinigung - Immissionsmessung, Wien.

Cehak K., Chalupa K. (1985) Observations of various chemical contaminants of the precipitation at a BAPMoN station in the Eastern Pre-Alpine Region, Arch. Met. Geophys. Bioclimat. B35, 307-322.

Granat L. (1978) Sulfate in precipitation as observed by the European Atmospheric Chemistry Network, Atmospheric Environment 12, 413-424.

GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (2006): Provisorische Geologische Karte der Republik Österreich 1: 25.000, 178 Hopfgarten in Deferegggen

GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (2007): Provisorische Geologische Karte der Republik Österreich 1: 25.000, 90 Kufstein.

Hand J. L., Schichtel B. A., Malm W. C., and Pitchford M. L. (2012) Particulate sulfate ion concentration and SO₂ emission trends in the United States from the early 1990s through 2010. Atmospheric Chemistry and Physics 12, 10353-10365.

Hedin L.O., Granat L., Likens G.E., Rodhe H. (1991) Strong similarities in seasonal concentration ratios of SO₄²⁻, NO₃⁻ and NH₄⁺ in precipitation between Sweden and northeast US, Tellus 43B, 454-462.

Herman F., Knoflacher M., Loibl W., Kalina M. and Smidt S. (1998) Risk assessment by nitrogen input in the European Alps, in Responses of plant metabolism to air pollution and global change, ed. by L.J. De Kok and I. Stulen, Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 329-332.

Horvath L., Meszaros E. (1984) The composition and acidity of precipitation in Hungary, Atmospheric Environment 18, 1843-1847.

Kalina M.F., Puxbaum H. (1994) A study of the influence of riming of ice crystals on snow chemistry during different seasons in precipitation continental clouds, Atmospheric Environment Vol.28., 20, 3311-3328.

Kalina M. F., Puxbaum H. (1995) Verteilung der nassen Deposition von Schwefel- und Stickstoffverbindungen in Österreich, Dokumentation der Daten für 1991, Bericht 9/94, Institut für Analytische Chemie, TU-Wien, Österreich.

Kalina M. F., Puxbaum H. (1995) Verteilung der nassen Deposition von Niederschlagsinhaltsstoffen in Österreich, Dokumentation der Daten für 1992, Bericht 3/95, Institut für Analytische Chemie, TU-Wien, Österreich.

Kalina M., Puxbaum H., Tsakovski S. and Simeonov V. (1999) Time trends in the concentrations of lead in wet precipitation from rural and urban sites in Austria, Chemosphere 38, 11, 2509-2515.

Kalina M. F., Schatten A., Puxbaum H., Biebl P. (1995) "Saurer Regen", Nasse Deposition im Land Salzburg, Oktober 1983 bis September 1994, Ergebnisse der elfjährigen Meßserie, Bericht 4/95, Institut für Analytische Chemie, TU-Wien, Österreich.

Kalina M., S. Stopper, E. Zambo, H. Puxbaum (2002) Altitude-dependent wet, dry and occult nitrogen deposition in an Alpine region (Achenkirch, Austria, 920 m - 1758 m a.s.l.). Environmental Science & Pollution Research 2, 16-22.

Kalina M. F., Zambo E. and Puxbaum H. (1998) Assessment of wet, dry and occult deposition of sulfur and nitrogen at an alpine site, Environmental Science & Pollution Research 1, 53-58.

Kasper A., Puxbaum H. (1994) Determination of SO₂, HNO₃, NH₃ and aerosol components at an high alpine background site with a filter pack method, Analitica Chimica Acta 291, 297-304.

Kovar A., Puxbaum H. (1990) A simple model to explain spring maximum of sulfate concentration in precipitation water, Int. Conference on Acidic Deposition, Glasgow, 1990.

Meszaros E. (1974) On the spring maximum of the concentration of trace constituents in atmospheric precipitation, Tellus 24, 402-407.

Miles L.J., Yost K.J. (1982) Quality analysis of USGS precipitation chemistry data for New York, Atmospheric Environment 16, 2889-2898.

Nagel H. D. und Gregor H. D. (1999) Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads & Levels, Verlag Springer, ISBN 3-540-62418-X

Puxbaum H. and Gregori Kalina M. (1998) Seasonal and Annual Deposition Rates of Sulfur, Nitrogen and Chloride Species to an Oak Forest in North-Eastern Austria (Wolkersdorf, 240 m a.s.l.), *Atmospheric Environment* 32, 3557-3568.

Puxbaum H., Kovar A., Kalina M. (1991) Chemical Composition and Fluxes of Wet Deposition at Elevated Sites (700-3105 m a.s.l.) in the Eastern Alps (Austria), NATO ASI Series, Vol.G28, Seasonal Snowpacks, ed. by T.D.Davies et al., Verlag Springer Berlin Heidelberg, 273-297.

Puxbaum H., Simeonov V., Kalina M. (1998) Ten years trends (1984-1993) in the precipitation chemistry in Central Austria, *Atmospheric Environment* 32, 193-202.

Puxbaum H., Simeonov V., Kalina M., Tsakovski S., Löffler H., Heimbürger G., Biebl P., Weber A., Damm A. (2002) Long-Term assessment of the wet precipitation chemistry in Austria (1984-1999), *Chemosphere* 48,733-747.

Rhode H., Granat L. (1984) An evaluation of sulfate in European precipitation 1955-1982, *Atmospheric Environment* 18, 2627-2639.

RÖHRING, M. (1997): Über geologische Aufnahmen in den Nördlichen Kalkalpen (Lechtaler Alpen) auf Blatt 115 Reutte Bericht 1997. http://www.geologie.ac.at/filestore/download/JB1413_276_A.pdf

Schreiner E., Kasper-Giebl A. and Lohninger H. (2016) Temporal and spatial trends of chemical composition of wet deposition samples collected in Austria. EGU General Assembly 2016, Vol. 18, EGU2016-15374

Simeonov V., Puxbaum H., Tsakovski S., Sarbu C. and Kalina M. (1999) Classification and receptor modeling of wet precipitation data from Central Austria, *Environmetrics* 10, 137-152.

Smith F.B. and Hunt R.D. (1978) Meteorological aspects of the transport of pollution over long distances, *Atmospheric Environment* 12, 1921-1932.

TIROL ATLAS, 2017. Geographie Innsbruck. <http://tirolatlas.uibk.ac.at/graphics/lieth/index.html.de>

Torseth K, Aas W., Breivik K., Fjærss A.M., Fiebig M., Hjelmbrekke A.G., Lund Myhre C., Solberg S., Yttri K.E. (2012) Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972-2009. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 5447-5481.

Tsakovski S., Puxbaum H., Simeonov V., Kalina M., Löffler H., Heimbürger G., Biebl P., Weber A., Damm A. (2000) Trend, seasonal and multivariate modelling study of wet precipitation data from the Austrian Monitoring Network (1990-1997), *Journal of Environmental Monitoring* 2, 424-431.

Vet R. et al. 21 authors (2014) A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulphur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity und pH, and phosphorus. *Atmospheric Environment* 93, 3-100.

Walter H. & Lieth H. 1960. Klimadiagramm-Weltatlas. Jena, VEB G. Fischer.

WHO (1995) Updating and revision of the air quality guidelines for Europe. Rept. on the WHO Working Group on Ecotoxic Effects, Les Diablerets, Sept 21-23, 1994.

WORLD Meteorological ORGANISATION GLOBAL ATMOSPHERE WATCH. (2004) Manual for the GAW precipitation chemistry programme No. 160, WMO TD No. 1251 (http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo-td_1251.pdf).