



Flechten und Luftqualität in Appenzell Ausserrhoden: Wirkungskontrolle 2010

im Auftrag des Kantons Appenzell Ausserrhoden
Amt für Umwelt

30. Januar 2012

Umweltberatung

Dr. Martin Urech
Mühlemattstrasse 45
CH-3007 Bern
Tel. +41 (0)31 372 20 28
Fax +41 (0)31 371 90 46
info@pulsbern.ch
www.pulsbern.ch

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG	1
1. EINLEITUNG	5
1.1 Flechten als Bioindikatoren.....	5
1.2 Bisherige Untersuchungen.....	5
1.3 Untersuchung 2010.....	5
1.4 Wirkungskontrolle.....	6
2. ZIELE	7
3. GESAMTBELASTUNG	8
3.1 Methode	8
3.1.1 Lebewesen Flechte.....	8
3.1.2 Kalibrierte Flechtenindikationsmethode.....	9
3.1.3 Flechtenuntersuchung 2010.....	10
3.2 Veränderung der Luftgüte	11
3.2.1 Luftgütekarte 1991.....	11
3.2.2 Luftgütekarte 2000.....	12
3.2.3 Luftgütekarte 2010.....	12
3.2.4 Flächenanteile der einzelnen Zonen.....	12
3.3 Differenzkarten von 1991 bis 2010	16
3.3.1 Differenzkarte 1991 bis 2010.....	16
3.3.2 Differenzkarte 2000 bis 2010.....	16
3.4 Veränderung des Luftgütewerts IAP18	20
3.4.1 Luftgüte 1991, 2000 und 2010 pro Georaum.....	20
3.4.2 Luftgütewerte im Vergleich.....	20
3.5 Acidoindex	22
3.5.1 Transformierter Acidoindex – eine Anpassung an Appenzell Ausserrhoden.....	23
3.5.2 Acidoindex 1991.....	23
3.5.3 Acidoindex 2000.....	23
3.5.4 Acidoindex 2010.....	23
3.5.5 Veränderung des Acidoindex' von 1991 bis 2010.....	23
3.6 Nitroindex	30
3.6.1 Nitroindex 1991.....	31
3.6.2 Nitroindex 2000.....	31
3.6.3 Nitroindex 2010.....	31
3.6.4 Veränderung des Nitroindex' 1991 bis 2010.....	31
3.7 Flechten-Diversität	38
3.8 Entropie	39

4. EINZELSTOFFBELASTUNG.....	40
4.1 Einleitung und Zielsetzung	40
4.1.1 Einleitung	40
4.1.2 Ziele dieser Untersuchung	40
4.2 Methodisches	41
4.2.1 Sammlung, Aufbereitung und Analytik.....	41
4.2.2 Stationen.....	42
4.2.3 Zuordnung zu Verkehrsklassen, Siedlungstyp und landwirtschaftliche Bewirtschaftung	43
4.2.4 Analytierte Elemente	43
4.2.5 Schwermetallindex SMI	44
4.2.6 Darstellung der Resultate	44
4.3 Resultate und Diskussion	46
4.3.1 Gesamtsicht: Schermetallindex SMI	46
4.3.2 Übersicht über Stationen und Einzelelemente.....	48
4.3.3 Resultate für die einzelnen Elemente	50
5. DISKUSSION	81
5.1 Luftqualität	81
5.1.1 Emissionsentwicklung.....	81
5.1.2 Immissionsmessungen	82
5.2 Einzelstoff- und Gesamtbelastung	86
5.2.1 Schwermetallindex und Gesamtbelastung	86
5.2.2 Stickstoff	87
5.2.3 Flechtendaten und technische Messdaten	89
5.3 Weitere Einflüsse auf das Untersuchungsergebnis	91
5.3.1 Methodische Fehler	91
5.3.2 Standortfaktoren	93
6. SCHLUSSFOLGERUNGEN	95
LITERATUR.....	97
ANHANG	101
Anhang 1: Gesamtbelastung: Daten der IAP18-Bäume.....	101
Anhang 2: Gesamtbelastung: Daten der IAP18-Georäume	113
Anhang 3: Gesamtbelastung: Auswertung zu Ersatzbäumen	117
Anhang 4: Einzelstoffbelastung: Grundlagen und Methodisches	121
Anhang 5: Einzelstoffbelastung: Charakteristik der untersuchten Elemente.....	124
Anhang 6: Einzelstoffbelastung: Stationstafeln	127
Anhang 7: Einzelstoffbelastung: Daten	149
Anhang 8: Einzelstoffbelastung: Standortcharakteristik Einzelbäume	151
Anhang 9: Einzelstoffbelastung: Qualitätssicherung	157

Impressum

Auftraggeber: Amt für Umwelt Appenzell Ausserrhoden,
Kasernenstrasse 17, 9102 Herisau,
begleitet durch Peter Federer, Abteilung Luft und Boden

Auftragnehmer: puls Umweltberatung, Mühlemattstrasse 45, 3007 Bern
Martin Urech, Pascale Affolter, Nora Rychen, Rudolf Urech

in Zusammenarbeit mit:

Kathrin Peter, Evaluationen, 3011 Bern

Kartierung und Probensammlung:

Martin Urech, Kathrin Peter, Martin Frei, Michael Dietrich

Einzelstoffbestimmung, passives Biomonitoring:

Autoren: Lotti Thöni, Janosch Ehrenmann, FUB

Aufbereitung: Simone Metz, Lidija Murtovi, Rosemarie
Seeholzer, FUB

Analytik: Jörg Meyer und Team, NIUTEC

Datenbankeinrichtung und Betreuung: Reto Schnyder, FUB

Zitiervorschlag:

puls 2012: Flechten und Luftqualität in Appenzell Ausserrhoden: Wirkungs-
kontrolle 2010. Amt für Umwelt Appenzell Ausserrhoden. 177 S.

Zusammenfassung

Mit Hilfe der Flechtenindikationsmethode wurde in Appenzell Ausserrhoden 1991 und 2000 die Luftqualität analysiert. Mit der Untersuchung 2010 wurde die Erhebungsreihe fortgesetzt. Sie erfasst die Veränderung der letzten rund zwanzig Jahre und dient als Wirkungskontrolle der seither erfolgten Massnahmen zur Luftreinhaltung.

Flechten als Indikatoren für die Luftbelastung

Baumbewohnende Flechten leben in einer symbiotischen Gemeinschaft zwischen Alge und Pilz unscheinbar auf Baumrinden. Sie reagieren artspezifisch empfindlich auf Luftschadstoffe. Je stärker die Gesamtbelastung der Luft ist, desto weniger Flechten können überleben.

Flechten zeigen ein Gesamtbild der Luftbelastung, die auf Pflanzen, Tiere und den Menschen wirkt. Die Erhebung des Flechtenbewuchses gibt daher nicht über Konzentrationen einzelner Schadstoffe, sondern über die Gesamtwirkung der Luftschadstoffe Auskunft. Zusätzlich sammeln Flechten Schadstoffe aus der Luft in ihrem Körper. Damit können sie auch zur Untersuchung der Schwermetallbelastung in der Luft verwendet werden. Bestimmte Flechtenkombinationen lassen auch Rückschlüsse auf spezielle Lebensbedingungen wie beispielsweise die Stickstoffversorgung oder die Belastung durch Säuren und Basen zu.

Luftgüte 1991

Im Referenzgebiet St. Gallen findet sich 1991 eine kritische Luftbelastung. Mittel und stark belastet sind die grösseren Siedlungsgebiete, insbesondere im nördlichen Untersuchungsgebiet. Sehr geringe Belastungen zeigen die Flechten im Gebiet Trogen Wald Rehetobel, ausserdem bei Heiden, Reute, Wienacht Tobel, Gais Rotenwis, Teufen Waldegg, Herisau Rechberg, Schwellbrunn und Urnäsch. In der übrigen Region herrscht eine geringe Gesamtluftbelastung vor: Diese Zone besitzt 1991 den grössten Flächenanteil.

Luftgüte 2000

Aus Spargründen wurden verschiedene Gebiete, die 1991 eine sehr geringe Luftbelastung zeigten, in den Jahren 2000 und 2010 nicht mehr untersucht.

Von 1991 bis 2000 hat sich die Gesamtluftbelastung in den untersuchten Gebieten verbessert. Die Zone der starken Belastung findet sich noch in St. Gallen. Die Siedlungsgebiete von Herisau, Teufen und Gais liegen 2000 in der Zone mittlerer Belastung. In den übrigen Gebieten herrscht eine geringe Luftbelastung. Den grössten Flächenanteil besitzt nach wie vor die Zone der geringen Belastung.

Luftgüte 2010

2010 hat sich die Spannweite der Belastung verschmälert, im Mittel ist die Belastung gegenüber 2000 wieder leicht gestiegen. Die grösste Fläche nimmt wie 1991 und 2000 die Zone der geringen Luftbelastung ein. Die mittlere Belastung hat sich in den Siedlungsgebieten jedoch ausge-

dehnt. Sehr gering belastete Gebiete finden sich nur noch kleinräumig. Eine starke Belastung besteht immer noch in St. Gallen, während Zonen mit kritischer Gesamtbelastung auch heute nicht festzustellen sind.

Veränderung der Luftgüte 1991 bis 2010

Im Untersuchungszeitraum haben sich Verbesserungen der Gesamtbelastung fast ausschliesslich in Gebieten mit vormals starker Belastung ergeben. In den übrigen Siedlungsgebieten hat sich die Belastungssituation in den vergangenen rund 20 Jahren verschlechtert oder sogar stark bis sehr stark verschlechtert: Früher wenig belastete Gebiete haben tendenziell eine Verschlechterung erfahren. In den übrigen Bereichen ist keine wesentliche Veränderung feststellbar. Damit hat sich die Spannweite der Belastung verschmälert.

Acidoindex (Säure- und Basenverträglichkeit)

1991 und 2000 dominieren im nördlichen Untersuchungsgebiet noch säureliebende Flechten, das südliche – ländliche – Gebiet ist jedoch bereits basisch geprägt. Diese Prägung verstärkt sich von 1991 bis 2010 weiter, heute herrschen im gesamten Gebiet die basenliebenden Flechten vor. Die Werte scheinen heute in einem relativ engen Rahmen zu schwanken und sich einem Minimalwert anzunähern.

Nitroindex (Stickstoff-Empfindlichkeit resp. -Verträglichkeit)

Im gesamten Untersuchungsgebiet hat sich die Stickstoffbelastung von 1991 bis 2010 erhöht, Hinweise auf stickstoffarme Immissionen fehlen gänzlich. Die Nitroindexwerte der Georäume scheinen sich über das gesamte Untersuchungsgebiet gesehen auf einem hohen Niveau anzugleichen.

Elementbelastung der Flechten, passives Biomonitoring

Die Belastung durch verschiedene Elemente hat seit Anfang der 1990er Jahre abgenommen, der Schwermetallindex als Mass für die Schwermetallbelastung nahm zwischen 1991 und 2010 um 34% ab.

Nicht alle analysierten Metalle und Elemente haben sich gleich verhalten. Direkte Massnahmen zur Minderung der Emissionen wurden für Cadmium (weitergehende Rauchgasreinigung bei Kehrlichtverbrennungsanlagen und Verzicht auf cadmiumhaltige Pigmente in vielen Produkten) und bei Blei (vor allem bleifreies Benzin) ergriffen. Diese zwei Elemente nahmen in den Flechten im Gesamten gesehen ab. Es gab aber auch einzelne Stationen, welche eine Zunahme zu verzeichnen hatten. Bei Blei war die Abnahme erst nach 2000 deutlich, obschon schon anfangs der 1990er Jahre der Gebrauch von Bleibenzin stark zurückging. Eine mögliche Ursache ist die Verbrennung von Altholz.

Metalle, welche häufig in der Metallindustrie benutzt werden, veränderten sich über alle Messungen wenig.

Arsen und Vanadium, welche zu einem wichtigen Teil aus fossilem Brennstoff stammen, nahmen zwischen 1991 und 2010 deutlich ab.

Die Stickstoffgehalte der Flechten zeigten trotz des gesunkenen Stickoxid-Ausstosses nur eine schwache Abnahme, vermutlich spielen hier

die kaum veränderten Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft und zum Teil erhöhte Ammoniak-Emissionen aus dem Verkehr (Katalysator) eine Rolle.

Schwefel wurde 2010 deutlich weniger in den Flechten gefunden als 1991, dies vor allem als Folge der konsequenten Einführung von schwefelarmen fossilen Brenn- und Treibstoffen in der Schweiz und die Anstrengungen zur Minderung von Schwefeldioxid im europäischen Osten seit der Wende.

Diskussion

Die Flechtenkartierung zeigt eine Verbesserung der Luftqualität von 1991 bis 2000, anschliessend aber eine Nivellierung der Belastungsverhältnisse. Die Zone der mittleren Belastung hat sich auf Kosten der sehr geringen Gesamtbelastung ausgedehnt. Die Zone der geringen Gesamtbelastung hat sich etwas vergrössert, Zonen mit kritischer Luftbelastung sind erfreulicherweise verschwunden. Der Nitroindex zeigt, dass die Eutrophierung der Luft seit 1991 stark zugenommen hat.

Diese Tendenzen decken sich mit den Emissions- bzw. Immissionsmessungen in dieser Zeitperiode für Stickstoffoxide, Feinstaub und Ozon. Dasselbe gilt für die Schwermetallbelastung und für die Stickstoffbelastung: Flechten und Messdaten zeigen eine Abnahme bei der Belastung durch Einzelstoffe, während der Nitroindex und Emissionsmodellierungen auf eine deutliche Zunahme der Eutrophierung hinweisen.

1991 ist ein schwacher Zusammenhang zwischen dem Flechten-Luftgütewert und dem Schwermetallindex SMI feststellbar: Je höher der SMI, desto tiefer ist der IAP-Wert. 2010 ist die Belastung durch Schwermetalle offensichtlich stark zurückgegangen, während sich die IAP-Werte auf mittlerem Niveau angeglichen haben. Es ist kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Schwermetallindex und der Gesamtluftbelastung mehr feststellbar. Daraus lässt sich schliessen, dass die Schwermetalle für die Gesamtbelastung der Luft möglicherweise an Bedeutung verloren haben.

Die Immissionen der Schadstoffe Stickstoffdioxid, Ozon und Feinstaub sowie der Schwermetalle weisen gesamtschweizerisch seit 1990 eine tendenziell abnehmende Entwicklung auf - seit etwa 2000 allerdings stagnieren diese Werte. Grenzwertüberschreitungen von Stickstoffdioxid (NO₂), Feinstaub PM₁₀ und Ozon treten weiterhin auch in Appenzell Ausserrhoden auf.

Die Schadstoffkarte des BAFU zeigt für 2000 in den Grossräumen Luzern und Thurgau-St.Gallen-Appenzell die schweizweit höchsten Belastungen durch Ammoniak. 2007 ist das Immissionsmuster ähnlich, die Intensität der Belastung hat aber zwischen 2000 und 2007 gesamtschweizerisch zugenommen, insbesondere im Schweizer Mittelland. Im Untersuchungsgebiet liegen die modellierten Werte teilweise deutlich über den international von den Fachleuten diskutierten Grenzwerten von 3 µg/m³ für höhere Pflanzen und massiv über dem Grenzwert für Flechten von 1µg/m³.

Der Zusammenhang zwischen Flechten und den modellierten Immissions- und Klimadaten hat sich in den letzten 20 Jahren gewandelt. Es gibt keine konstante, über die Zeit gleichbleibende Abhängigkeit der Flechten von den modellierten Immissions- und Klimadaten, die Gewichte der Faktoren haben sich verschoben.

Als Hauptursache für die Veränderungen werden die Luftschadstoffe betrachtet. Methodische Fehler in der Untersuchung sowie natürliche Prozesse können mit einiger Sicherheit ausgeschlossen werden.

Auf langfristige Veränderungen des Klimas (Erwärmung) scheinen die Flechten bislang nicht nachhaltig zu reagieren. Der in der Flechtenuntersuchung im Fürstentum Liechtenstein 2009 beschriebene Zusammenhang zwischen Klimaänderungen und Flechtenrückgang konnte nicht festgestellt werden. Allerdings beeinflussen lokal wirksame klimatische Verhältnisse wie Inversionslagen oder die Hauptwindrichtung die Luftbelastung, sie begünstigen die Konzentration bzw. Deposition von Schadstoffen.

Schlussfolgerungen

Trotz der erfolgreichen Massnahmen zur Senkung der Luftbelastung zeigt die Flechten-Luftgütekarte 2010 keine weitere Verbesserung der Verhältnisse von 2000, während von 1991 bis 2000 noch deutliche Erfolge verzeichnet werden konnten. Die Frequenzzahl der Flechtenarten hat sich auf mittleren bis geringen Belastungswerten nivelliert.

Klare Verbesserungen über die letzten 20 Jahre zeigen sich in den stark verkehrsgeprägten Siedlungsgebieten. Dies ist ein Erfolg der Emissionsminderung bei den Motorfahrzeugen, vor allem durch den Katalysator bei den benzinbetriebenen Personenwagen. In den ländlichen Gebieten hat sich die Flechtenvegetation vielerorts verschlechtert. Der Verlust der Flechtenvielfalt vor allem von empfindlichen Arten weisen auf eine erhöhte Grundbelastung der Luft hin.

Die Messung der Einzelstoffbelastung der Flechten ergibt einen Rückgang der Belastung mit Metallen, Stickstoff und Schwefel seit der Untersuchung 1991. Hier zeigen besonders auch die umgesetzten lokalen Massnahmen in Industrie, Gewerbe und bei den privaten Feuerungen positive Wirkung.

Der hohe Nitroindex der Flechtenauswertungen bestätigt die nach wie vor starke Eutrophierung in Appenzell Ausserrhoden. Dieselbe Tendenz ist auch in anderen untersuchten Gebieten des Schweizer Mittellandes festzustellen.

Die Anstrengungen zur Reduktion der Ammoniakemissionen müssen weiter verfolgt werden, denn die starke Eutrophierung hält in der ganzen Schweiz an und ist verantwortlich für den Rückgang zahlreicher Arten, nicht nur von Flechten, sondern auch von Pflanzen und Tieren.

1. Einleitung

1.1 Flechten als Bioindikatoren

Baumbewohnende Flechten sind Zeiger der Luftverschmutzung, denn sie sind empfindlich gegenüber Luftschadstoffen. Die Flechten werden von einer Lebensgemeinschaft zwischen einem Pilz und einer Alge gebildet. Die symbiotische Beziehung zwischen den beiden Lebewesen ist komplex und in einem labilen Gleichgewicht. Flechten reagieren daher besonders sensibel auf eine Veränderung der Umweltbedingungen. Weil sich Flechten ausserdem praktisch ausschliesslich von Stoffen und Gasen aus Regen, Nebel und Luft ernähren, unterstehen sie dem direkten Einfluss der Schadstoffe.

Je stärker die Belastung der Luft, desto weniger Flechten vermögen sich zu bilden und die Rinde von Baumstämmen zu besiedeln. Das Vorkommen vieler verschiedener Arten von Flechten in einem Gebiet lässt auf eine gute Qualität der Luft schliessen, kahle Rinden hingegen weisen auf eine hohe Schadstoffbelastung hin. Die kalibrierte Flechtenindikationsmethode (siehe Kap. 3.1.2) bietet die Möglichkeit, die Gesamtluftbelastung flächendeckend abzubilden.

1.2 Bisherige Untersuchungen

Appenzell Ausserrhoden hat eine langjährige Erfahrung mit Flechten als Bioindikatoren zur Beurteilung der Luftbelastung im Kanton. Mit den zwei bisherigen Untersuchungen 1991 und 2000 konnten wichtige Erkenntnisse über die räumliche Struktur und die Entwicklung der Luftbelastung sowie über wesentliche Quellen erlangt werden. 2010 sollen die Veränderungen in räumlicher und zeitlicher Dimension erneut erfasst werden.

Ein verstärktes Augenmerk gilt heute auch der Ammoniakbelastung. Die Bioindikation mit Flechten verspricht hier neue Möglichkeiten, da Flechten unterschiedlich sowohl auf die Düngewirkung als auch auf die Säure-Basen-Verhältnisse in der Luft reagieren. Als Mass zum Nachweis dieser Wirkungen dienen der Nitro- und der Acidoindex, welche seit einigen Jahren routinemässig in den Flechtenuntersuchungen erhoben werden. Von Interesse ist insbesondere der Nitroindex, welcher Hinweise zur Stickstoffbelastung gibt.

1.3 Untersuchung 2010

Die vorliegende Untersuchung wiederholt die Flechtenerhebungen in Appenzell Ausserrhoden, so dass die Entwicklung seit 1991 räumlich und zeitlich aufgezeigt werden kann. Die Erhebung 2010 und die Analyse erfolgten nach derselben Methode wie die Untersuchungen von 1991 und 2000, wodurch die Resultate direkt vergleichbar werden.

1.4 Wirkungskontrolle

Wiederholungen von Untersuchungen mit Flechten sind ein Instrument zur Wirkungskontrolle von lufthygienischen Massnahmen, die gemäss Luftreinhalte-Verordnung (LRV) und den kantonalen Massnahmenplänen umgesetzt wurden. Durch die Flechtenmethode können die Auswirkungen der Massnahmen auf die Luftqualität anschaulich und flächendeckend dargestellt werden. Wiederholte Flechtenuntersuchungen erlauben eine langfristige Wirkungskontrolle.

2. Ziele

Nach 1991 und 2000 soll eine erneute Untersuchung der Flechtenvegetation in Appenzell Ausserrhoden den Zustand der Luftbelastung ermitteln. Die Entwicklung der Gesamt-Luftbelastung in den letzten 20 Jahren soll aufgezeigt und vergleichend interpretiert werden.

Die **Oberziele** der Untersuchung sind:

- die Bereitstellung von Grundlagen für die Ausrichtung der Luftreinhaltung im Kanton Appenzell Ausserrhoden und
- die Durchführung einer Erfolgskontrolle nach 20 Jahren Luftreinhaltung.

Die **Projektziele** sind:

- die räumliche Abbildung der Gesamtbelastung durch Luftschadstoffe in ausgewählten Gebieten des Kantons,
- die Darstellung der Entwicklung der allgemeinen Luftbelastung von 1991 bis 2010,
- das Erkennen von speziellen Belastungssituationen und -quellen,
- die Darstellung der Entwicklung von umweltrelevanten Elementen, insbesondere der Schwermetalle,
- die Erfassung der Belastung durch Stickstoffverbindungen in landwirtschaftlich geprägten Gebieten, unter anderem als Grundlage für die Wirkungskontrolle im Rahmen des Ressourcenprogramms Ammoniak.

3. Gesamtbelastung

3.1 Methode

3.1.1 Lebewesen Flechte

Flechten sind so unscheinbar, dass wir sie kaum wahrnehmen oder einfach als zur Unterlage gehörig übersehen. Trotzdem begegnen sie uns überall, u.a. auf Baumrinden oder Mauern.

Flechten sind eine Lebensgemeinschaft, die als Symbiose bezeichnet wird. Sie bestehen aus den feinen Fäden eines Pilzes und den Kugeln einer Alge. Der Pilz umflieht die Alge und bildet das Stützgewebe, das für die jeweilige Flechtenart formgebend ist. Die Alge baut mit Hilfe von Sonnenenergie aus Wasser und Kohlendioxid (CO₂) auf. Ihre Stoffwechselprodukte liefert sie teilweise dem Pilz, der selbst nicht zur Photosynthese fähig ist.

Flechten bilden keine Wurzeln, sondern feine Haftfasern, mit denen sie sich auf ihrer Unterlage festhalten. Die Nährstoffe entnehmen sie der Luft, dem Regen, Nebel und Schnee. Schädliche und giftige Stoffe werden damit ebenso aufgenommen und haben eine direkte Wirkung auf die Gesundheit der Flechte. Weil die Symbiose als labiles Gleichgewicht zwischen beiden Partnern funktioniert, ist die Lebensgemeinschaft sehr anfällig für Störungen in Form von Umweltveränderungen.

Flechten, die auf der Rinde von Bäumen siedeln, fügen den Pflanzen keine Schäden zu. Sie sind weder eine Baumkrankheit noch Parasiten, obwohl ihnen dies häufig - zu Unrecht - unterstellt wird. Nie sind die Flechten der Grund für das Absterben der Bäume. Sie haften nur oberflächlich an Rinden oder anderen Unterlagen und ernähren sich ausschliesslich von der sie umgebenden Atmosphäre.

Die Abhängigkeit der Flechten von der Luft macht sich die Wissenschaft zu Nutze, um mit ihnen als Bioindikatoren auf den Grad der Luftverschmutzung zu schliessen. Je stärker die Luft mit Schadstoffen belastet ist, desto weniger Flechten überleben und können die Baumstämme besiedeln. Wachsen hingegen viele verschiedene Flechtenarten in einem Gebiet, weist dies auf eine gute Qualität der Luft hin.

3.1.2 Kalibrierte Flechtenindikationsmethode

Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms 14 „Lufthaushalt und Luftverschmutzung in der Schweiz“ wurde am Systematisch-Geobotanischen Institut der Universität Bern eine speziell an die Verhältnisse im Schweizer Mittelland angepasste Flechtenindikationsmethode zur Erfassung der Luftverschmutzung entwickelt (Urech et al. 1991). Die Methode wurde mit technischen Messdaten geeicht und wird deshalb als „Kalibrierte Flechtenindikationsmethode“ bezeichnet.

Räumlich ist die Flechtenindikationsmethode im Schweizer Mittelland in waldfreien Gebieten unterhalb von etwa 1'000 m ü. M. anwendbar. Die Anzeige der Luftbelastung durch die Flechtenvegetation erfolgt mit einer Verzögerungszeit von 1 bis 3 Jahren. Die Flechten geben also die Belastungssituation der letzten Jahre wieder: Damit entsprechen die Untersuchungsergebnisse dem Integral der Gesamtluftbelastung und beinhalten ebenfalls Spitzenbelastungen.

Die Methode basiert auf einer einmaligen Auszählung der Vielfalt und Häufigkeit der Flechten auf ausgewählten, freistehenden Laubbäumen. Zur Bestimmung des Flechtenindex' IAP18 (Index of Atmospheric Purity) muss keinerlei Material entnommen werden, die Flechten bleiben unversehrt.

Ideale Trägerbäume stehen frei, sind ausserdem senkrecht gewachsen und weisen eine ungestörte Aufnahme­fläche vor, die nicht von tiefhängenden Ästen beschattet wird. Winter- und Sommerlinde, Eschen und Spitzahorne werden aufgrund ihrer Rindenbeschaffenheit bevorzugt. In zweiter Linie kommen auch Eichen, Bergahorne und nicht einheimische Linden als Trägerbäume in Frage.

Die kalibrierte Flechtenmethode erfasst die Flechtenvegetation innerhalb einer standardisierten Aufnahme­fläche am Baum. Diese ist durch ein Frequenzgitter begrenzt (Abb. 1, nächste Seite). Das Frequenzgitter besitzt eine Höhe von 50 cm, umfasst den halben Stammumfang und wird immer in Richtung des grössten Flechtenbewuchses am Baum befestigt. Die Aufnahme­fläche ist daher je nach Umfang des Baums unterschiedlich breit. Am selben Baum sind die 10 Flächen des Frequenzgitters alle gleich gross.

Zur Ermittlung der Frequenz einer bestimmten Flechtenart oder –gruppe werden die Felder im Gitter gezählt, in denen diese auftritt. Die Frequenzzahl der Art kann daher einen Wert zwischen 0 (d.h. die Art ist nicht vorhanden) und 10 (d.h. die Art ist in allen Feldern vorhanden) annehmen. Der IAP18-Wert¹ eines Trägerbaumes ist schliesslich die Summe der Frequenzen aller berücksichtigten Flechtenarten. Dieser Flechtenwert charakterisiert die Luftgüte aufgrund der Häufigkeit von über 40 Flechtenarten und –artengruppen pro Aufnahme­fläche aller un-

¹ Der IAP18 wird im Schweizer Mittelland angewendet. Im Bündner Rheintal und im Fürstentum Liechtenstein gelangt der IAPBR zur Anwendung. Beide IAP-Werte sind auf die jeweiligen Räume optimiert. Sie unterscheiden sich bezüglich der berücksichtigten Flechtenarten: Rund 80% sind identisch, bei beiden sind einzelne Flechten drin, welche bei der andern Methode fehlen. Beim IAP18 sind einige Flechten zu Gruppen zusammengefasst, welche beim IAPBR einzeln erfasst werden. Der IAPBR erfasst insgesamt mehr Flechtenarten und hat daher auch einen grösseren Wertebereich als der IAP18.

tersuchten Bäume. Einige wenige Flechtenarten werden für die Berechnung des IAP18-Werts nicht berücksichtigt, da ihre biologischen Eigenschaften dessen Aussage über die Luftgüte verfälschen.

Abb. 1:
Das Frequenzgitter wird so an die Stammfläche angebracht, dass 10 gleich grosse Felder entstehen



3.1.3 Flechtenuntersuchung 2010

Die Flechtenerhebung 2010 wurde analog zur Untersuchung 2000 durchgeführt. In den Gebieten Urnäsch, Herisau, Teufen, Speicher, Bühler, Gais und Heiden wurden die Flechtendaten auf einer Fläche von rund 82 km² (Abb. 5, Seite 15) erhoben.

Der Flechten-Luftgütewert IAP18 wurde nach Möglichkeit an den selben Bäumen wie 2000 mit der identischen Methode ermittelt. Von den ursprünglich 495 kartierten Bäumen mussten 186 (38%) ersetzt werden, da sie gefällt, eingewachsen oder aus anderen Gründen für die Methode nicht mehr geeignet waren. Der Anhang 1 enthält die Flechtendaten sämtlicher 2010 untersuchten Bäume.

Die Flechtenwerte der einzelnen Bäume wurden in Gruppen von in der Regel fünf Bäumen zu einem Mittelwert verrechnet. Diese Baumgruppen wurden innerhalb von geographisch einheitlichen Räumen, so genannten Georäumen, gebildet. Durch die ähnlichen geographischen Bedingungen innerhalb eines Georaum darf dort mit derselben Wirkung der Gesamtluftbelastung auf die Flechten gerechnet werden. Für das untersuchte Gebiet ergaben sich 90 Georäume. Die Angaben zu ihrer Lage und ihrem Mittelwert sind im Anhang 2 enthalten.

3.2 Veränderung der Luftgüte

Die Luftgütekarte basiert auf den IAP18-Werten pro Georaum und zeigt die Wirkung der Gesamt-Luftbelastung auf die Flechten.

Durch lineare Interpolation werden die Zonengrenzpunkte auf der Verbindungsgerade zwischen zwei Georäumen ermittelt. Punkte gleicher Klassen werden anschliessend zu Polygonen verbunden und die Klassengrenzen als Isolinien dargestellt.

Die Karte zeigt fünf Zonen mit unterschiedlich starker Beeinträchtigung der Flechten. Die Zone der kritischen Luftbelastung findet sich 1991 noch im Referenzgebiet St. Gallen, 2000 und 2010 wurde sie in Appenzell Ausserrhoden erfreulicherweise nicht mehr festgestellt. Die Zonen sind Ausdruck der Luftgüte und werden wie folgt interpretiert:

Tab. 1:
Zoneneinteilung
der Luftgütekarte

Flechtenzone	Gesamtluftbelastung	IAP18-Wert	Farbe
Flechtenwüste	kritisch	0 bis 18.6	rot
Innere Kampfzone	stark	18.6 bis 31.7	orange
Äussere Kampfzone	mittel	31.7 bis 44.8	gelb
Übergangszone	gering	44.8 bis 57.9	grün
Normalzone	sehr gering	57.9 bis 70.0	blau
Optimalzone	sehr gering	> 70.0	hellblau

Die Zonengrenzen markieren Übergangsbereiche und stellen daher nicht einen exakten Grenzverlauf dar. Der Verlauf der Isolinien im Randbereich ist eine Annäherung, da im angrenzenden Raum keine Information durch Referenzpunkte zur Verfügung steht. Der äussere Perimeter des Untersuchungsgebiets entspricht der Grenze von 1991.

3.2.1 Luftgütekarte 1991

Die Karte weist für das Untersuchungsgebiet fünf Flechtenzonen aus (Abb. 3, Seite 13), die Gesamtbelastung reicht von sehr gering bis kritisch.

Das einzige Gebiet mit kritischer Luftbelastung ist in der Stadt St. Gallen zu finden. Die Siedlungsgebiete von Herisau und Teufen sind stark belastet. In der näheren Umgebung dieser beiden Ortschaften sowie in den Gebieten Waldstatt, Hundwil, Wiederteufen, Bühler Gais, Grub, Heiden Bischofsberg und östlich von Walzenhausen besteht eine mittlere Gesamtbelastung der Luft. Sehr geringe Belastungen finden sich grossflächig im Gebiet Trogen Wald Rehetobel, ausserdem bei Heiden, Reute, Wienacht Tobel, Gais Rotenwis, Teufen Waldegg, Herisau Rechberg, Schwellbrunn und Urnäsch. In der übrigen Region herrscht eine geringe Gesamtluftbelastung vor: Diese Zone besitzt 1991 den grössten Flächenanteil.

3.2.2 Luftgütekarte 2000

In den Jahren von 1991 bis 2000 hat sich die Gesamtluftbelastung in den untersuchten Gebieten verbessert (Abb. 4, Seite 14). Die Zone der starken Belastung findet sich noch in St. Gallen. Die Siedlungsgebiete von Herisau, Teufen und Gais liegen 2000 in der Zone mittlerer Belastung. Eine hohe Luftqualität besteht in den Gebieten Herisau Rechberg, über die Eggen bei Teufen, grossflächig von Speicherschwendi über Speicher, Bühler, Gais bis an die Kantonsgrenze zum St. Galler Rheintal sowie bei Heiden. Den grössten Flächenanteil besitzt nach wie vor die Zone der geringen Belastung.

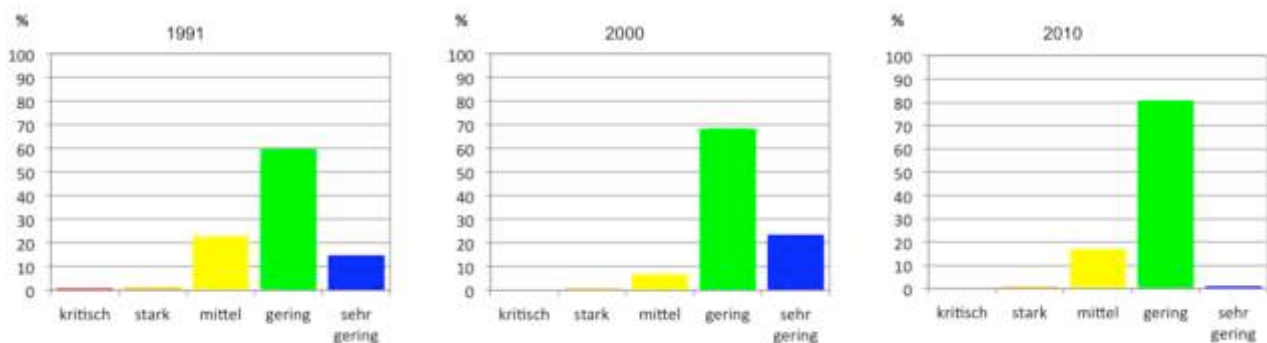
3.2.3 Luftgütekarte 2010

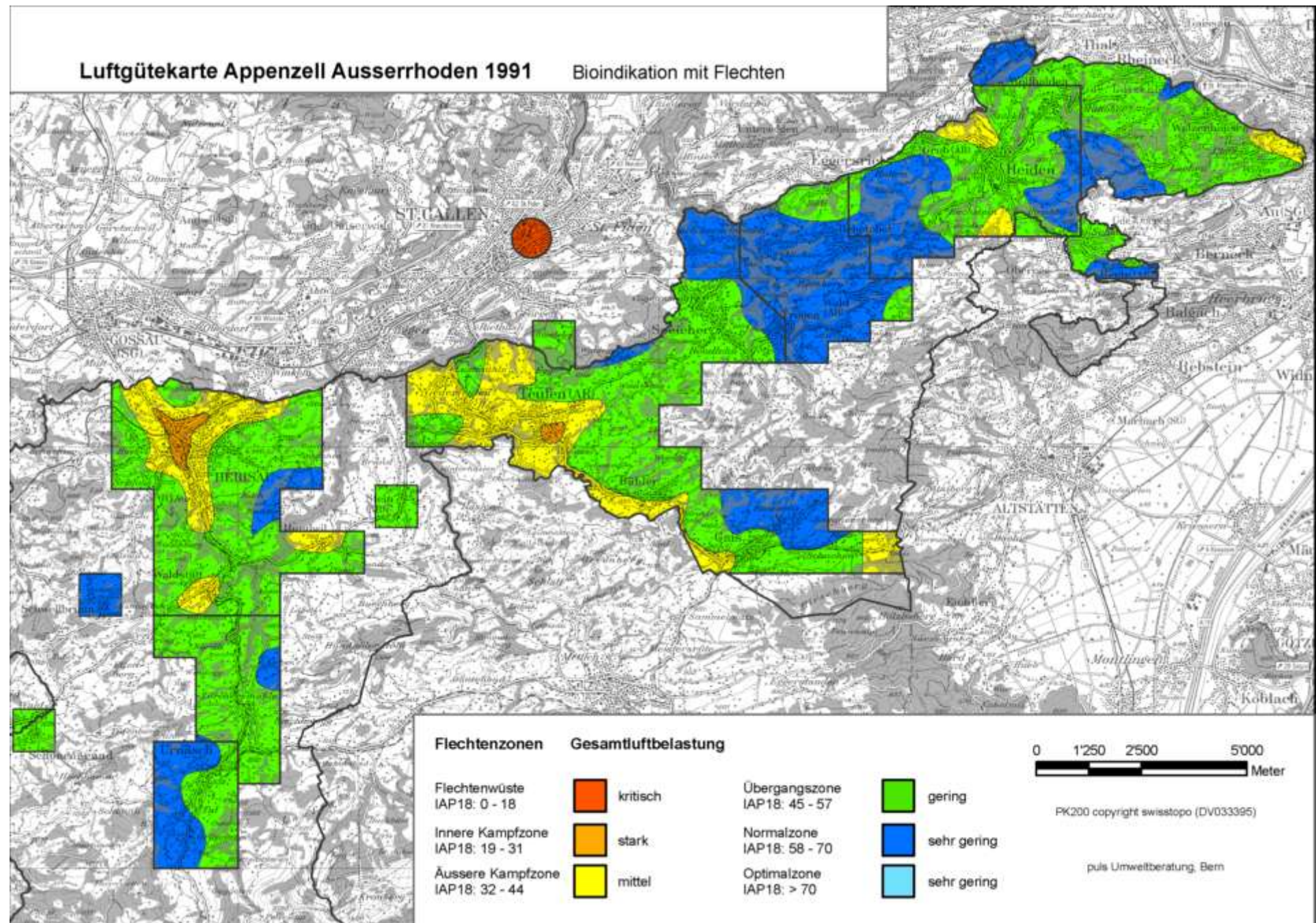
Neunzehn Jahre nach der Ersterhebung 1991 dominieren nur noch die zwei mittleren Belastungsklassen. Sowohl die starken wie auch die sehr tiefen Gesamtbelastungen sind verschwunden (Abb. 5, Seite 15). Die grösste Fläche nimmt wie 1991 und 2000 die Zone der geringen Luftbelastung ein. Die mittlere Belastung hat sich im Bereich der Siedlungsgebiete ausgedehnt; sie herrscht mittlerweile auch in den Gebieten Urnäsch, Teufen und Speicher vor. Sehr gering belastete Gebiete finden sich nur noch kleinräumig bei Wolfhalden und Wald. Eine starke Belastung besteht immer noch in St. Gallen. Zonen mit kritischer Gesamtbelastung sind allerdings auch heute nicht festzustellen.

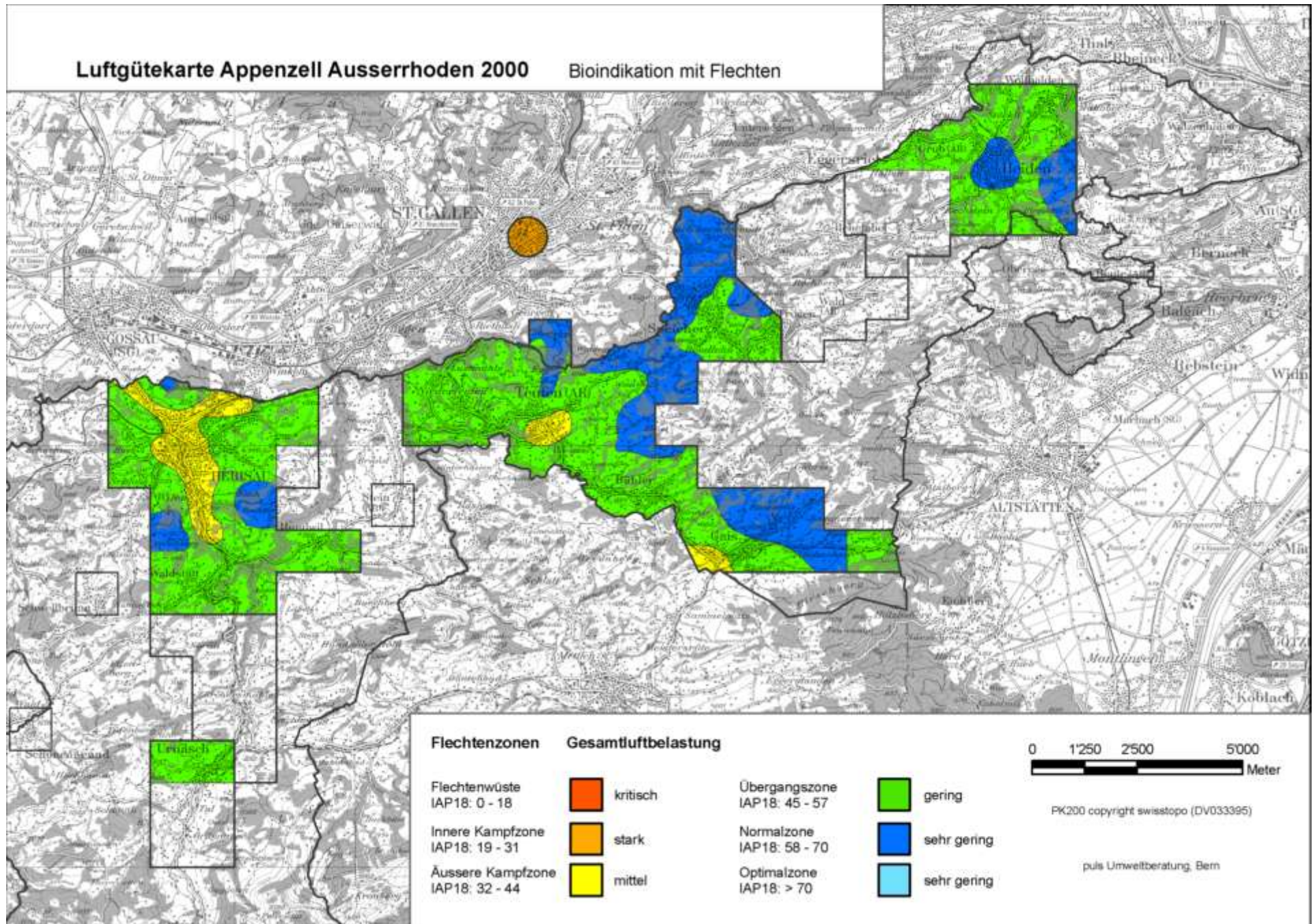
3.2.4 Flächenanteile der einzelnen Zonen

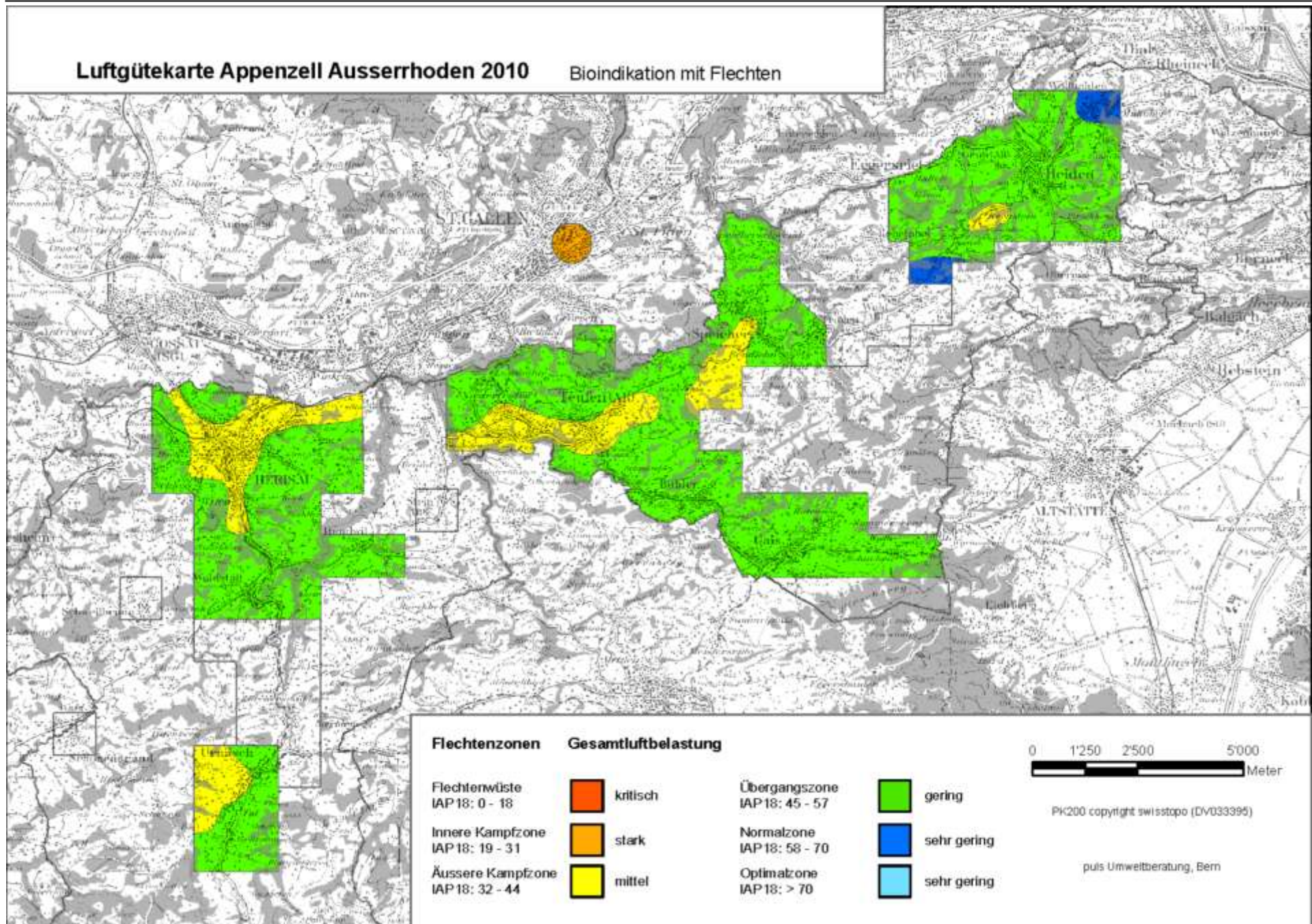
Abbildung 2 stellt die Flächenanteile der verschiedenen Belastungszonen für die Jahre 1991, 2000 und 2010 in Prozent zur Gesamtfläche (gemeinsamer Untersuchungsbereich) dar: Die Flächen von Zonen mit sehr hohen Belastungen (stark-kritisch) sowie die Zone sehr geringer Belastung haben seit 1991 zugunsten der geringen und der mittleren Belastung abgenommen. Die Luftgütewerte scheinen sich auf einer geringen bis mittleren Gesamtbelastung zu nivellieren. Die Optimalzone mit einer unbelasteten Flechtenvegetation konnte im Untersuchungsgebiet nicht ausgeschieden werden.

Abb. 2:
Verteilung der Flächenanteile einzelner Belastungszonen in Prozent; links 1991, Mitte 2000, rechts 2010









3.3 Differenzkarten von 1991 bis 2010

3.3.1 Differenzkarte 1991 bis 2010

Die Karte stellt die Differenz zwischen den Luftgütwerten von 1991 und 2010 dar (Abb. 6, Seite 18) und visualisiert damit die räumliche Veränderung der Luftbelastung in diesem Zeitraum. Negative Differenzen weisen Verschlechterungen, positive Differenzen Verbesserungen der Luftqualität aus.

Die Differenzen werden in fünf Zonen gleicher Veränderung unterteilt. Die Klassenbreite einer Differenzzone entspricht einer halben Klassenbreite der Luftgüte zonen und umfasst rund 6.6 IAP18-Punkte. Folgende Differenz zonen werden gebildet:

Tab. 2: Zoneneinteilung der Belastungsveränderung

Veränderung	IAP18-Differenz	Farbe
Sehr starke Verbesserung	> 16.3	Dunkelblau
Starke Verbesserung	9.9 bis 16.3	Mittelblau
Verbesserung	3.4 bis 9.8	Hellblau
Keine wesentliche Veränderung	-3.3 bis 3.3	Grau
Verschlechterung	-9.8 bis -3.4	Hellrot
Starke Verschlechterung	-16.3 bis -9.9	Mittelrot
Sehr starke Verschlechterung	< -16.3	Dunkelrot

Stark bis sehr stark verbessert haben sich die Verhältnisse im Verkehrsbereich Herisau, Teufen Lustmühle und Bühler. Leichte Verbesserungen der Luftqualität zeigen sich in den Bereichen Waldstatt, Teufen Bühler, Stoss, nördlich von Heiden sowie im Bereich Wolfhalden und im Referenzgebiet St. Gallen.

Verschlechterungen finden sich im Landwirtschaftsgürtel um Herisau, in Teufen Gmünden, Gais Rotenwies, im Grossraum Speicher, zwischen Rehetobel und Heiden sowie südöstlich von Wolfhalden. Im Gebiet Urnäsch hat sich die Belastungssituation in den vergangenen rund 20 Jahren stark bis sehr stark verschlechtert. In den übrigen Bereichen ist keine wesentliche Veränderung feststellbar.

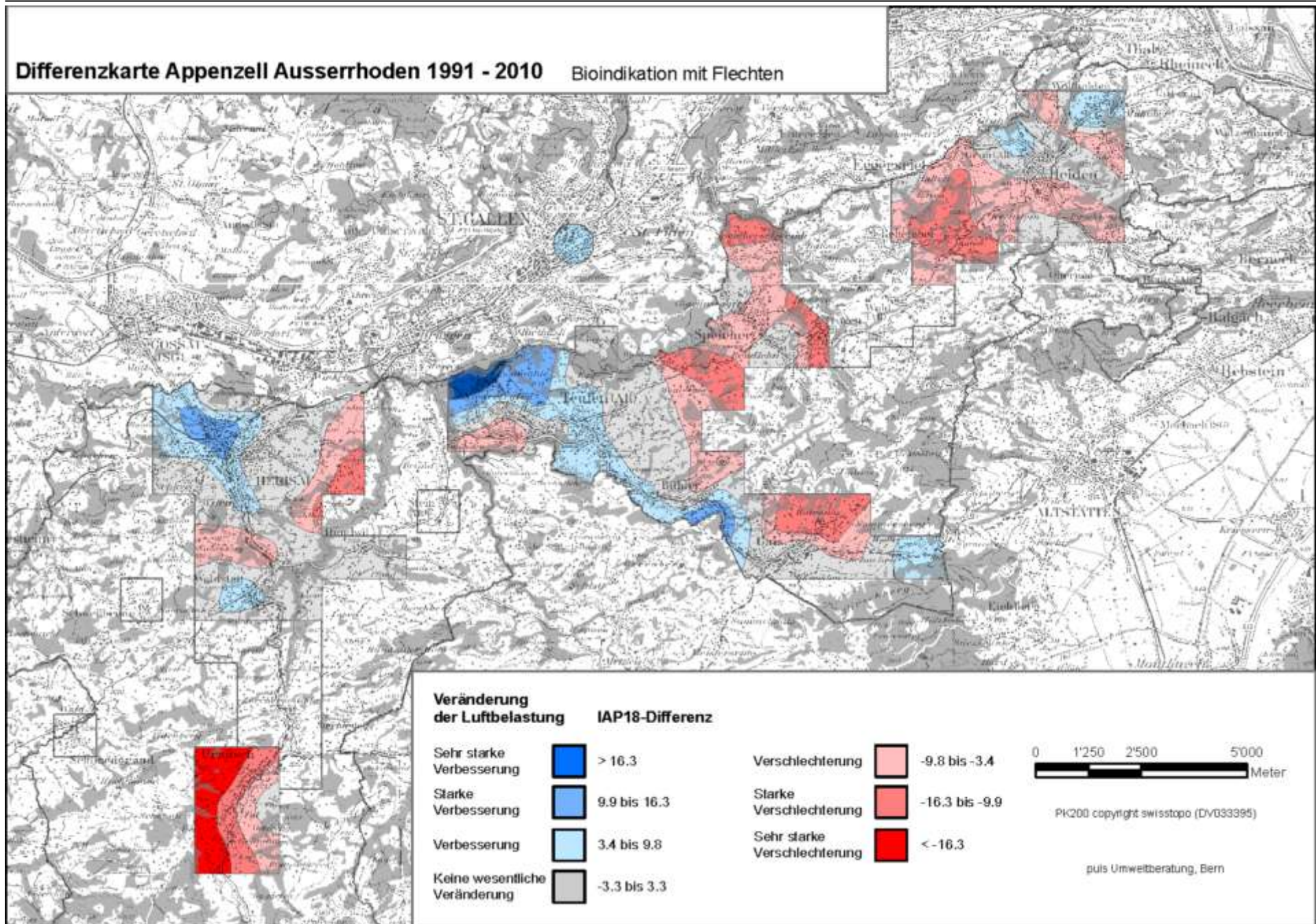
Verbesserungen der Gesamtbelastung haben sich damit fast ausschliesslich in Gebieten mit vormals starker Belastung ergeben. Im Gegensatz dazu haben vorher wenig belastete Gebiete tendenziell eine Verschlechterung erfahren.

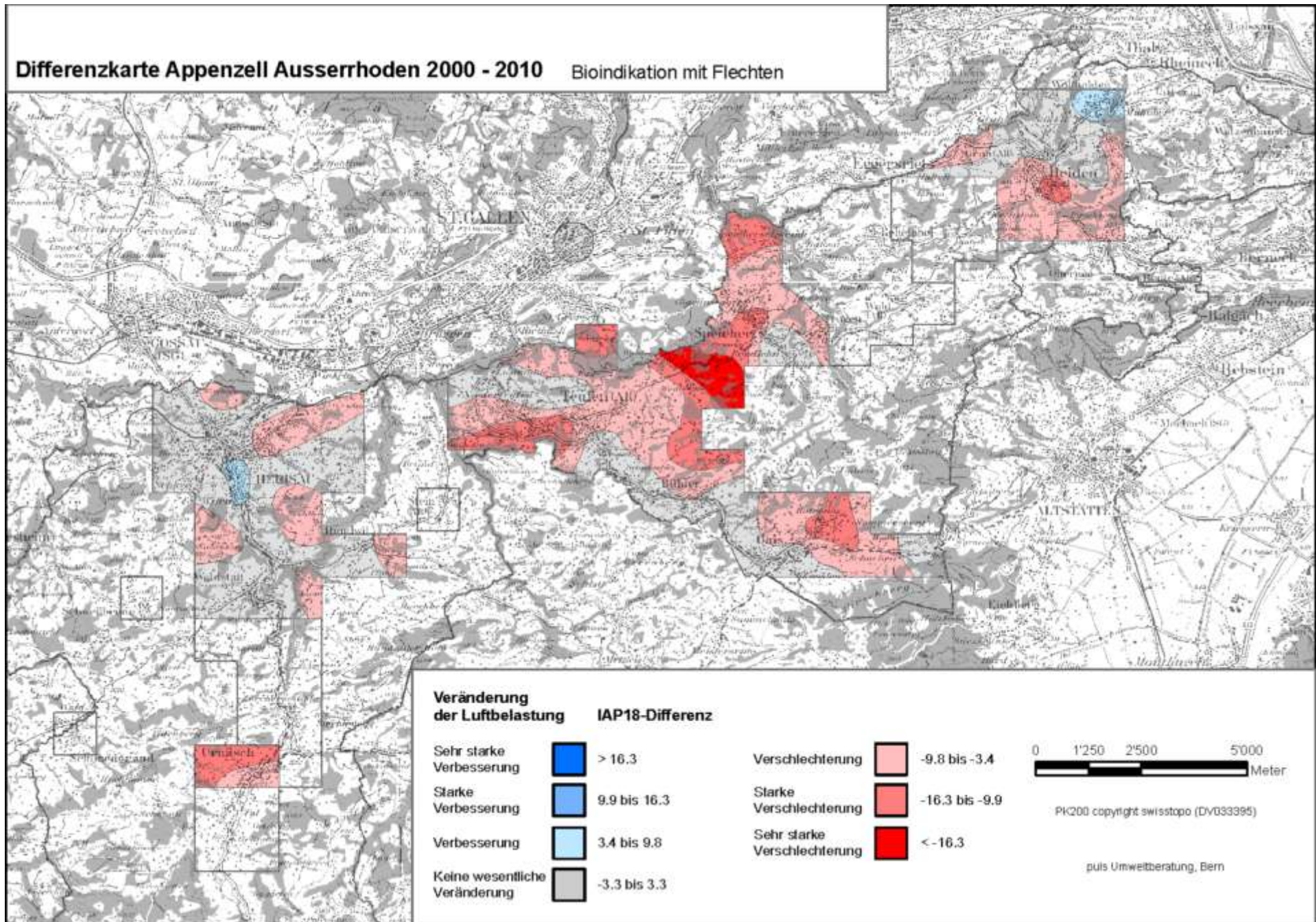
3.3.2 Differenzkarte 2000 bis 2010

Die Karte stellt die Differenz zwischen den Luftgütwerten von 2000 und 2010 dar (Abb. 7, Seite 19). Die Darstellung der Differenzen und ihrer Zoneneinteilung entsprechen derjenigen der Differenzkarte von 1991 bis 2010 (siehe Tab. 2).

Von 2000 bis 2010 hat sich kleinräumig in Herisau und in Wolfhalden eine leichte Verbesserung der Verhältnisse eingestellt. In weiten Teilen des Untersuchungsgebiets hat sich die Situation kaum geändert oder leicht verschlechtert, ebenso im Referenzgebiet St. Gallen.

Von starken Verschlechterungen sind die Gebiete Urnäsch, Teufen Gmünden bis Eggli, zwischen Teufen Bühler und Speicher und Heiden betroffen. Im Grossraum Speicher haben sich die Verhältnisse sogar sehr stark verschlechtert.





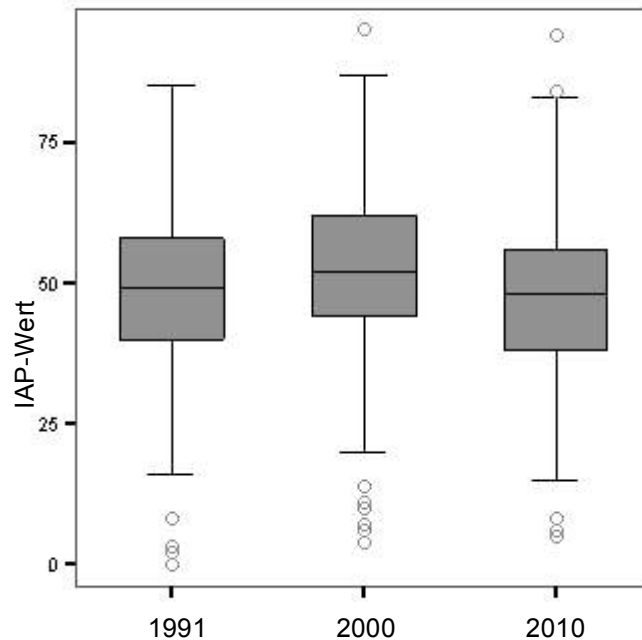
3.4 Veränderung des Luftgütewerts IAP18

3.4.1 Luftgüte 1991, 2000 und 2010 pro Georaum

Abb. 8:

Boxplot-Darstellung der IAP-Werte pro Georaum (nur identische Georäume 1991 - 2010)

Eine Erläuterung zur Boxplot-Darstellung findet sich bei Abb. 27 auf Seite 45



Die Abbildung 8 stellt für 1991, 2000 und 2010 die IAP-Werte der identischen Georäume dar. Das breiteste Wertespektrum findet sich 1991. Im Jahr 2000 ist der IAP-Mittelwert höher, das Spektrum hingegen kleiner. Die Abweichung der Ausreisser ist 1991 und 2000 ähnlich, 2010 hingegen gibt es grössere Ausreisser. 2010 ist Niveau unter dasjenige von 1991 gesunken, das Hauptspektrum (Innerquartilbereich) ist klein.

3.4.2 Luftgütewerte im Vergleich

Abb. 9:

Vergleich der IAP-Werte zwischen 1991 und 2010

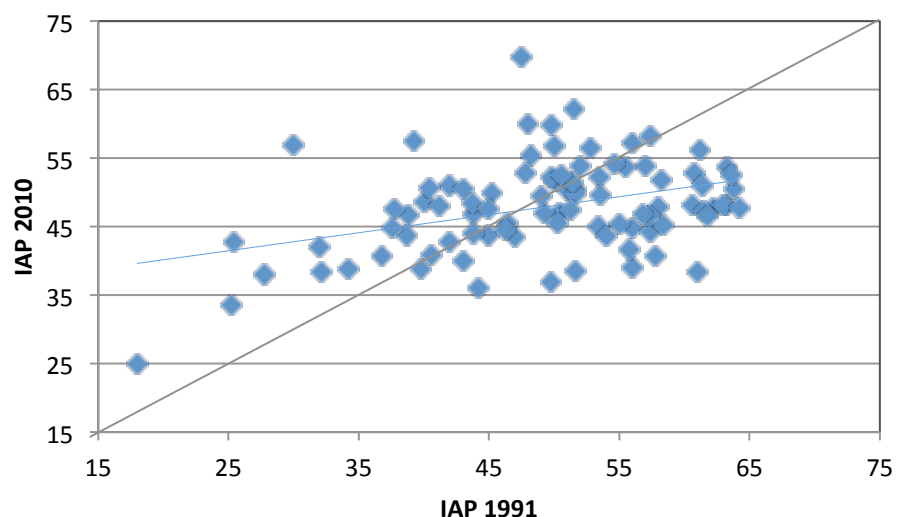


Abbildung 9 stellt für alle Georäume die IAP18-Werte von 1991 und 2010 einander gegenüber. Hätten sich in der Zeit von 1991 bis 2010 die Luftgütewerte nicht verändert, würden alle Punkte auf der grauen Linie liegen. Die Trendlinie (blau) zeigt im Gegensatz dazu die tatsächliche Veränderung der Werte 1991 bis 2010: Vormalig tiefe Luftgütewerte sind heute höher, früher hohe Werte sind heute tiefer. Diese gegenläufigen Verschiebungen und Veränderungen weisen ebenfalls auf eine Nivellierung der Belastungsverhältnisse hin (siehe Kap. 3.2.4).

3.5 Acidoindex

Flechten reagieren artspezifisch auf den Säuregrad des Substrates. Einige Flechtenarten bevorzugen eine saure Unterlage, andere eine basische. Neben dem spezifischen pH-Wert der Baumrinde sind saure bzw. basische Immissionen massgeblich für den Säuregrad des Habitats. In Gebieten, wo die Baumrinden durch Immissionen basisch werden, verschwinden acidophile (Säure liebende) Flechtenarten sukzessive.

Basische Verhältnisse herrschen häufig in ländlich geprägten Regionen, wo die Landwirtschaft als Ammoniak- und Feinstaubemittent wirkt. Saure Verhältnisse entstehen durch die Freisetzung besonders von NO_x und SO₂ bei Verbrennungsprozessen. Saure Immissionen treten daher primär in Industrie- und Siedlungszentren und in verkehrsreichen Gebieten auf.

Der Acidoindex ist Ausdruck des Säuregrads von Immissionen. Er basiert auf dem Verhältnis von acidophilen zu basiphilen (Basen liebenden) Flechtenarten im untersuchten Gebiet und wägt das Auftreten der beiden Flechtengruppen gegeneinander ab. Berechnet wird der Acidoindex entsprechend aus den Frequenzsummen der acidophilen Flechtenarten *Hypogymnia physodes*, *Hypogymnia tubulosa*, *Pseudevernia furfuracea*, *Evernia prunastri* und des halben Summenwerts der Artengruppe *Parmelia glabratula* sowie den Frequenzsummen der basiphilen Arten *Xantoria parietina*, *Physconia distorta*, *Parmelia subargentifera*, *Phaeophyscia orbicularis-Gr.* und des halben Summenwerts der Artengruppe *Physcia adscendens*.

Die Frequenzsumme der fünf basiphilen Arten wird von der Frequenzsumme der fünf acidophilen Arten subtrahiert. Der erhaltene absolute Acidoindex wird pro Georaum gemittelt. Die Division des Acidoindex durch den entsprechenden IAP18-Werts des Georaums relativiert den Wert bezüglich der Gesamtbelastung. Damit kann der Acidoindex auch in Gebieten mit niedrigem IAP18-Wert adäquat hohe Werte annehmen.

3.5.1 Transformierter Acidoindex – eine Anpassung an Appenzell Ausserrhoden

Der Acidoindex im Untersuchungsgebiet ist bereits 1991 basisch geprägt. 2000 und 2010 nimmt diese Tendenz weiter zu. Auf der Standard-Skala erscheinen die Acidoindizes daher beinahe durchwegs positiv, insbesondere eine visuelle Unterscheidung der Werte ist damit schwierig. Um innerhalb des Kantons ein differenzierteres Bild der Säure-Basen-Verhältnisse zu zeichnen, wurde der Standard-Acidoindex linear um den Wert 0.22 transformiert. Dadurch verschiebt sich der Ausgangswert der Skala (schwach basisch geprägte Gebiete erscheinen jetzt sauer, stark basisch geprägte Gebiete weniger stark basisch), die tendenziell sauer geprägten Gebiete sind von den basisch geprägten deutlicher unterscheidbar. Die daraus resultierende Karte erlaubt eine kantonsinterne Interpretation der Immissionsqualität, darf jedoch nicht zum Vergleich mit anderen Untersuchungsgebieten herangezogen werden.

3.5.2 Acidoindex 1991

1991 zeigt das nördliche Untersuchungsgebiet eine leicht saure Prägung (Abb. 10, Seite 25). Die Räume Herisau, Teufen, Speicher und Heiden Wolfhalden, welche südlich an die verkehrsreichen Siedlungs- und Industriezentren Gossau – St. Gallen – Rheineck anschliessen, sind tendenziell sauer geprägt, während die eher ländlichen Regionen im Süden eine basische Prägung aufweisen.

3.5.3 Acidoindex 2000

Auch 2000 sind die nördlichen Gebiete eher sauer, die südlichen Regionen des Untersuchungsgebiet eher basisch geprägt (Abb. 11, Seite 26). Die basische Prägung überwiegt hier allerdings bereits in der gesamten untersuchten Region.

3.5.4 Acidoindex 2010

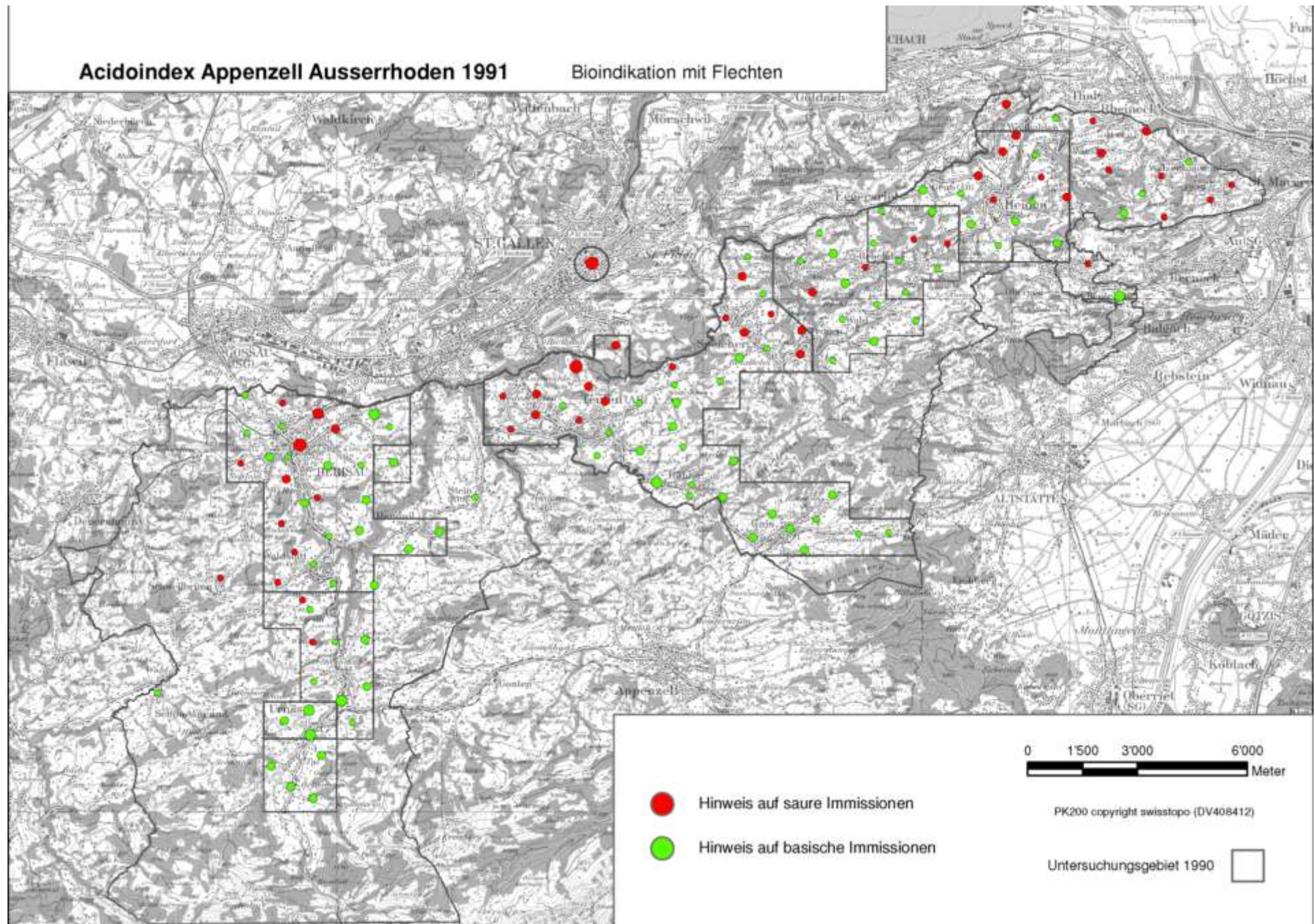
2010 hat sich die basische Prägung des Appenzell Ausserrhoden nochmals verstärkt und scheint heute auf hohem Niveau in kleinen Amplituden zu fluktuieren (Abb. 12, Seite 27). Basische Belastungen dominieren im Untersuchungsgebiet, nur lokal zeigt sich noch eine leicht saure Prägung.

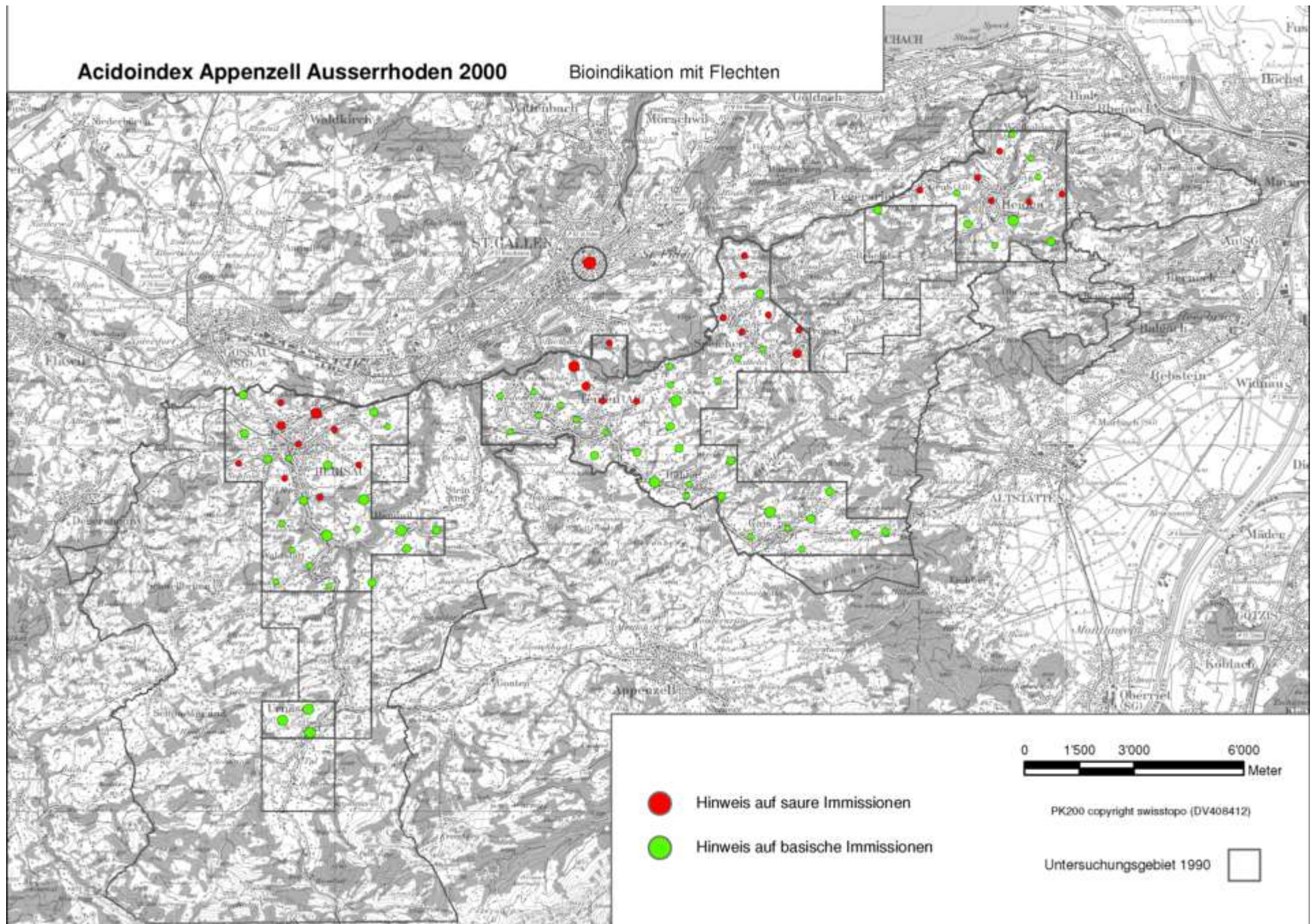
3.5.5 Veränderung des Acidoindex' von 1991 bis 2010

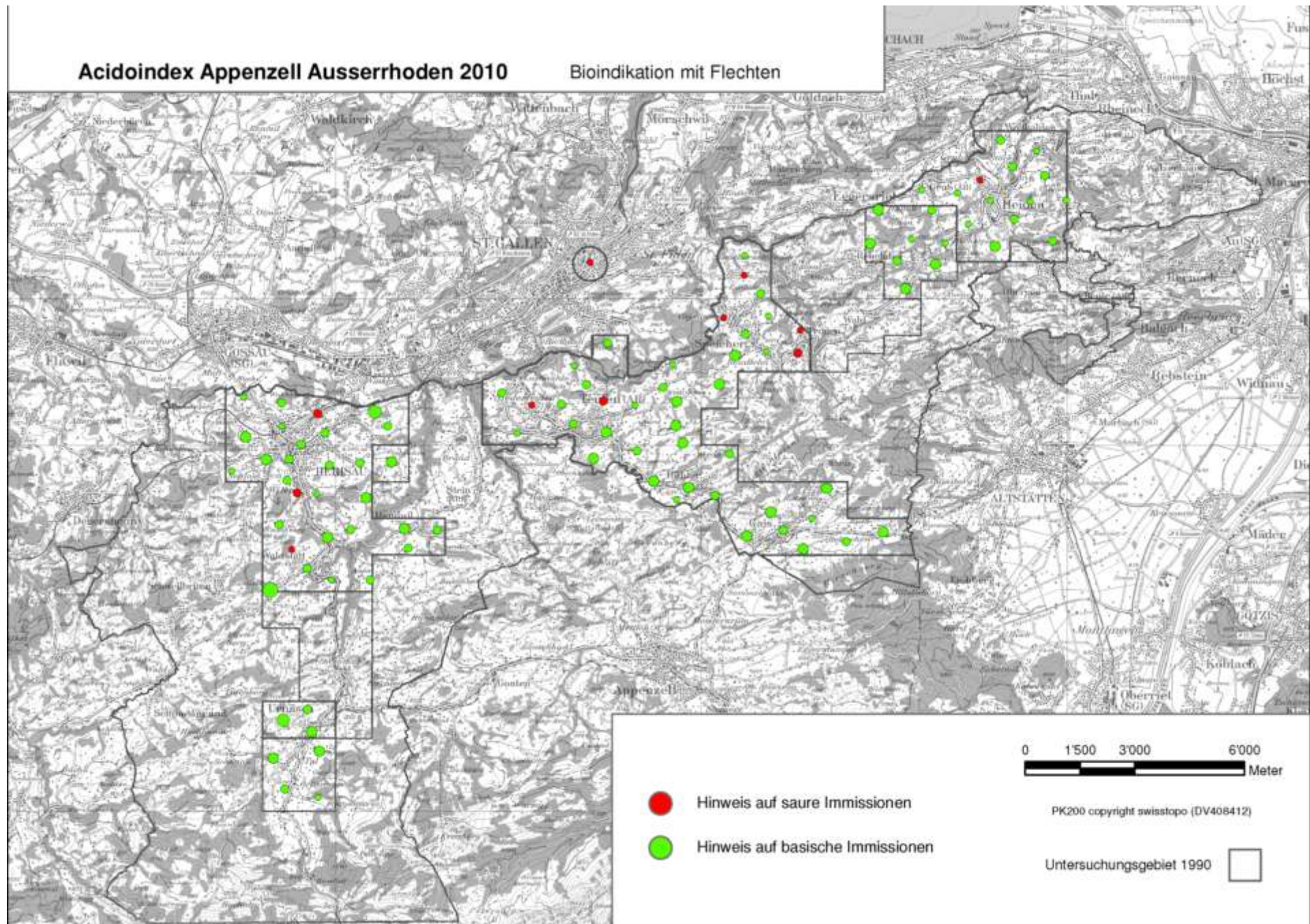
Von 1991 bis 2000 haben zwei Drittel der untersuchten Georäume eine basische Prägung erfahren (Abb. 13, Seite 28). Veränderungen sind lokal: Einige ehemals weniger basisch geprägte Gebiete weisen nun stark basische Immissionen auf, andernorts haben die sauren Immissionen leicht zugenommen. Dies gilt z.B. für Räume in Herisau, Teufen Trogen und Grub, während die ländlichen Gebiete tendenziell eine Zunahme der basischen Verhältnisse zeigen. In der Veränderung des Säuregrads von 2000 bis 2010 ist keine räumlich klare Tendenz erkennbar (Abb. 14, Seite 29), die Prägung ist heute insgesamt noch basischer als 2000. Einige

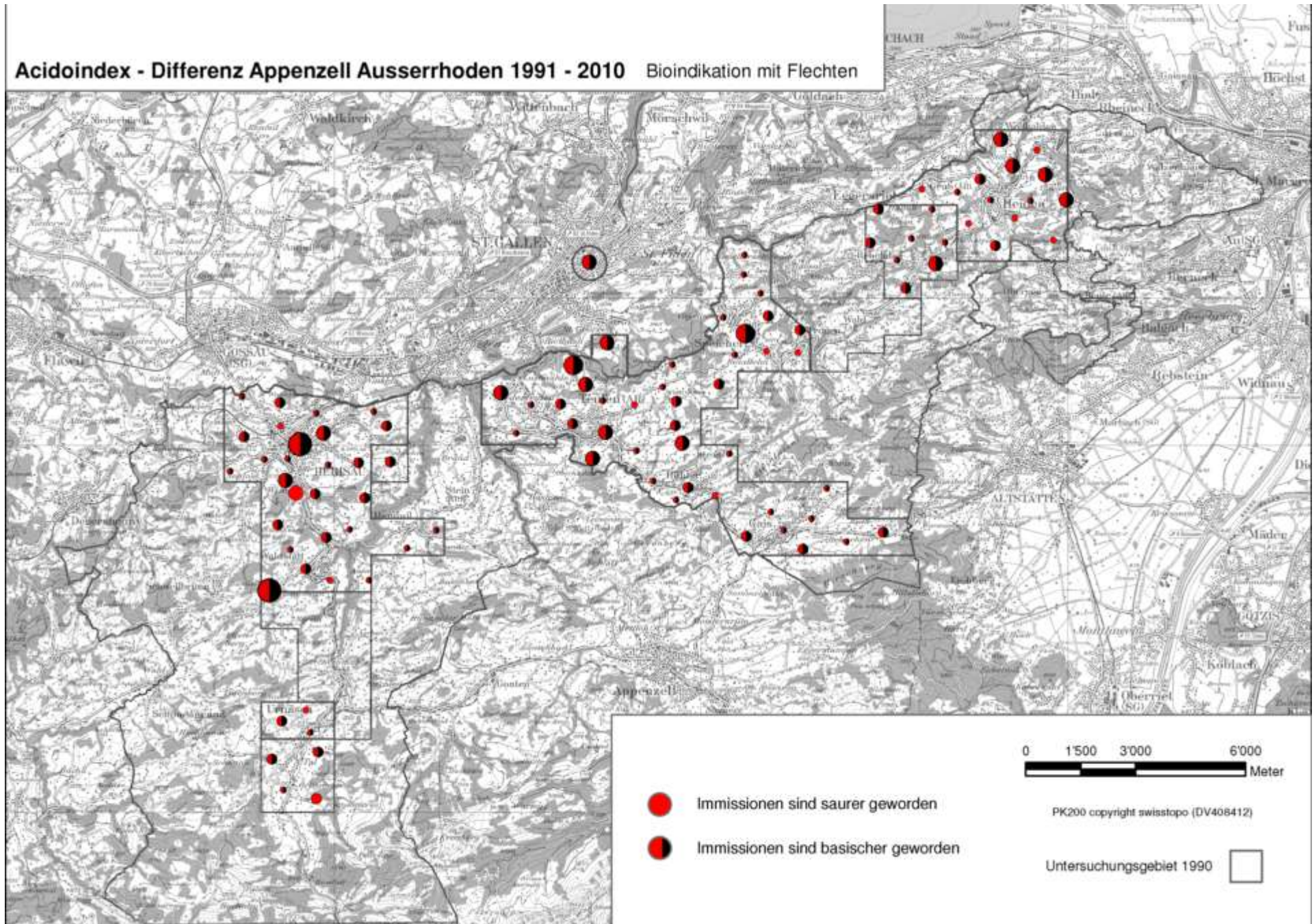
vormals stark basisch geprägte Räume zeigen eine leichte Abnahme der Belastung, einige Gebiete sind unverändert basisch.

Obwohl der pH-Wert durch die Verminderung der NO₂-Emission durch den Verkehr in der Region gestiegen ist (OSTLUFT 2010), ist der Acidoindex nur leicht gesunken. Da der Wert bereits 2000 sehr tief ist, vermuten wir, dass er sich einem Minimalwert annähert.

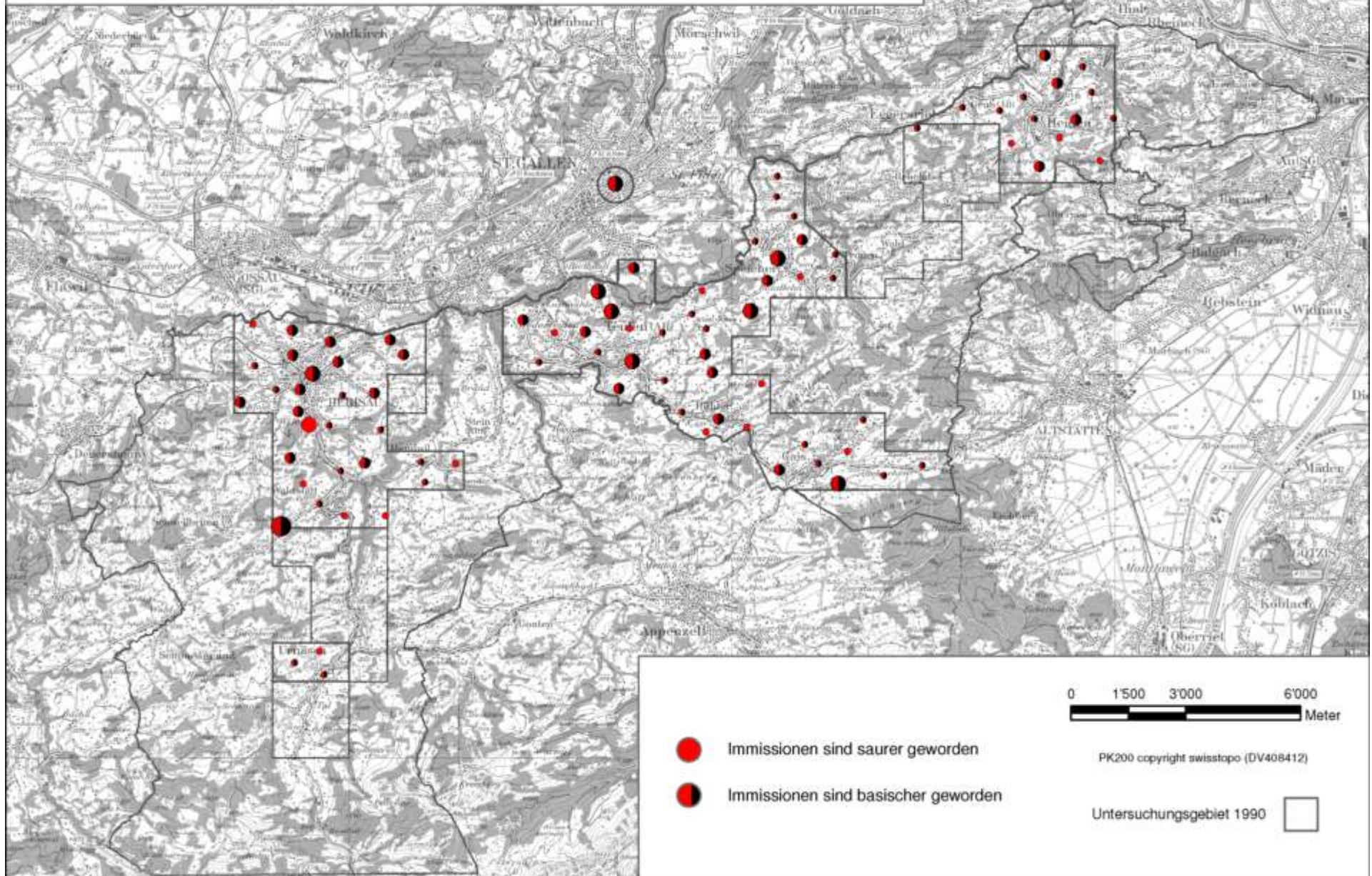








Acidindex - Differenz Appenzell Ausserrhoden 2000 - 2010 Bioindikation mit Flechten



3.6 Nitroindex

Stickstoffdepositionen führen zu einer Eutrophierung von Biotopen. Die Flechten zeigen den Nährstoffeintrag mit einer Verschiebung des Artenspektrums zu einer Dominanz nitrophiler Arten an. Die Eutrophierung bewirkt gleichzeitig eine Artenverarmung.

Der Nährstoffüberschuss führt bei Flechten wie bei anderen Lebewesen zuerst zu verstärktem Wachstum. Längerfristig hat der Überschuss allerdings eine Destabilisierung der Flechtenpopulation zur Folge.

Verantwortlich für die Stickstoffdepositionen sind Stickoxide (NO_x) und Ammoniak (NH_3). Stickoxide entstehen bei allen Verbrennungsvorgängen, Hauptquellen sind der motorisierte Verkehr, Heizungen und industrielle Feuerungen.

Ammoniak stammt zum grössten Teil aus der Landwirtschaft. In der Nähe von Quellen wird Ammoniak direkt gasförmig von Flechten und Pflanzen aufgenommen. Ammoniak wird zudem in der Luft zu Ammonium umgewandelt und wird über grössere Distanzen transportiert. So erfolgt die Deposition von Ammonium weiträumig und am höchsten in niederschlagsreichen Gebieten. Insgesamt stammen über 70% der aus der Luft deponierten Stickstoffverbindungen aus Ammoniak und dessen Verbindungen. Durch Oxidation wirkt Ammonium im Boden versauernd (FAL 1996; OSTLUFT 2004).

Die bioindikative Messgrösse für den Eutrophierungsgrad durch Stickstoff ist der Nitroindex. Er ist speziell für die Untersuchung der Luftqualität mittels Flechten entwickelt worden und basiert auf der Artenzusammensetzung und der spezifischen Reaktionsweise von Flechtenarten auf den Stickstoffüberschuss in ihrem Lebensraum.

Der Nitroindex wird über die Frequenzwerte zum einen der fünf nitrophilen Flechtenarten *Xanthoria parietina*, *Xanthoria fallax-Gr.*, *Physconia grisea*, *Phaeophyscia orbicularis-Gr.* sowie *Physcia adscendens-Gr.* berechnet; zum anderen der vier anitrophilen Arten *Hypogymnia physodes*, *Pseudevernia furfuracea*, *Evernia prunastri* und *Parmelia saxatilis*. Die Frequenzsumme der vier anitrophilen Arten wird von der Frequenzsumme der fünf nitrophilen Arten subtrahiert. Der erhaltene absolute Nitroindex wird pro Georaum gemittelt. Die Division des Nitroindex' durch den entsprechenden IAP18-Werts des Georaums relativiert den Wert bezüglich der Gesamtbelastung. Damit kann der Nitroindex auch in Gebieten mit niedrigem IAP18-Wert adäquat hohe Werte annehmen.

3.6.1 Nitroindex 1991

Appenzell Ausserrhoden weist bereits 1991 eine gesamthaft stickstoffreiche Immission auf (Abb. 15, Seite 32). Hinweise auf stickstoffarme Immissionen bestehen nur im Referenzgebiet St. Gallen.

3.6.2 Nitroindex 2000

2000 haben die Stickstoffimmissionen in der Untersuchungsregion weiter zugenommen, insbesondere in jenen Gebieten mit vormals nur leicht stickstoffreicher Gesamtbelastung (Abb. 16, Seite 33). Auch das Referenzgebiet St. Gallen weist nun stickstoffreiche Immissionen aus.

3.6.3 Nitroindex 2010

Die Verhältnisse von 2000 haben sich bis heute mehrheitlich nochmals verschärft, nur lokal ist die Stickstoffbelastung leicht zurückgegangen (Abb. 17, Seite 34). Nach wie vor sind aber sämtliche Gebiete deutlich stickstoffreich. Am höchsten sind die Immissionen in Urnäsch.

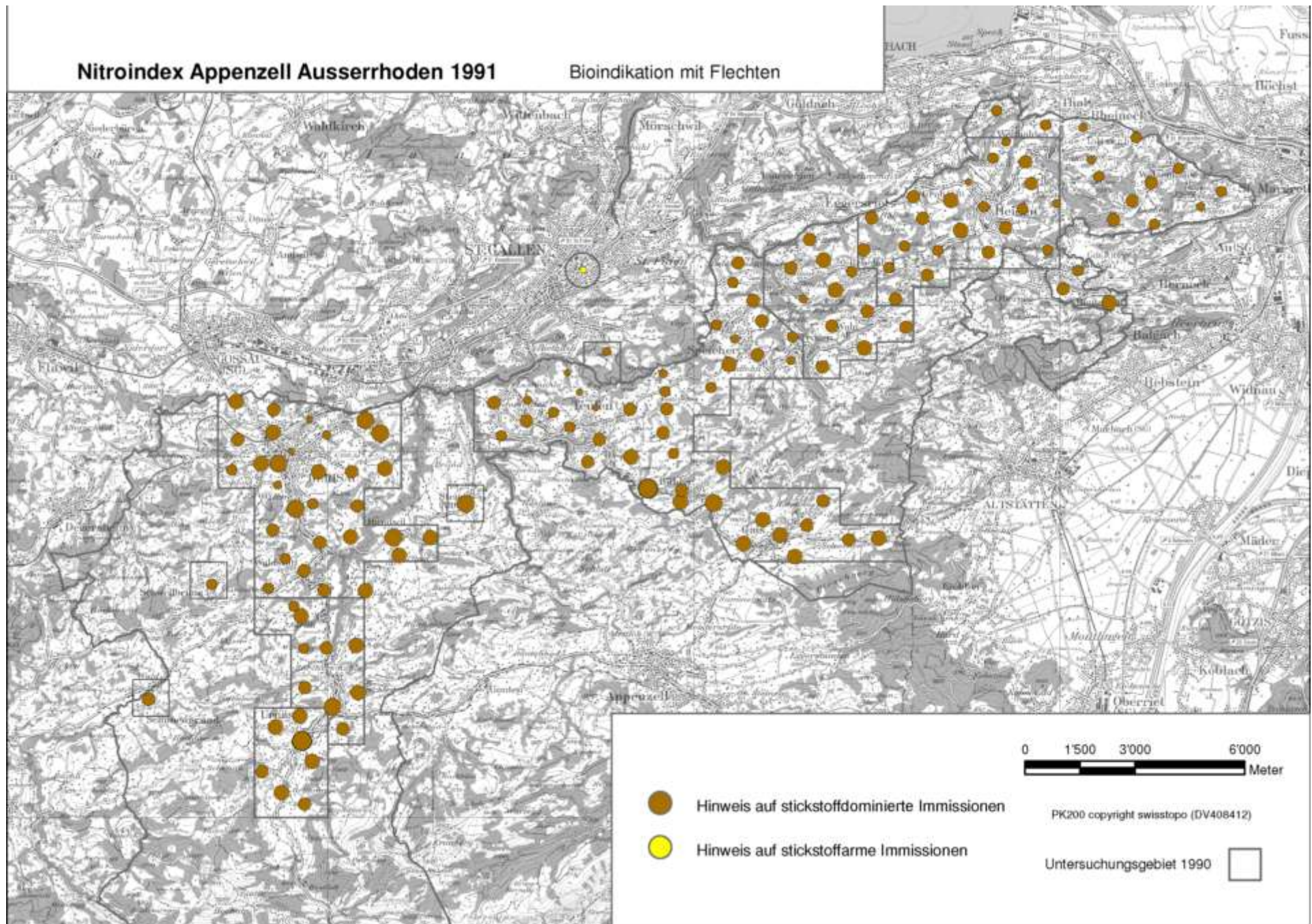
3.6.4 Veränderung des Nitroindex' 1991 bis 2010

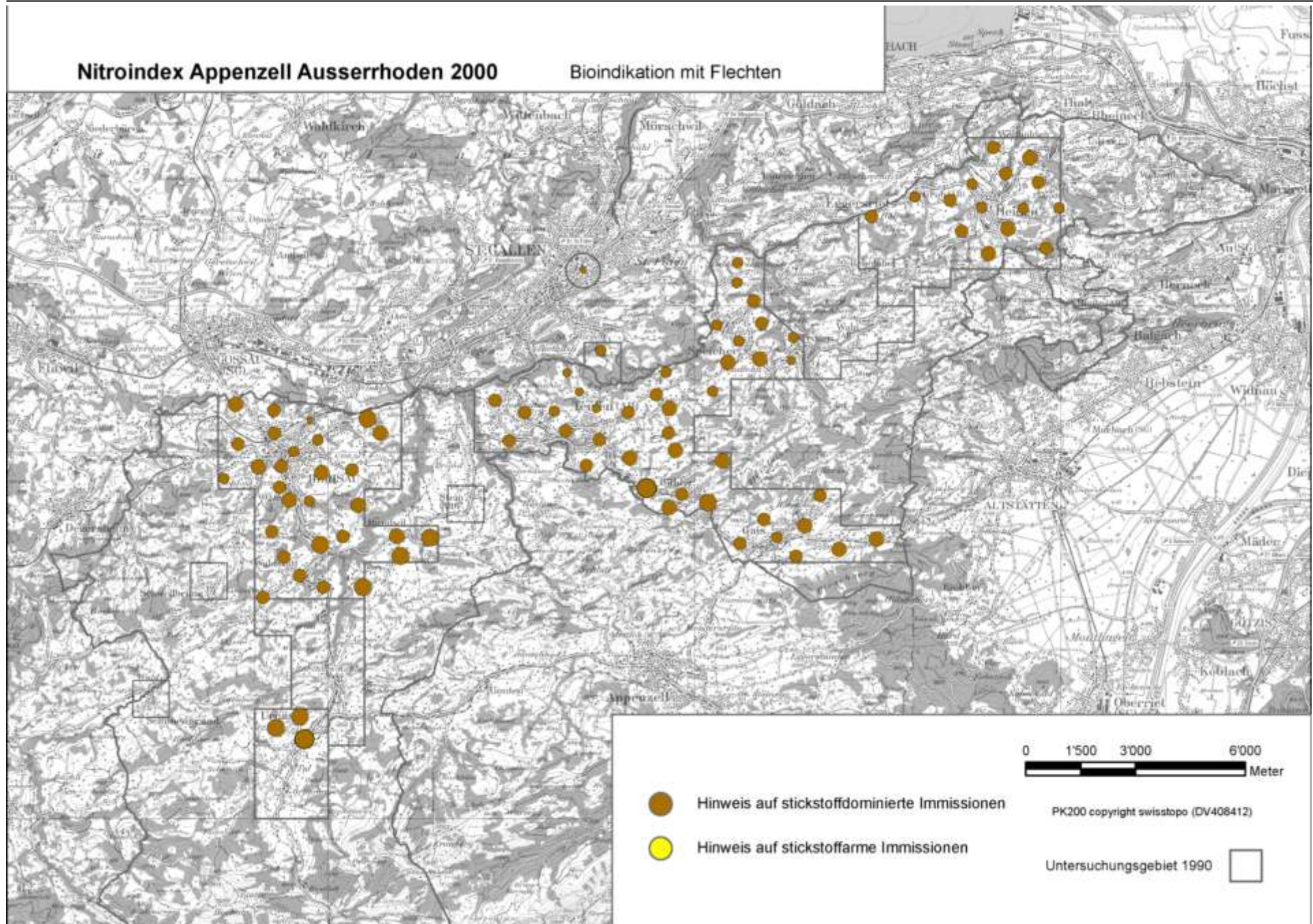
Von 1991 bis 2010 haben die Stickstoffimmissionen im grössten Teil des Untersuchungsgebiet stark zugenommen (Abb. 18, Seite 35). Besonders in den Räumen Herisau, Waldstatt, Teufen, Heiden und im Referenzgebiet St. Gallen ist die Stickstoffbelastung stark gestiegen. Als Ausnahme findet sich eine grössere Abnahme der stickstoffdominierten Verhältnisse im Bereich Wilen bei Herisau.

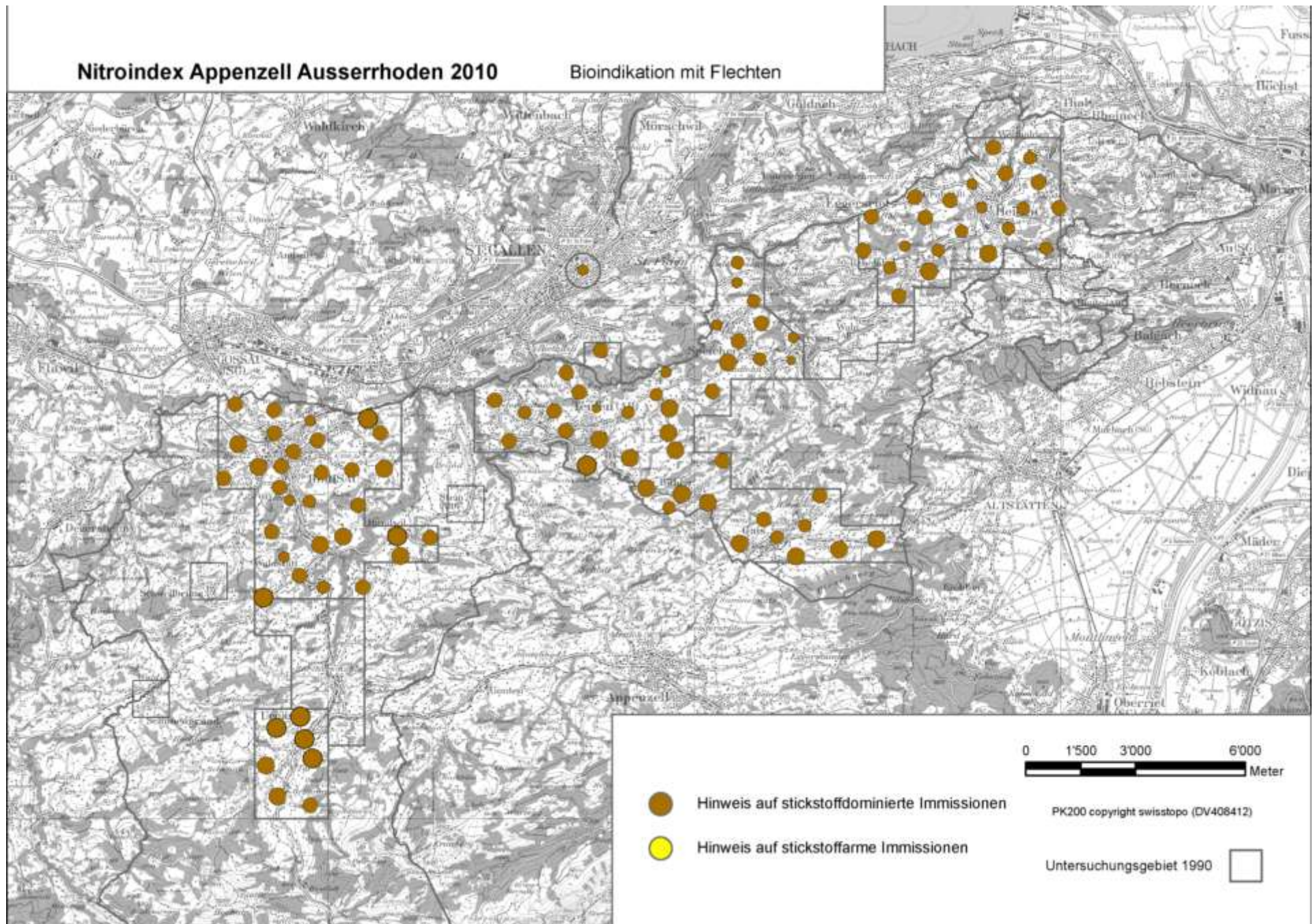
Im Jahr 2000 stark stickstoffreiche Gebiete sind heute unverändert belastet oder leicht weniger stickstoffreich, während Regionen mit früher weniger ausgeprägten Stickstoffimmissionen heute ebenfalls stark stickstoffreich sind (Abb. 19, Seite 36). Tendenziell hat die Stickstoffbelastung in Appenzell Ausserrhoden nochmals zugenommen.

Wie in anderen untersuchten Gebieten der Schweiz (Abb. 20, Seite 37) scheint sich der Grad der Stickstoffbelastung im Untersuchungsgebiet von 1991 bis 2010 auf einem hohen Niveau anzunähern.

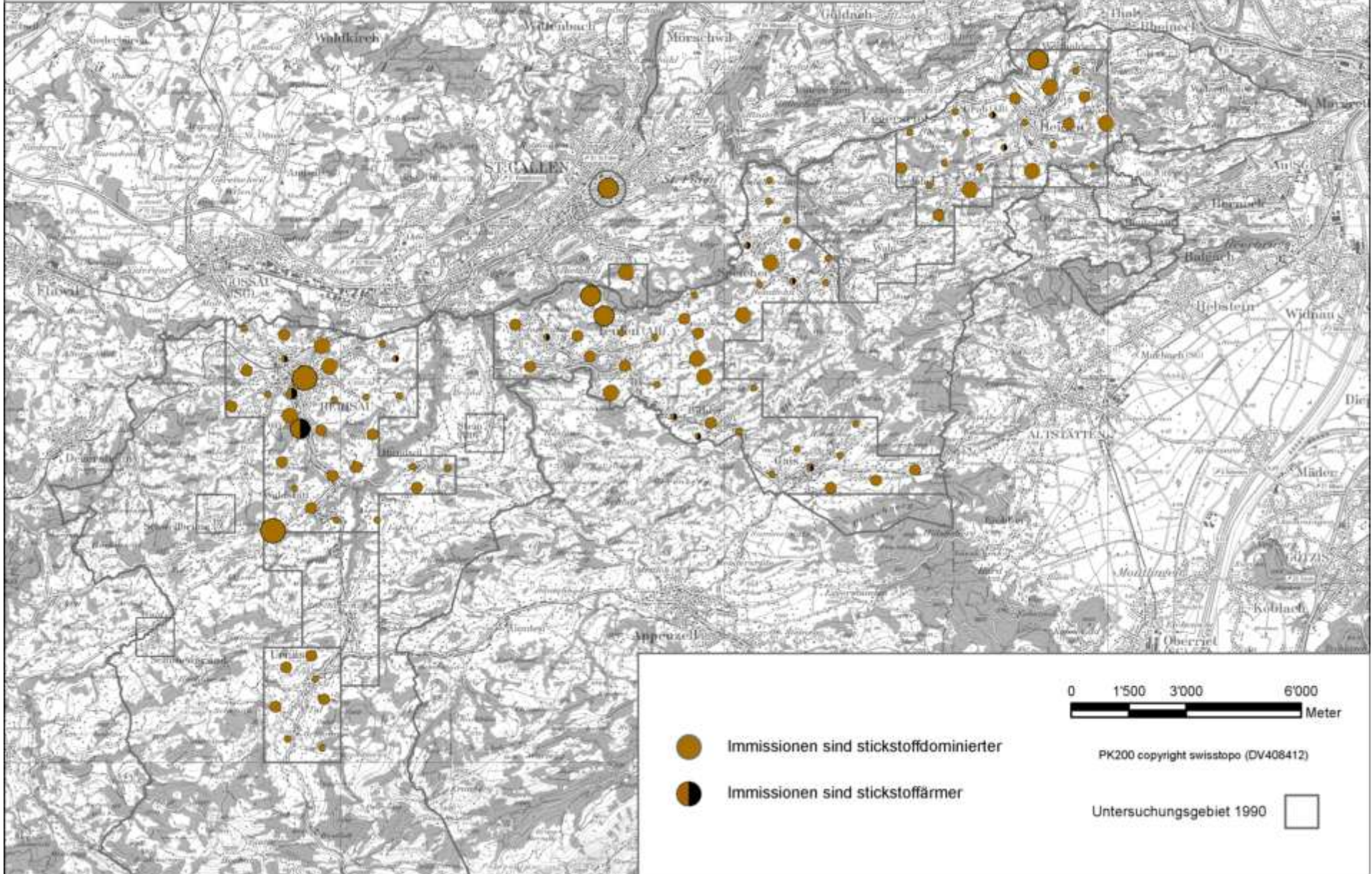
Ein zurzeit laufendes Forschungsprojekt im Auftrag des BAFU untersucht den Zusammenhang zwischen der Flechtenvegetation und der modellierten Stickstoffbelastung und dient der Optimierung des Nitroindex (vgl. Kap. 5.2.2).



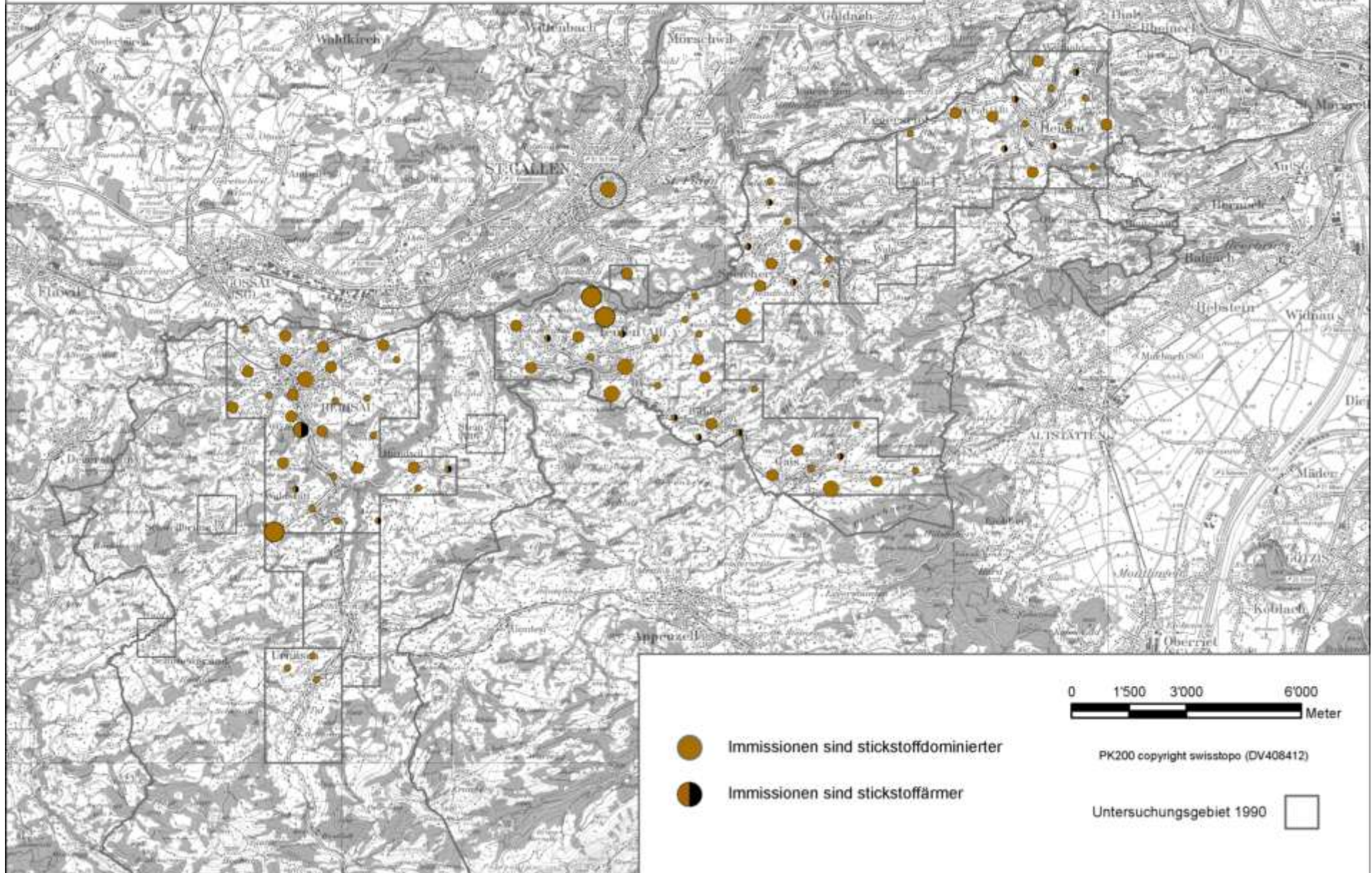




Nitroindex - Differenz Appenzell Ausserrhoden 1991 - 2010 Bioindikation mit Flechten



Nitroindex - Differenz Appenzell Ausserrhoden 2000 - 2010 Bioindikation mit Flechten



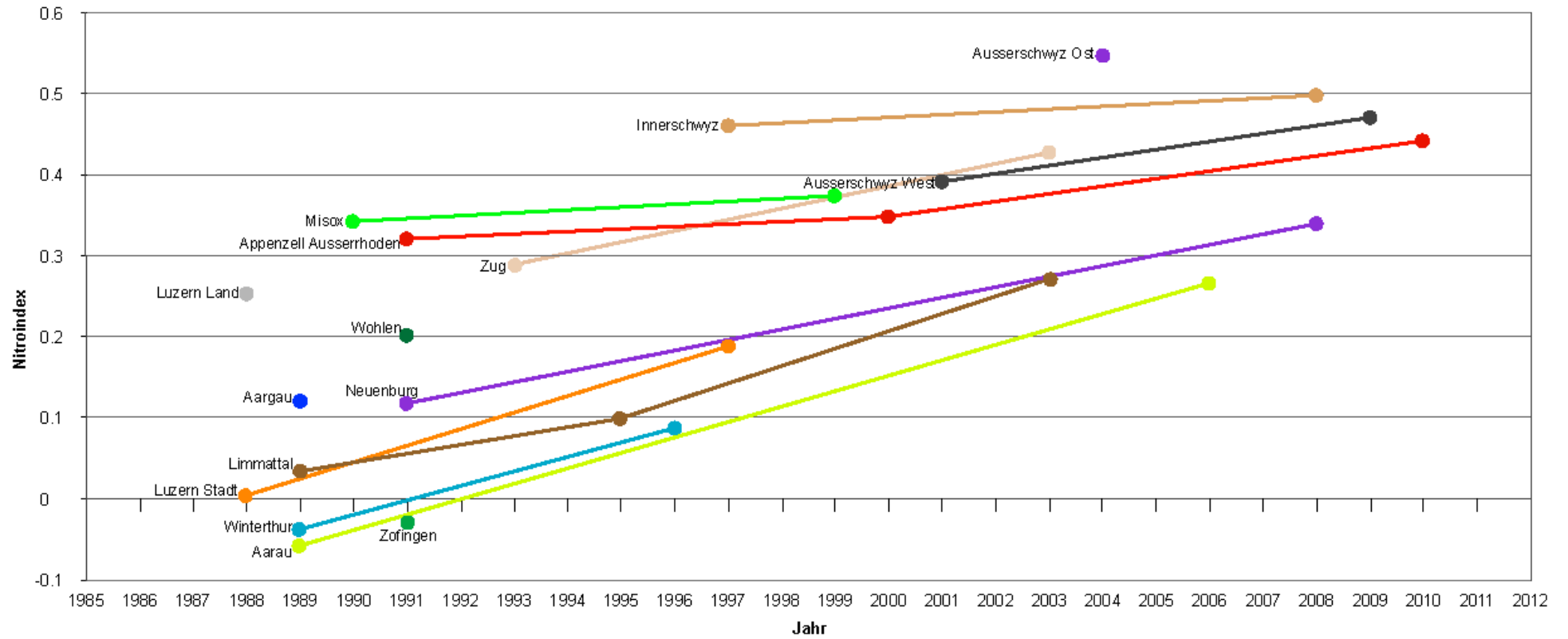


Abb. 20
 Der Nitroindex in verschiedenen Gebieten der Schweiz; Appenzell Ausserrhoden: Rote Linie

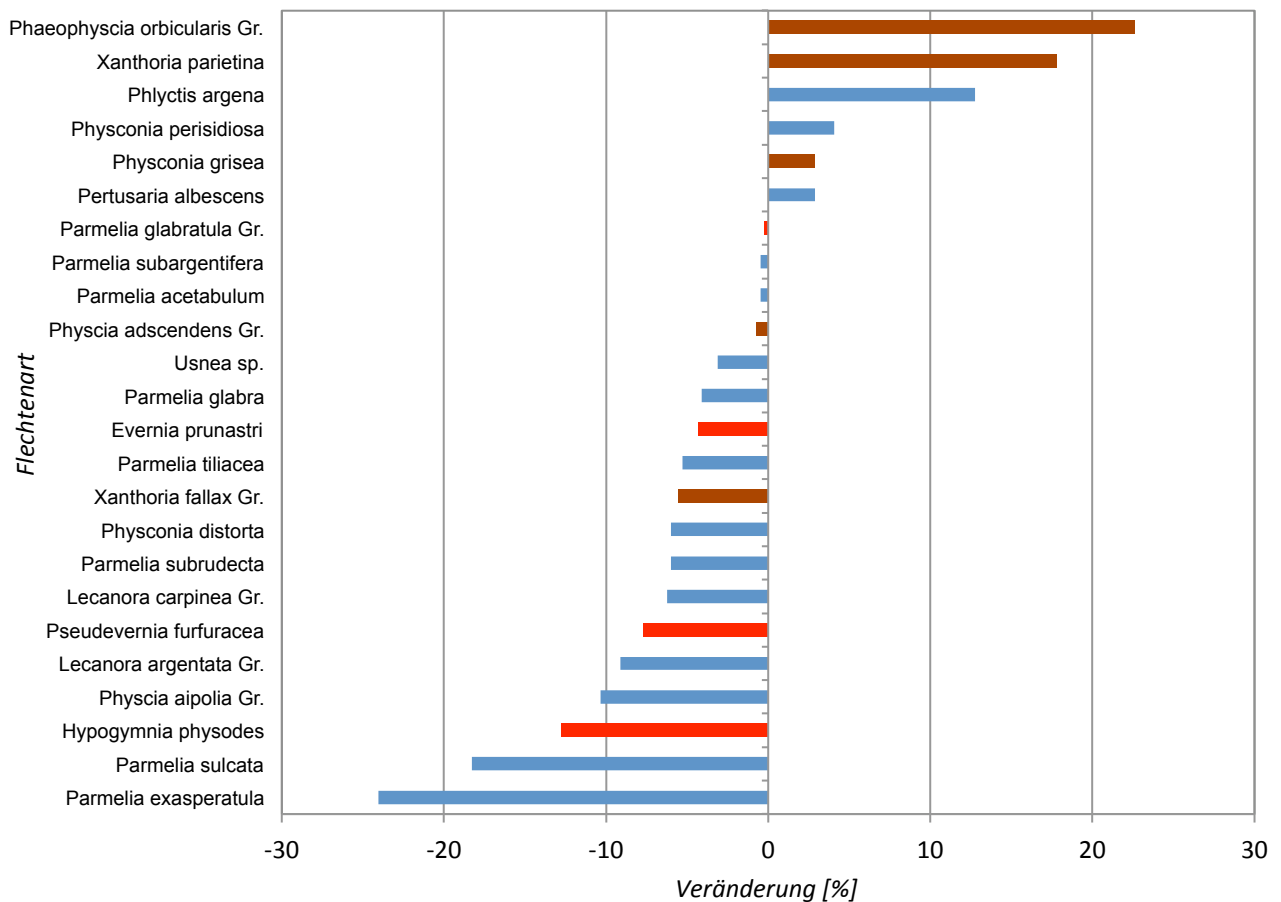
3.7 Flechten-Diversität

In den Jahren 1991, 2000 und 2010 konnten jeweils ähnlich viele Flechtenarten festgestellt werden: 1991 und 2000 wurden 39 Arten und Artengruppen, 2010 dann 43 Arten und Artengruppen gefunden. Ein größerer Teil davon fand sich aber nur an wenigen Bäumen. In allen drei Untersuchungen waren 28 Arten und Artengruppen an mehr als einem Prozent der Bäume vorhanden.

Während dieser 19 Jahre hat die Häufigkeit, mit der die einzelnen Arten auftreten, überwiegend abgenommen (Abb. 21). Von einer solchen Abnahme sind insbesondere säureliebende Arten (rote Balken) betroffen (siehe Kap. 3.5). Stickstofftolerante Arten (braune Balken) hingegen treten heute insgesamt häufiger auf als 1991.

Abb. 21:

Veränderung der Häufigkeit von Flechtenarten zwischen 1991 und 2010. Berücksichtigt sind nur Flechtenarten, welche an mehr als 3% der Bäume auftraten; rot: säureliebende Art; braun: stickstofftolerante Art; blau: restliche Arten



3.8 Entropie

Entropie ist in der Informationstheorie ein Mass für die Informationsdichte eines Systems. Je höher die Entropie, desto mehr Informationseinheiten sind enthalten. In der Ökologie beschreibt Entropie mit dem „Shannonschen Diversitätsindex“ (Beierkuhnlein 2003) oder auch der „Shannonsche Informationsentropie“ (Jenssen 2006) die Diversität eines Ökosystems (oder eines Untersuchungsgebietes). In diesem Index wird zusätzlich zur Artenzahl auch die relative Häufigkeit der vorkommenden Arten berücksichtigt. Die Entropie wird wie folgt berechnet:

$$H = \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$$

H entspricht dem Entropiewert, s ist die Artenzahl im Untersuchungsgebiet, i steht für die einzelne Art und p_i entspricht der relativen Häufigkeit der Art (Jenssen 2006).

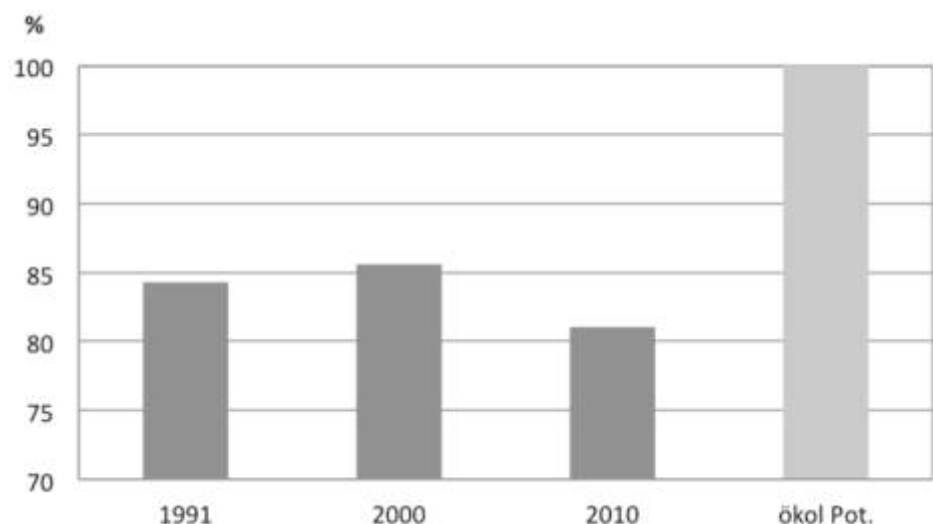
Entropie ist das Mass für die Ungewissheit, ob eine bestimmte Flechtenart an einem Trägerbaum zu finden ist. Die Ungewissheit steigt mit zunehmender Diversität und höherem Entropiewert. Wenn in einem Untersuchungsgebiet nur eine Art vorkommt, ist der Entropiewert gleich Null.

Die Entropie ist von der Grösse eines Gebietes unabhängig und läuft mit zunehmender Diversität asymptotisch gegen einen maximalen Wert, der das Potential der Diversität eines Ökosystems bezeichnet.

Um das ökologische Potential in Appenzell Ausserrhoden zu beschreiben, wurde die mittlere Entropie für die Jahre 1991, 2000 und 2010 berechnet. Als Referenzwert wurde der maximale Wert des Jahres 1991 herangezogen: Dieser beschreibt die maximale Diversität (das ökologische Potential des Gebiets) von 100%. Die Werte der Untersuchungsjahre werden dazu in Beziehung gesetzt.

Die Flechtendiversität ist von 1991 (84.3% des Maximalwerts) zu 2000 (85.6% des Maximalwerts) leicht (um einen Entropiewert von 0.04) gestiegen. Zwischen 2000 und 2010 hat der Entropiewert hingegen stark abgenommen (um 0.15) und beträgt nurmehr 81.0% des ökologischen Potentials (Abb. 22).

Abb. 22:
Entropiewerte von 1991, 2000 und 2010 als Prozente des maximalen Werts (des ökologischen Potentials)



4. Einzelstoffbelastung

4.1 Einleitung und Zielsetzung

4.1.1 Einleitung

Da Flechten keine Wurzeln haben, nehmen sie im Gegensatz zu höheren Pflanzen Wasser und Nährstoffe, aber auch Schadstoffe über die ganze Oberfläche auf. Persistente Schadstoffe werden in den Flechten akkumuliert. Durch chemische Analyse der Flechten kann daher die Einzelschadstoffbelastung der Luft abgeschätzt werden.

Schon 1991 (AGB 1992) und 2000 (AGB/Herzig 2002) wurden im Kanton Appenzell Ausserrhoden umfangreiche Analysen anorganischer Inhaltsstoffe in der epiphytischen Flechtenart *Parmelia tiliacea* vorgenommen. Diese Untersuchungen wurden im Jahr 2010 an zehn Stationen wiederholt. Um die Vergleichbarkeit der Daten zu optimieren wurden in diesem Bericht nur diejenigen früheren Stationen berücksichtigt, die im Jahr 2010 auch beprobt wurden.

4.1.2 Ziele dieser Untersuchung

Als Wiederholung früherer Flechtenmessungen (1991 und 2000) ermöglicht die vorliegende Untersuchung eine Erfolgskontrolle nach 20 Jahren Luftreinhaltung und liefert Grundlagen für die zukünftige Ausrichtung der Luftreinhaltung im Kanton Appenzell Ausserrhoden.

Die Ziele des Teilprojektes sind in Ergänzung zu den Zielen in Kapitel 2:

- Qualitative und quantitative Bestandesaufnahme der Schadstoffbelastung 2010 in ausgewählten Gebieten des Kantons Appenzell Ausserrhoden,
- Analyse der zeitlichen Entwicklung seit 1991 im Hinblick einer Erfolgskontrolle von realisierten Reduktionsmassnahmen,
- Lokalisierung von belasteten Gebieten, gesamt- und einzelstoffbezogen,
- Abschätzung der Relevanz von Quellen(gruppen),
- Verknüpfen der Flechtendaten mit anderen Luftqualitäts-Daten, insbesondere mit der Flechten-Luftgütekarte, dem Nitroindex und den Untersuchungen in Moosen (Thöni et al. 2008).

4.2 Methodisches

4.2.1 Sammlung, Aufbereitung und Analytik

Die ausführliche Beschreibung der Methode ist im Anhang 4 zu finden.

Zur Einzelstoffbestimmung wurde die Flechtenart *Parmelia tiliacea* (Abb. 23) wenn immer möglich an den gleichen Bäumen wie in den vorherigen Untersuchungen von 1991 und 2000 gesammelt. Im Labor wurde die Flechte sorgfältig von der Rinde gelöst und andere nicht zur Flechte gehörende Materialien entfernt. Die Proben wurden getrocknet und gemahlen. Für die Metall-, Arsen- und Molybdänbestimmung wurde ein Teil der Probe vollständig aufgeschossen und analysiert. Gesamtschwefel und der Gesamtstickstoff wurde mittels Elementaranalyse (Verbrennung) ermittelt.

Zur besseren Vergleichbarkeit der neuen Analysen mit denjenigen von 1991 und 2000 wurden je 10 Rückstellproben aus dem Probenbanking 1991 und 2000 mitgemessen. Zur weiteren Qualitätskontrolle wurden käufliche Referenzproben gemessen und Doppelmessungen vorgenommen.



Abb. 23:
Die Flechte *Parmelia tiliacea* am Baumstamm

4.2.2 Stationen

In der untenstehenden Tabelle sind die zehn Stationen der Untersuchung 2010 aufgelistet, einschliesslich der Stationsnummern der Untersuchungen 2000 und 1991. Eine Neu-Nummerierung wurde nötig, weil z.T. Bäume aus zwei verschiedenen früheren Stationen zu einer neuen zusammengefasst wurden. Abbildung 24 zeigt die Lage der Stationen im Kanton Appenzell Ausserrhoden. Im Anhang 6 werden die Stationen ausführlicher beschrieben und die Lage der Bäume innerhalb der Station gezeigt.

Station 2010	Name	Standortcharakteristik	Station 2000	Station 1991	Anzahl Bäume 2010
30	Herisau Industrie	Grosse Industriebetriebe, Hauptverkehrsachse	1, 2	1,3	9
31	Herisau Zentrum	Kerngebiet an verkehrsreicher Strasse	3	4	8
32	Waldstatt	Dorf, Landwirtschaft, Hauptverkehrsachse	5	6	8
33	Urnäsch	Dorfrand, Landwirtschaft, Grünzone	6	8	9
34	Teufen Lustmühle	Siedlung, Durchgangsverkehr	7	11	8
35	Teufen	Dorfzentrum, Durchgangsverkehr	8	13, 17	8
36	Speicher	Dorfzentrum, Durchgangsverkehr, Gewerbe	9	18	8
37	Trogen	Dorfzentrum und Siedlungen, Durchgangsverkehr	10	19	8
38	Heiden	Dorfzentrum an Hauptverkehrsachse, Gewerbe	11	22	8
39	Schachen b. Reute	Siedlung, Landwirtschaft, Grünzone, Durchgangsverkehr	12	24	8

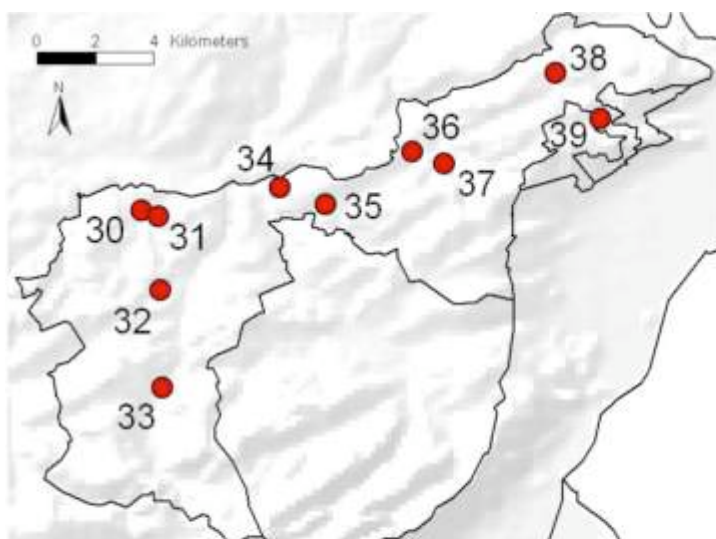


Abb. 24: Räumliche Lage der Stationen im Kanton Appenzell Ausserrhoden

4.2.3 Zuordnung zu Verkehrsklassen, Siedlungstyp und landwirtschaftliche Bewirtschaftung

Damit der Einfluss des Verkehrs abgeschätzt werden kann, wurden die Bäume bei der Probensammlung im Feld vier Verkehrsklassen zugeordnet:

Verkehrsaufkommen	Standortcharakteristik	Anzahl Bäume 2010	Anzahl Bäume 2000	Anzahl Bäume 1991
V0	Keine Motorfahrzeuge	21	14	19
V1	Naturstrasse, einspurige Nebenstrasse	21	26	21
V2	Nebenstrasse, Parkplatz	13	18	22
V3	Haupt- oder Schnellstrasse, Autobahn	27	24	20
Total		82	82	82

Der Einfluss der Siedlungsdichte wird mit Hilfe von sechs Siedlungsklassen charakterisiert. Die Klasse S5 (1991) ist mit drei Bäumen nicht mehr repräsentativ.

Siedlungstyp	Standortcharakteristik	Anzahl Bäume 2010	Anzahl Bäume 2000	Anzahl Bäume 1991
S0	Unbebautes Gebiet	4	4	2
S1	Streusiedlung	10	11	11
S2	Dorf	40	41	47
S3	Stadt, lockere Bebauung mit Gärten	17	15	15
S4	Stadt, Block- und Kernbebauung	6	5	4
S5	Industrie- und Gewerbestandorte	5	6	3
Total		82	82	82

Die Bäume wurden drei Landwirtschaftsklassen zugeordnet. Die Klasse L2 (1991) ist mit drei Bäumen nicht mehr repräsentativ.

Landwirtschaftsklasse	Bewirtschaftungsintensität	Anzahl Bäume 2010	Anzahl Bäume 2000	Anzahl Bäume 1991
L0	Keine Landwirtschaft	49	48	47
L1	Intensive Landwirtschaft	28	30	32
L2	Extensive Landwirtschaft	5	4	3
Total		82	82	82

4.2.4 Analyisierte Elemente

In der Untersuchung 2010 wurden insgesamt 16 Elemente bestimmt. Im Anhang 5 sind die Elemente näher beschrieben.

Analysiert wurden die Halbmetalle Antimon, Arsen, die Metalle Blei, Cadmium, Chrom, Cobalt, Eisen, Kupfer, Molybdän, Nickel, Vanadium, Zink, Zinn, sowie die Makronährstoffe Stickstoff und Schwefel. Auch Platin wurde analysiert, die Konzentrationen waren jedoch meist unter der Bestimmungsgrenze.

4.2.5 Schwermetallindex SMI

Der Schwermetallindex ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung. Zur Berechnung des SMI wurden die Konzentrationen (Mediane der Stationen) von 12 Metallen und Halbmetallen As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mo, Ni, Pb, Sb, V, Zn je auf ihr geometrisches Mittel (Produkt aller Analysenwerte über deren Anzahl) genormt. Die genormten Werte wurden anschliessend addiert.

Der SMI ist ähnlich wie der in den beiden früheren Untersuchungen erfasste „Appenzeller Schwermetall-Belastungs-Index“, kann jedoch nicht direkt mit diesem verglichen werden. Dieser fusste auf Addition von Belastungsklassen. Der SMI wurde darum für alle drei Perioden berechnet. Beim SMI wurde auf den Einbezug von Zinn verzichtet, da die Analytik nicht optimal durchgeführt werden konnte (siehe Anhang 9 Qualitätssicherung).

4.2.6 Darstellung der Resultate

Die Einzelwerte sowie Median-, Mittelwerte, Standardabweichung und relative Standardabweichung werden pro Station im Anhang 6 aufgelistet.

Für die Darstellung der Resultate werden die Mediane der Elementkonzentrationen berücksichtigt (Median = mittlerer Wert bei ungerader Anzahl, resp. Mittelwert der zwei mittleren Werte bei gerader Anzahl Werte). Die Mittelwerte der 8 bis 9 Bäume einer Station können irreführend sein, wenn z.B. ein einzelner sehr hoher Wert auftritt wie bei Blei an der Station 33 (Abb. 25). Aus dem gleichen Grund wird bei der Darstellung der Einzelelemente mit Boxplots und nicht mit Mittelwerten gearbeitet.

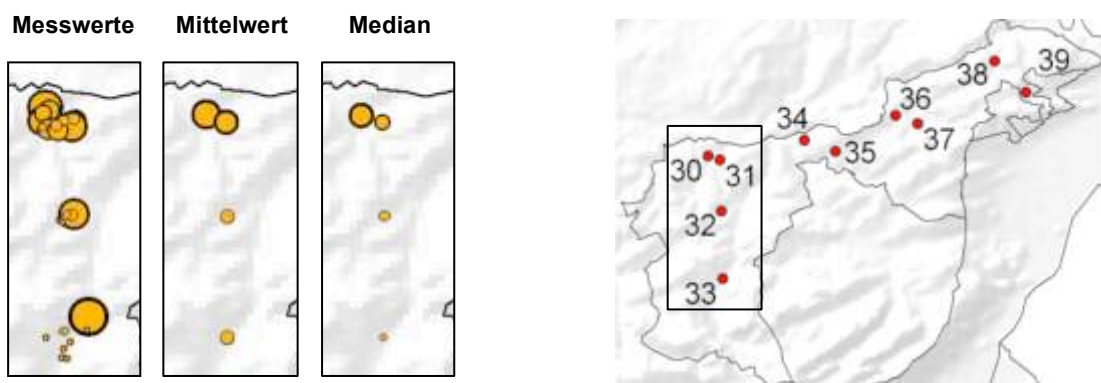


Abb. 25: Punktekarten-Darstellung; linker Teil: Einzelne Messwerte (links), Mittelwert (Mitte) und Median

(rechts) der jeweils 8 bis 9 Bäume; rechter Teil: Lage der Stationen im Kt. AR

Punktkarten

Für die einzelnen Elemente und für den SMI werden die Mediane der Konzentrationen in den Flechten pro Standort in Appenzeller-Karten für die Untersuchungen 1991, 2000 und 2010 dargestellt.

Die Mediane werden entsprechend ihrem Wert in 10 Kategorien eingeteilt. Die Kategorien teilen den Wertebereich von Null bis zum grössten gerundeten Wert eines Medians für ein Element gleichmässig auf. Die Punktgrösse resp. Punktdurchmesser wächst von einer Kategorie zur nächsten stufenweise um den gleichen Betrag (Abb. 26). Die Punktgrösse repräsentiert die Menge eines Elements relativ zum höchsten gemessenen Median. Sie sagt jedoch nichts aus über die Bedenklichkeit der Immissionswerte.

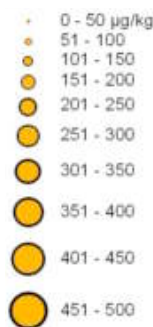


Abb. 26: Punktdarstellung am Beispiel Co. Der kleinste gemessene Median beträgt 149 µg/kg (Jahr 2010), der grösste gemessene Median 492 µg/kg (Jahr 1991). Die Abstufung in 10 Kategorien erfolgt in Schritten von 50 µg/kg. Der Punktdurchmesser nimmt von Kategorie zu Kategorie um einen konstanten Betrag zu.

Boxplots

Die gemessenen Konzentrationen der einzelnen Elemente und des SMI werden einerseits von allen Bäumen (n=82) andererseits von den 10 Stationen einzeln (n=8 und n=9) mit den Boxplots von 1991, 2000, 2010 gezeigt (Abb. 27). Zudem werden die Ergebnisse auch entsprechend den vier Verkehrsklassen sowie den sechs Siedlungsklassen aufgezeigt (siehe Kapitel 4.2.3.).

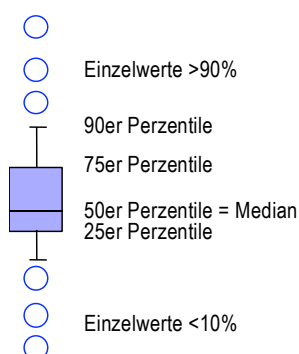


Abb. 27: Erklärung der Boxplots: In den Boxplots sind die 10er, 25er, 50er (Median), 75er und 90er Perzentile dargestellt. Werte oberhalb der 90er Perzentile respektive unterhalb der 10er Perzentile sind als Einzelpunkte gezeichnet.

4.3 Resultate und Diskussion

Bei der Interpretation der Resultate ist zu beachten, dass die Flechten die Stoffe über mehrere Jahre gesammelt haben.

4.3.1 Gesamtansicht: Schermetallindex SMI

Die Boxplotdarstellungen (Abb. 28) und Karten (Abb. 29) zeigen, dass sich der Schwermetallindex an den berücksichtigten Stationen im Kanton Appenzell Ausserrhoden seit der Untersuchung 1991 vermindert hat. Die Abnahme über alle Bäume betrug 34% zwischen 1991 und 2010 und 20% zwischen 2000 und 2010. Die Grundbelastung aus der weiteren Umgebung (Ferntransport von Stoffen) ist für die verschiedenen Stationen jeweils gleich. Die starke Streuung der Werte wie die relativ hohen Belastungen bei den Stationen Herisau (30, 31) und Heiden (38) können somit auf lokale Quellen zurückgeführt werden. Meist niedrige SMI-Werte wurden bei der ländlichen Station Urnäsch (33) gemessen. Der Schwermetallindex nimmt mit dem Verkehr und auch der Siedlungsdichte zu (Abb. 30).

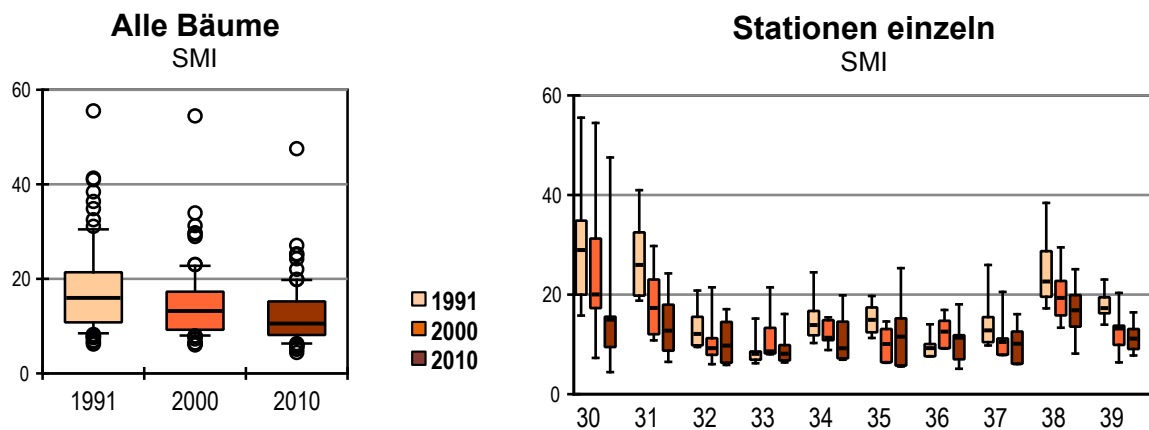


Abb. 28: Schwermetallindex SMI, Boxplots

Boxplot-Darstellung der Gesamtbelastungs-Intensität, Messperioden 1991, 2000, 2010.

Links: Daten aller Bäume der zehn Stationen zusammengefasst. Rechts: Daten aufgeteilt nach Stationen.

SMI – Schwermetallindex

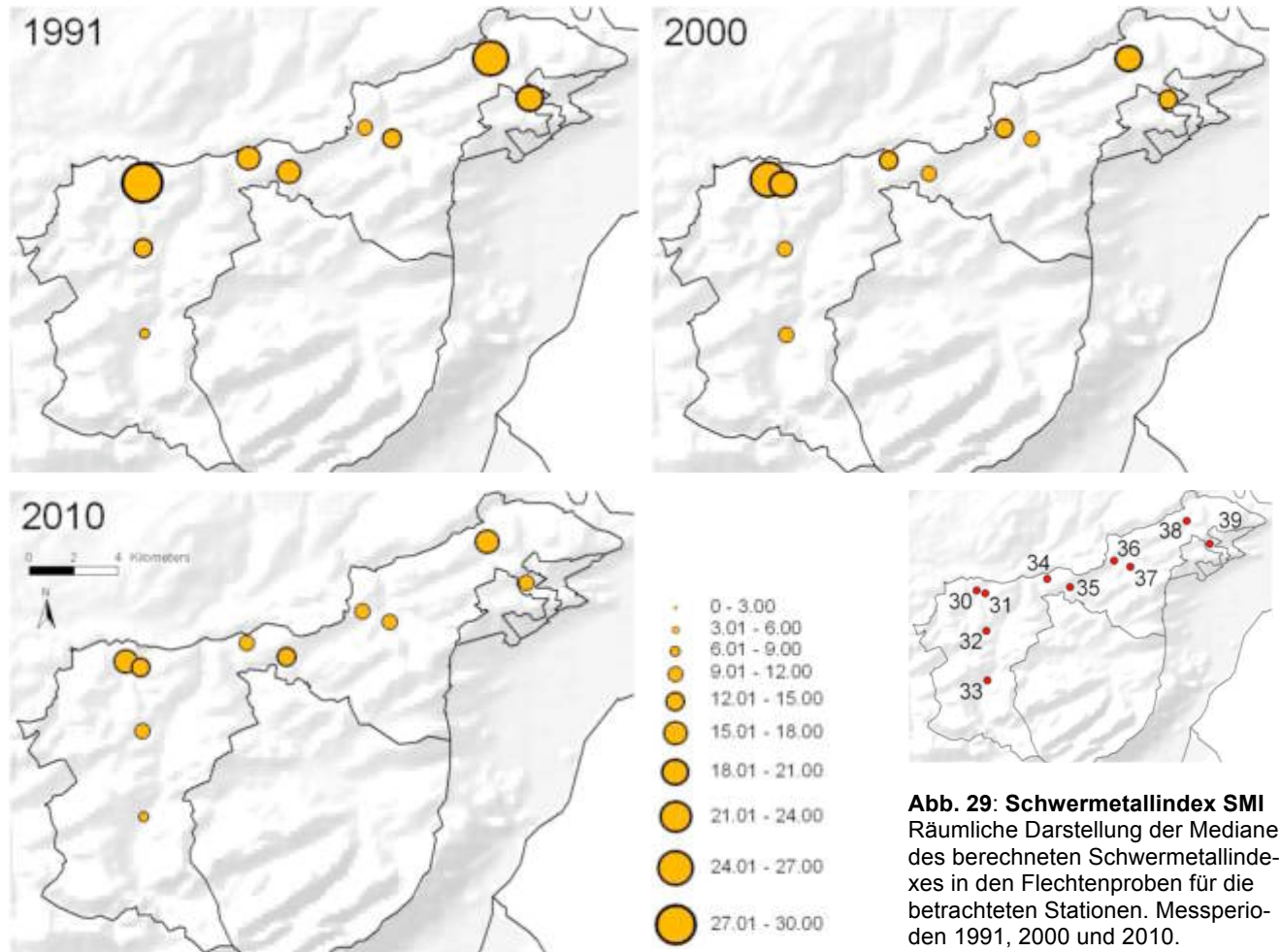


Abb. 29: Schwermetallindex SMI
 Räumliche Darstellung der Mediane des berechneten Schwermetallindexes in den Flechtenproben für die betrachteten Stationen. Messperioden 1991, 2000 und 2010.

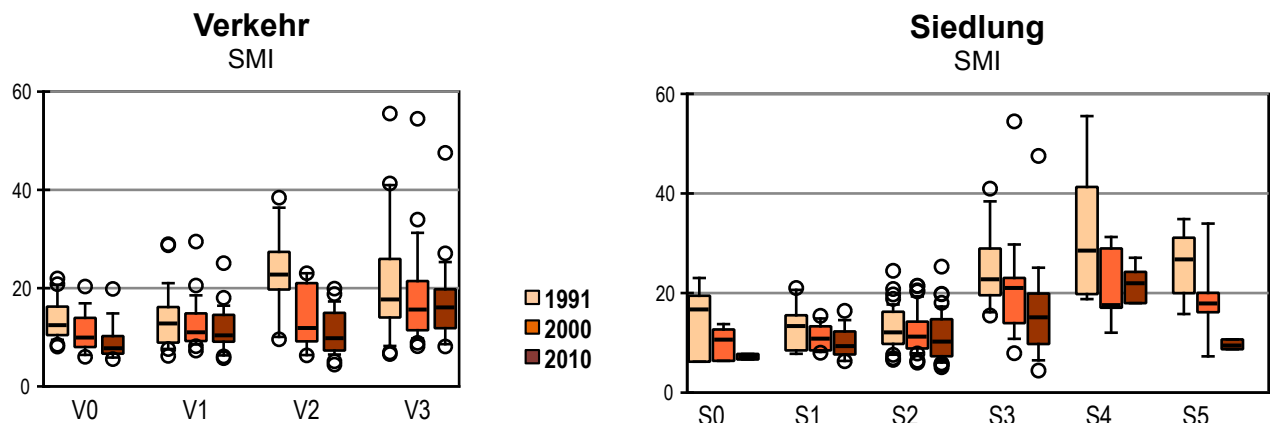


Abb. 30: Schwermetallindex
 Boxplot-Darstellung der drei Messperioden 1991, 2000 und 2010. Links: aufgeteilt in 4 Verkehrsklassen. Rechts: aufgeteilt in 6 Siedlungsklassen. Wegen zu geringer Stichprobe ($n < 4$) sind die Klassen S0-2010 und S5-2010 nicht repräsentativ.

4.3.2 Übersicht über Stationen und Einzelelemente

In Tabelle 3 werden pro Element und Station die Medianwerte der ermittelten Konzentrationen durch grüne Balken dargestellt. In der gleichen Form wird zusätzlich der Schwermetallindex SMI dargestellt. Die Werte für jedes Element sind so normiert, dass der maximale Medianwert über alle Stationen der Spaltenbreite entspricht.

Unter den Balken des jeweiligen Elements ist die Veränderung der Median-Konzentration von 2010 bezogen auf 1991 gezeigt, wobei die Farbe Blau eine Abnahme der Konzentration, die Farbe Rot eine Zunahme bedeutet. In einer weiteren Tabelle im Anhang 7 werden die prozentualen Veränderungen aufgeführt.

Im Gesamten haben zwischen 1991 und 2010 Arsen (65%), Cobalt (24%), Eisen (30%), Kupfer (25%), und Vanadium (59%) in allen untersuchten Gebieten abgenommen oder sind mindestens etwa gleich geblieben. Bei den anderen Schwermetallen sind 2010 an einigen Stationen auch deutlich höhere Medianwerte der Konzentrationen (>25%) gefunden worden als 1991: Cadmium und Nickel an einer Station, Antimon, Blei und Chrom an zwei Stationen, Zinn an drei und Molybdän an vier Stationen. Über alle Stationen gesehen haben Cadmium, Nickel und Blei um je 42% abgenommen, Antimon und Zink haben sich jedoch kaum verändert. Ein spezielles Verhalten zeigten Chrom, Molybdän und Zinn: nach einer Abnahme zwischen 1991 und 2000 (-29%, -17%, -44%) nahmen die Konzentrationen wieder zu: (+35%, +38%, +42%). Dieses Phänomen zeigte sich für Chrom auch bei der schweizerischen Moosuntersuchung (Thöni/Seitler 2004). Als Ursache kommt das allgemeine Wirtschaftswachstum nach der Jahrtausendwende in Frage. Bei Nickel und Vanadium verringerte sich die Streuung 2010 vor allem gegenüber 1991 stark, vermutlich auf Grund der Abnahme bei lokalen Einzelquellen.

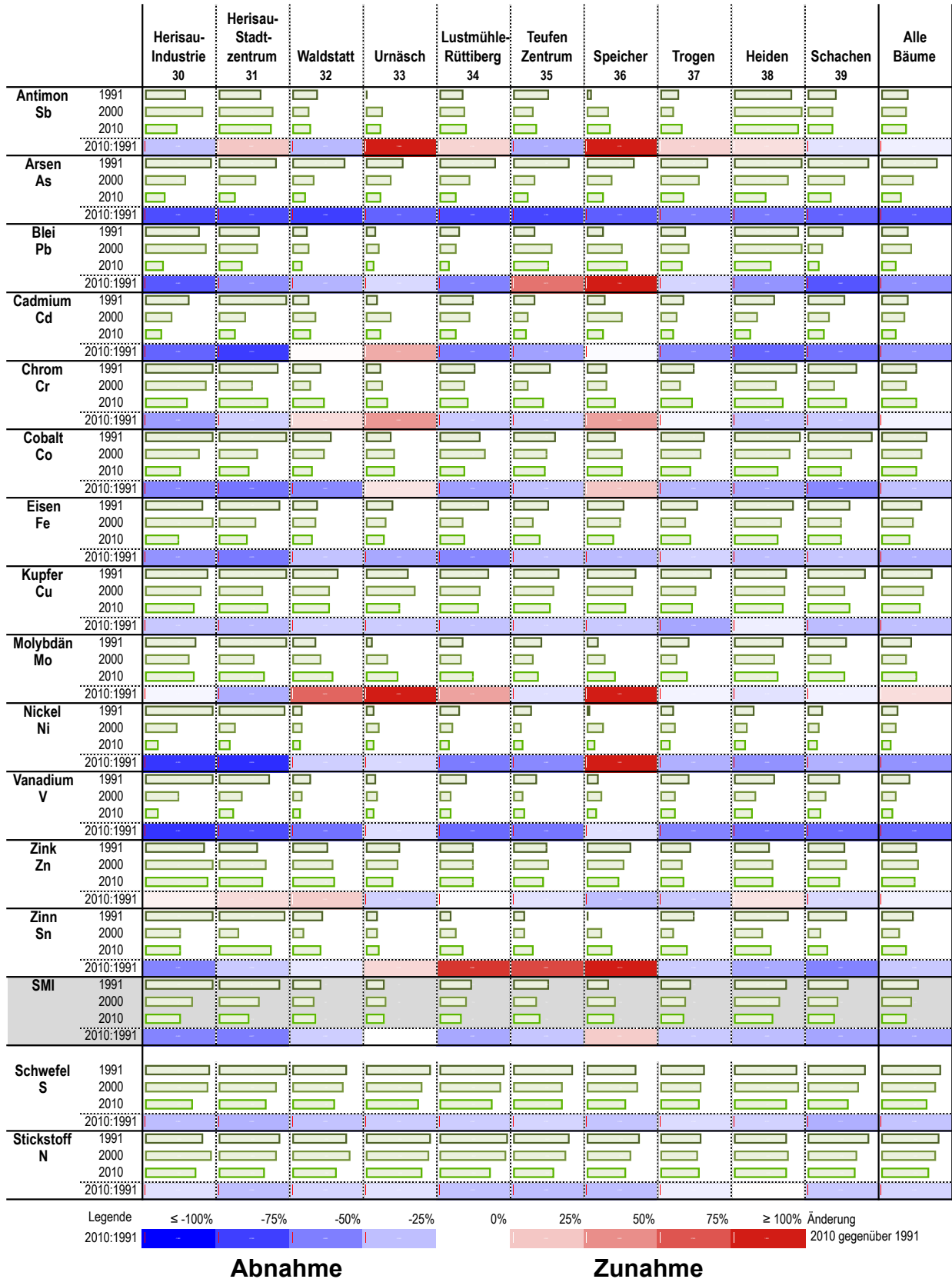
Schwefel zeigt an allen Stationen eine Abnahme, im Mittel um 23%. Dies kann auf die Einführung von schwefelarmen, fossilen Brennstoffen zurückgeführt werden. Beim Stickstoff betrug die Abnahme nur 16% trotz der Abnahme von NO_x-Emissionen (v.a. Einführung Katalysatoren bei Motorfahrzeugen). Die Ammoniak-Emissionen haben sich jedoch nicht vermindert.

Bei den Stationen Herisau Industrie (30) und Herisau Zentrum (31), wo meist hohe Werte gemessen wurden, sowie bei den Stationen Trogen (37), Heiden (38) und Schachen b. Reute (39) haben die Konzentrationen aller Elemente abgenommen oder sind etwa gleich geblieben. Bei den eher ländlichen Stationen 32 bis 36, Waldstatt, Urnäsch, Teufen Lustmühle, Teufen und Speicher sind die Konzentrationen in den Flechten im Allgemeinen niedriger als bei den vorher beschriebenen; es gibt bei diesen Stationen allerdings Elemente, die deutlich zugenommen haben. Auffällig ist dies vor allem in Urnäsch (33; vier Elemente deutlich höher) und in Speicher (36; sechs Elemente deutlich höher).

Die mehrheitliche Abnahme von Elementkonzentrationen in den gemessenen Flechten kann einerseits auf die lufthygienischen Massnahmen vor Ort aber auch in der Schweiz und im nahen Ausland, andererseits auf den Wandel im ehemaligen Ostblock zurückgeführt werden. Dort wurden nach der Wende viele Industrieanlagen saniert oder stillgelegt.

Tab. 3: Konzentrationsänderungen zwischen 1991 und 2010

Balkenlänge (grün): Als Referenzwert für die Abstufung gilt der höchste gemessene Median für das jeweilige Element in den Messperioden 1991, 2000 und 2010.
 Feldfarben (2010:1991, blau/rot) entsprechen der relativen Änderung des Medians für ein Element einer Station im Jahr 2010 verglichen mit dem Median im Jahr 1991. Blautöne bedeuten eine Abnahme des Medians; Rottöne eine Zunahme.



4.3.3 Resultate für die einzelnen Elemente

Antimon - Sb

Antimon ist für Tier und Mensch sehr giftig, vor allem die Sb (III)-, Sb (V)- und Organo-Verbindungen. Es wird vor allem für Legierungen eingesetzt z.B. für Geschosse. Emittenten sind Kohleverbrennung, Blei-, Zinn- und Kupferverhüttung sowie Bleibatterien-Recycling. Die Emissionen sind fast ausschliesslich anthropogen.

Die Boxplotdarstellungen (Abb. 31) und Karten (Abb. 32) zeigen, dass sich die Sb-Konzentration über die Zeit im Gesamten nicht verändert haben. Auch in der schweizerischen Moosuntersuchung (Thöni/Seitler, 2004), in welcher allerdings vom Emittent entfernte Standorte berücksichtigt wurden, wurde zwischen 1995 und 2000 keine signifikante Veränderung in den Konzentrationen gefunden.

Hohe Konzentrationen wurden bei den Stationen Herisau (30, 31) und bei Heiden (38) gemessen, sowie auch bei höherer Verkehrsbelastung (V2, 3) und Siedlungsdichte (S3, 4, 5; Abb. 33).

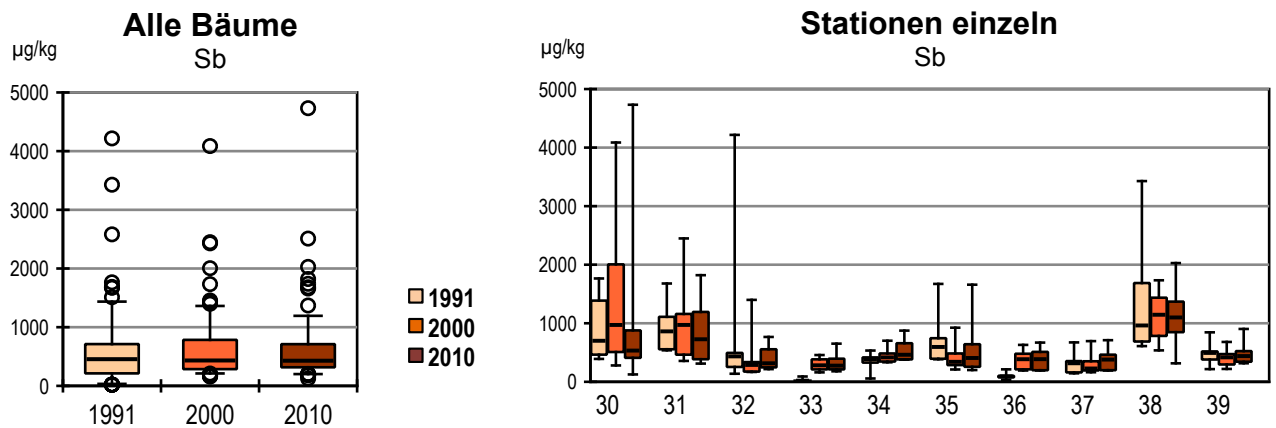


Abb. 31: Antimon

Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben, Messperioden 1991, 2000, 2010. Links: Daten aller Bäume der zehn Stationen zusammengefasst. Rechts: Daten aufgeteilt nach Stationen.

Sb – Antimon

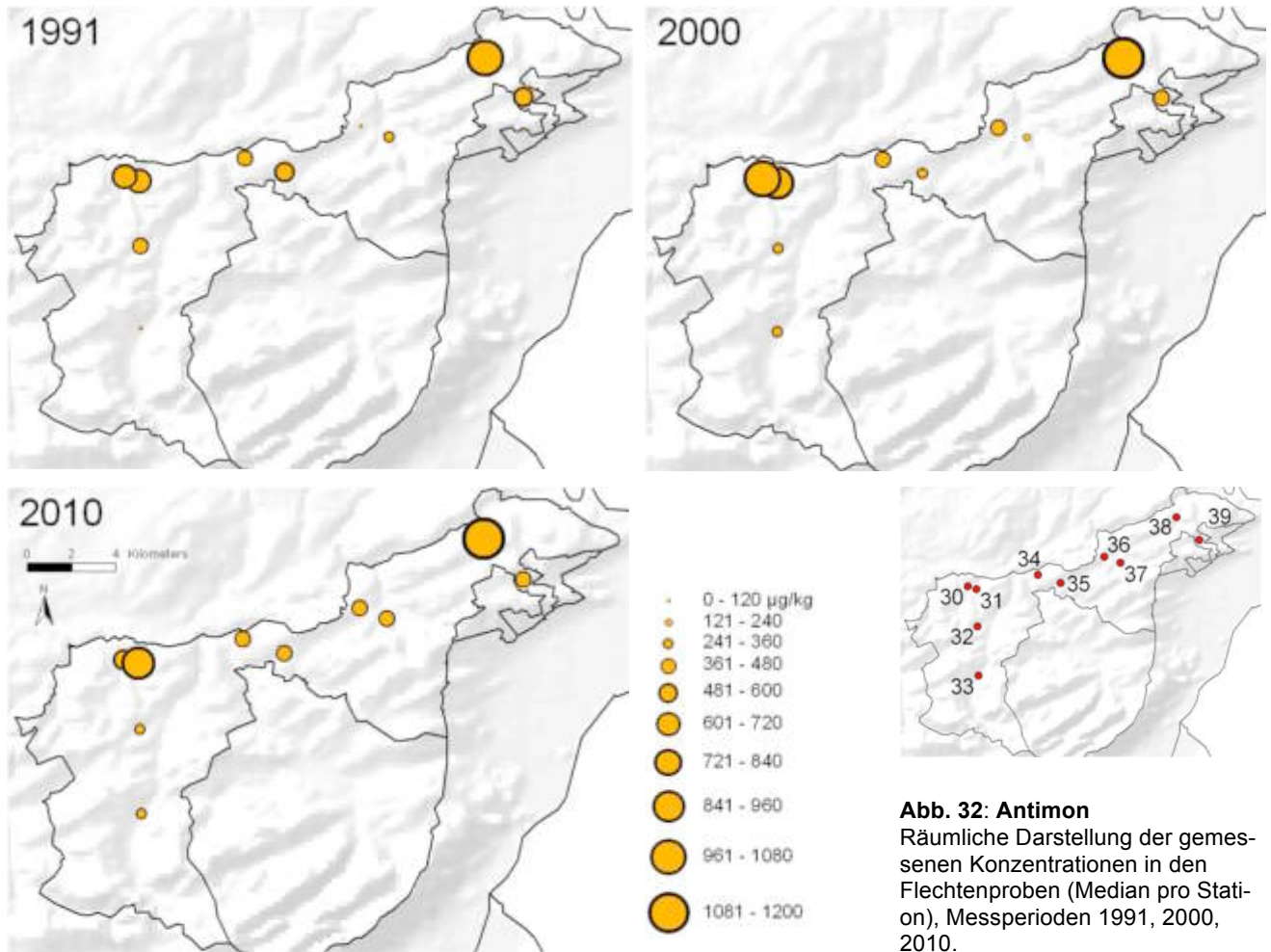


Abb. 32: Antimon
 Räumliche Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben (Median pro Station), Messperioden 1991, 2000, 2010.

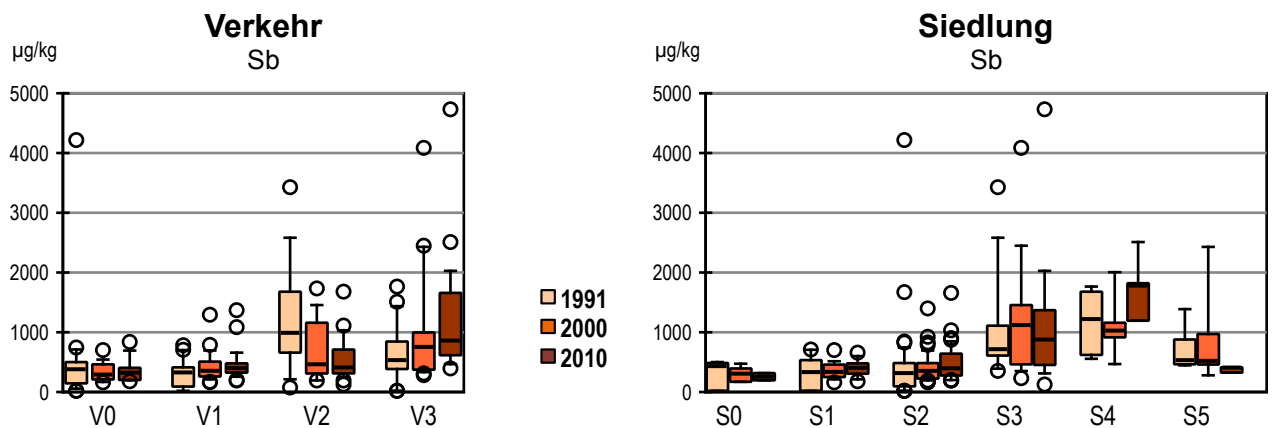


Abb. 33: Antimon
 Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben der drei Messperioden 1991, 2000 und 2010. Links: aufgeteilt in 4 Verkehrsklassen. Rechts: aufgeteilt in 6 Siedlungsklassen. Wegen zu geringer Stichproben (n<4) sind die Klassen S0-2010 und S5-2010 nicht repräsentativ.

Arsen - As

Arsen ist für Tier und Mensch toxisch. Früher wurde es als Biozid und für Farbpigmente eingesetzt. Emissionen stammen überwiegend aus anthropogenen Quellen (bei Verhüttung von verschiedenen Metallen und bei Verwendung von fossilen Brennstoffen).

Die Boxplotdarstellungen (Abb. 34) und Karten (Abb. 35) zeigen, dass die Werte seit der Untersuchung 1991 an allen Standorten stark abgenommen haben, über alle Bäume 65% zwischen 1991 und 2010 und 39% zwischen 2000 und 2010. Auch in der schweizerischen Moosuntersuchung (Thöni et al. 2008), in welcher allerdings emittentenferne Standorte berücksichtigt wurden, wurde zwischen 1990 und 2005 eine Abnahme von rund 60% gefunden.

Hohe Werte wurden in allen drei Messperioden bei der Station Heiden (38) gemessen, meist niedrige Werte bei der ländlichen Station Urnäsch (33). Die Verkehrsbelastung scheint wenig Einfluss auf die Konzentration zu haben. Auch die Siedlungsdichte zeigte 1991 und 2010 wenig Einfluss, 2000 hingegen war der Median der Arsenkonzentration in städtischer Umgebung deutlich höher (Abb. 36).

Der Rückgang kann möglicherweise auf das Verbot von Bioziden und Malpigmenten mit Arsen zurückgeführt werden

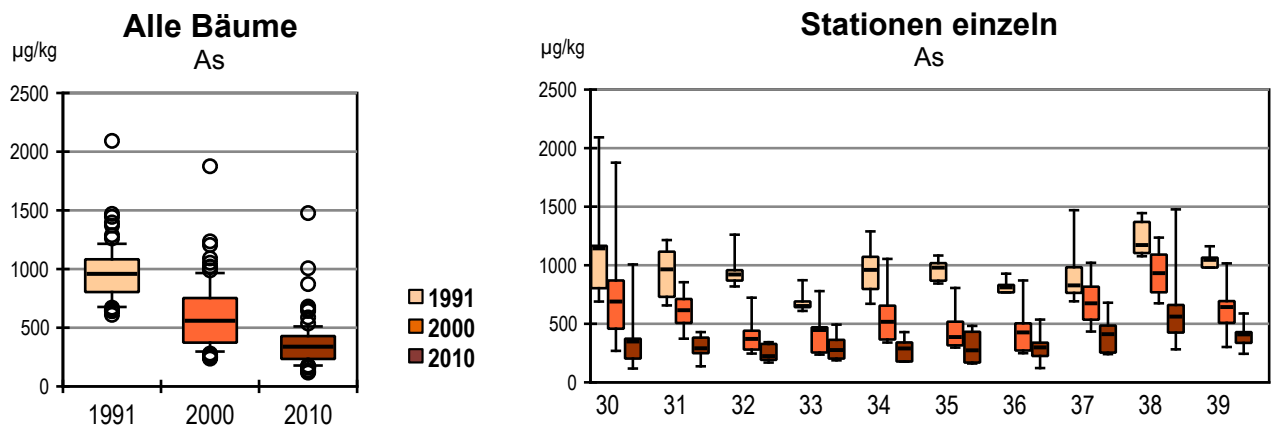


Abb. 34: Arsen

Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben, Messperioden 1991, 2000, 2010. Links: Daten aller Bäume der zehn Stationen zusammengefasst. Rechts: Daten aufgeteilt nach Stationen.

As – Arsen

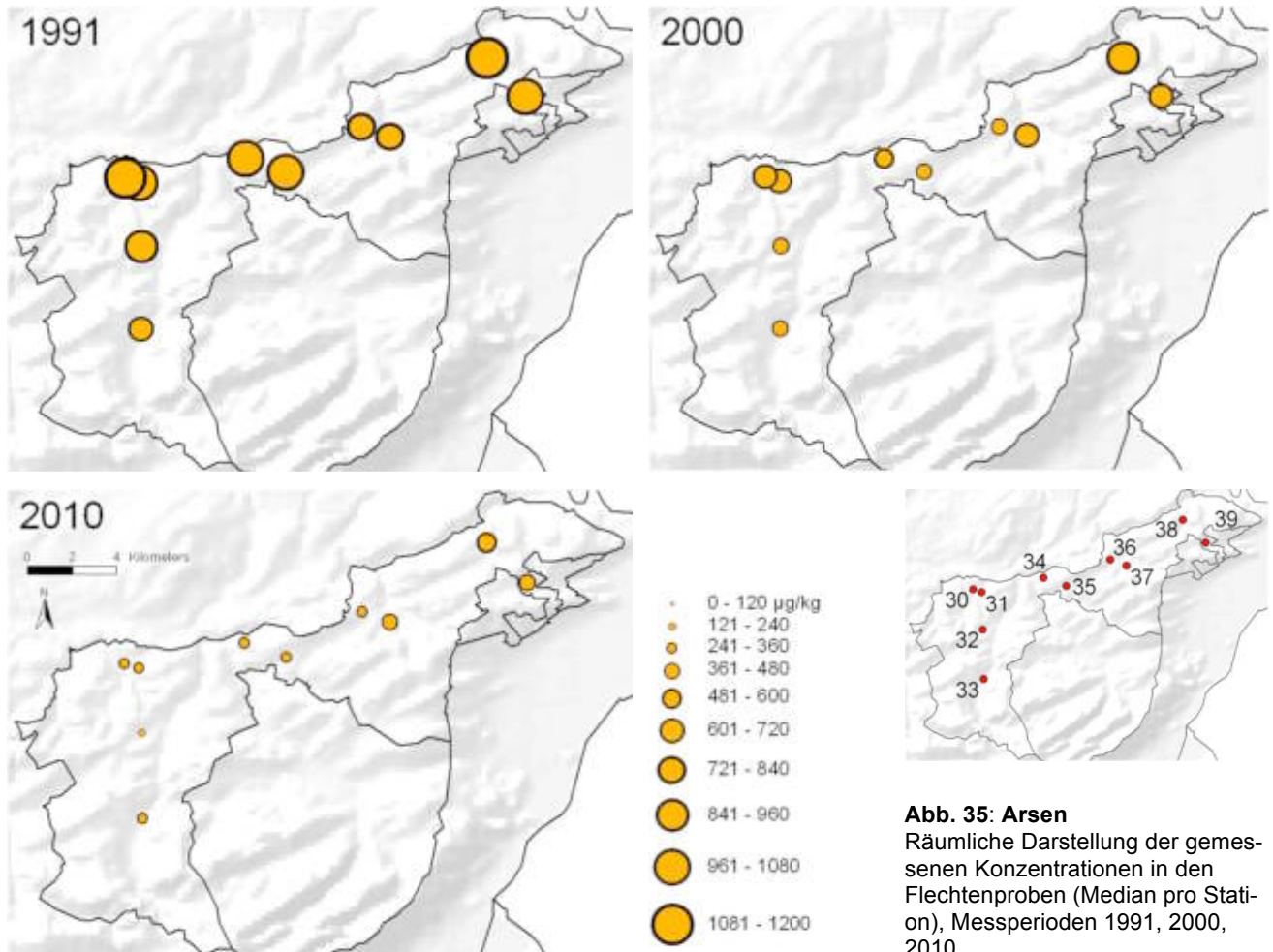


Abb. 35: Arsen
 Räumliche Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben (Median pro Station), Messperioden 1991, 2000, 2010.

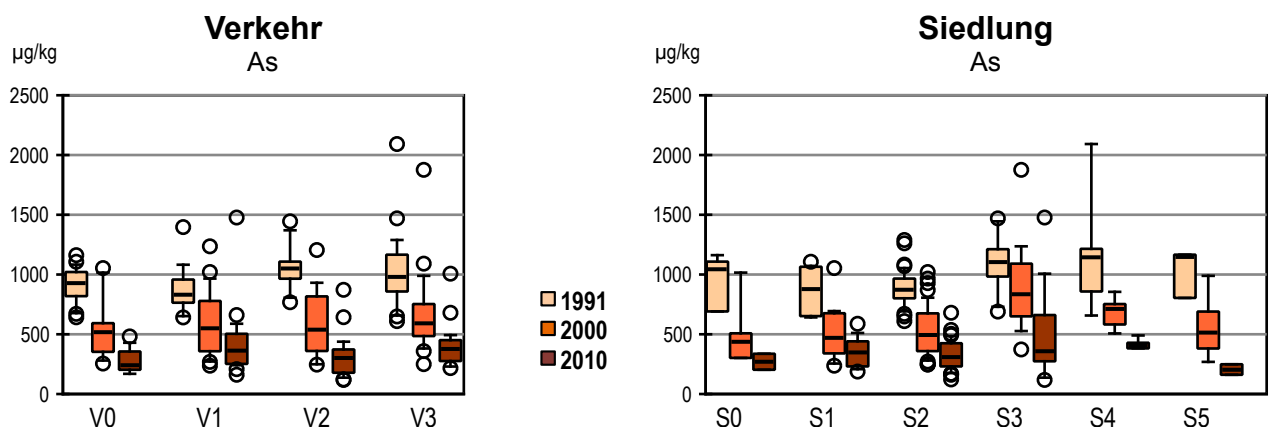


Abb. 36: Arsen
 Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben der drei Messperioden 1991, 2000 und 2010. Links: aufgeteilt in 4 Verkehrsklassen. Rechts: aufgeteilt in 6 Siedlungsklassen. Wegen zu geringer Stichproben ($n < 4$) sind die Klassen S0-2010 und S5-2010 nicht repräsentativ.

Blei - Pb

Blei ist ein stark toxisches Element. Trotzdem hat es noch viele Anwendungen: Batterien, Munition, Korrosionsschutz, Legierungen usw. Starke und flächenmässig weite Emissionen bewirkte das Bleibenzin, welches jedoch seit Ende der 1980er Jahre zunehmend weniger und heute in der Schweiz nicht mehr verwendet wird. Es wird weiterhin deutlich mehr Blei anthropogener als natürlicher Ursache emittiert.

Die Boxplotdarstellungen (Abb. 37) und Karten (Abb. 38) zeigen, dass die mittlere Belastung an den berücksichtigten Stationen im Kanton Appenzell Ausserrhoden zwischen 1991 und 2000 sich kaum veränderte dann aber zwischen 2000 und 2010 um 51% abgenommen hat. Eine kontinuierliche Abnahme über die beiden Jahrzehnte ist bei den stärker verkehrsbeeinflussten Standorten erkennbar (Abb. 39). Die verzögerte Abnahme erstaunt, da die Bleiemissionen in der Schweiz von gegen 800 t im Jahr 1985 (davon 500 t aus Verkehr) auf rund 40 t im Jahr 2000 gesenkt werden konnte (Quelle: BUWAL 1995, BAFU 2009). Auch in der schweizerischen Moosuntersuchung (Thöni et al. 2008), wurde an emittentenferne Standorten zwischen 1990 und 2000 um 80% niedrigere Konzentrationen gemessen.

Während 1991 die Durchschnittswerte bei erhöhter Verkehrsbelastung und Siedlungsdichte stark anstiegen, ist der Verkehrseinfluss 2010 gering, der Siedlungseinfluss aber weiterhin deutlich. Die einzelnen hohen Werte an den Standorten ohne Verkehrseinfluss können sehr wahrscheinlich auf das zeitweise Verbrennen von Altholz zurückgeführt werden. Bemaltes Altholz kann hohe Mengen Blei in den Farbpigmenten enthalten.

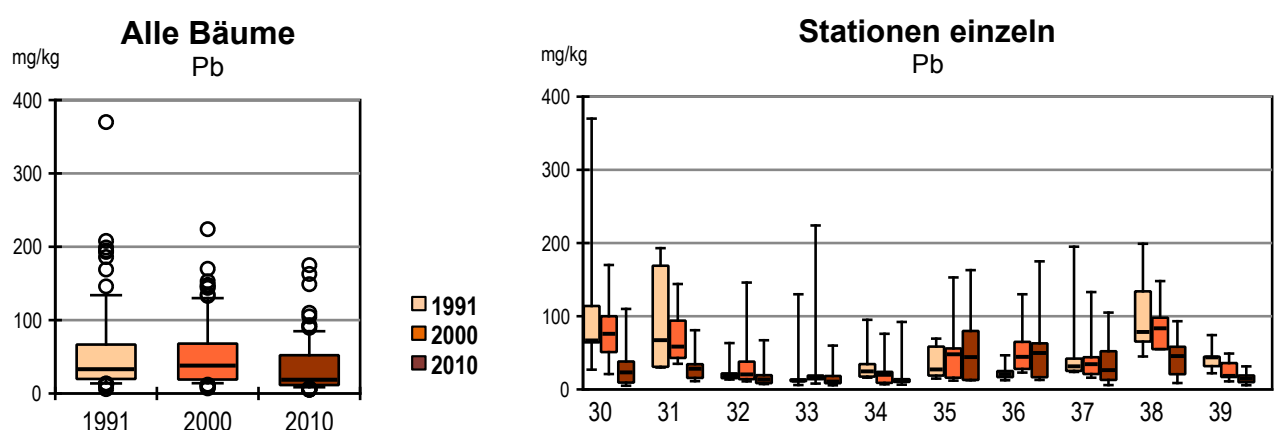


Abb. 37: Blei

Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben, Messperioden 1991, 2000, 2010. Links: Daten aller Bäume der zehn Stationen zusammengefasst. Rechts: Daten aufgeteilt nach Stationen.

Pb – Blei

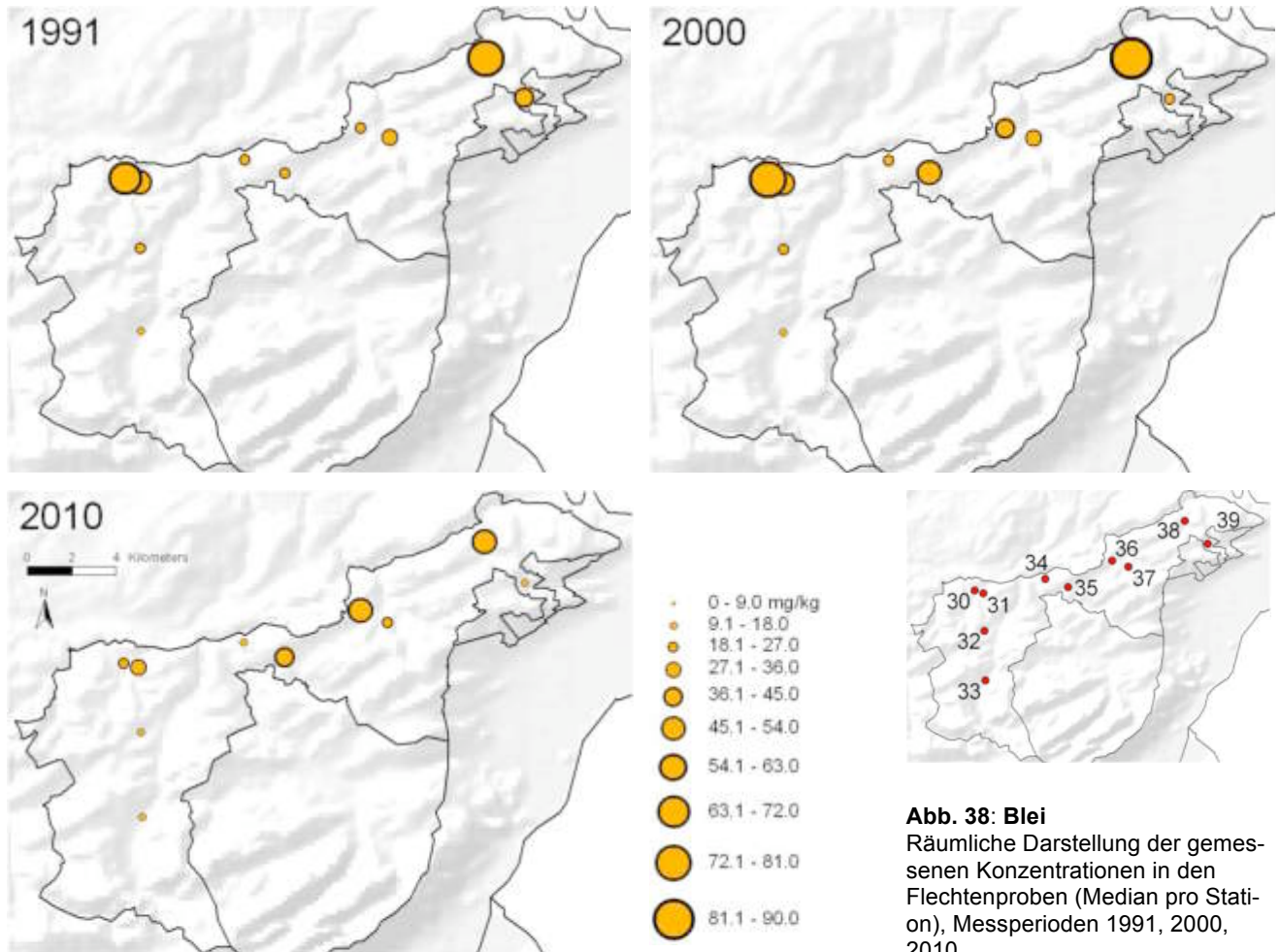


Abb. 38: Blei
 Räumliche Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben (Median pro Station), Messperioden 1991, 2000, 2010.

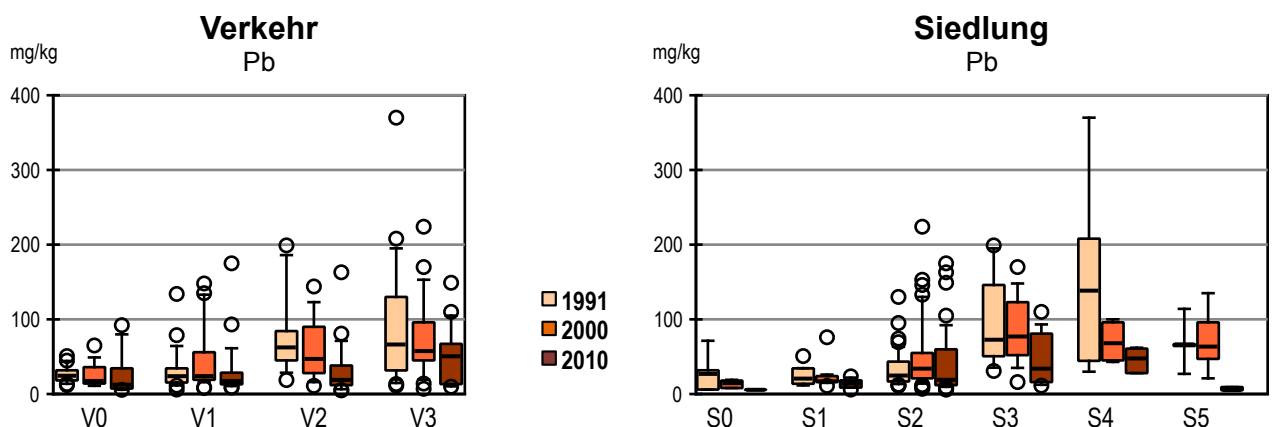


Abb. 39: Blei
 Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben der drei Messperioden 1991, 2000 und 2010. Links: aufgeteilt in 4 Verkehrsklassen. Rechts: aufgeteilt in 6 Siedlungsklassen. Wegen zu geringer Stichproben ($n < 4$) sind die Klassen S0-2010 und S5-2010 nicht repräsentativ.

Cadmium - Cd

Cadmium ist für Pflanzen, Tiere und Menschen toxisch. Es kommt überwiegend aus anthropogenen Quellen wie z.B. der Metallindustrie oder (früher) aus Kehrlichtverbrennungsanlagen, z.T. auch aus Reifenabrieb.

Die Boxplotdarstellungen (Abb. 40) und Karten (Abb. 41) zeigen, dass die Konzentrationen an den berücksichtigten Stationen im Kanton Appenzell Ausserrhoden zwischen 1991 und 2010 um 42% abgenommen haben, die Belastung nun tief ist und viel weniger Streuung aufweist als 1991. Auch in der schweizerischen Moosuntersuchung (Thöni et al. 2008), in welcher allerdings emittentenferne Standorte berücksichtigt wurden, wurde zwischen 1990 und 2005 eine Abnahme von rund 55% gefunden.

1991 wurden grosse Unterschiede zwischen den Stationen gefunden mit hohen Werten in Herisau (30, 31), Teufen Lustmühle (34), Heiden (38) und Schachen b. Reute (39). 2000 und 2010 unterschieden sich die Cd-Konzentrationen an den 10 Stationen deutlich weniger, aber die Streuung war 2000 grösser. Die Verkehrsbelastung und die Siedlungsdichte zeigen kein einheitliches Bild, 1991 ist eher eine Zunahme bei mehr Verkehr und Siedlungsdichte auszumachen, 2000 und 2010 ist dies nicht mehr deutlich (Abb. 42).

Der Rückgang der Konzentrationen zeigt, dass die Sanierung der Kehrlichtverbrennungsanlagen und von metallverarbeitenden Betrieben (Emissionen 1985 ca. 4.7 t, 2005 1.3 t; Quelle: BUWAL 1995, BAFU 2009) in der Schweiz die Luft erfolgreich entlastet hat.

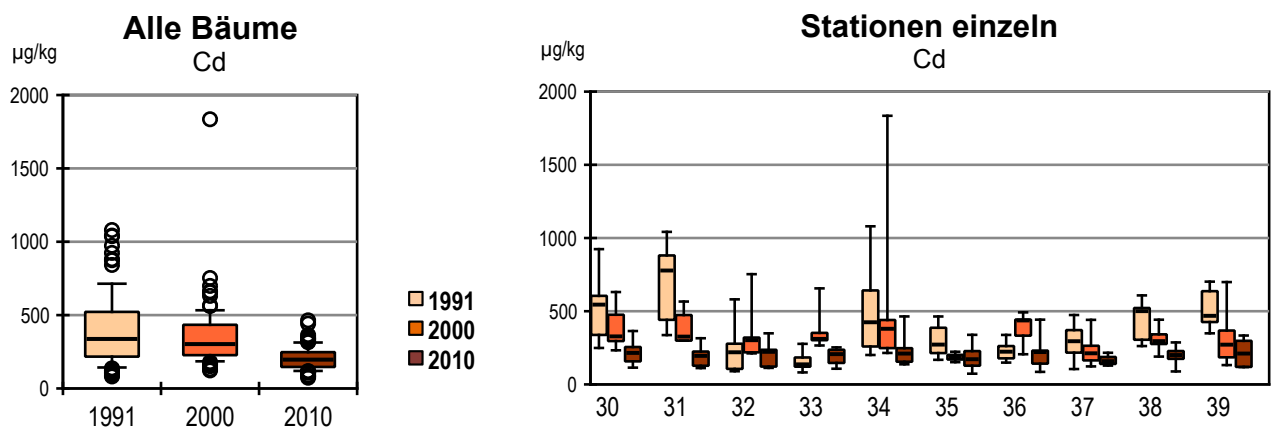


Abb. 40: Cadmium

Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben, Messperioden 1991, 2000, 2010. Links: Daten aller Bäume der zehn Stationen zusammengefasst. Rechts: Daten aufgeteilt nach Stationen.

Cd – Cadmium

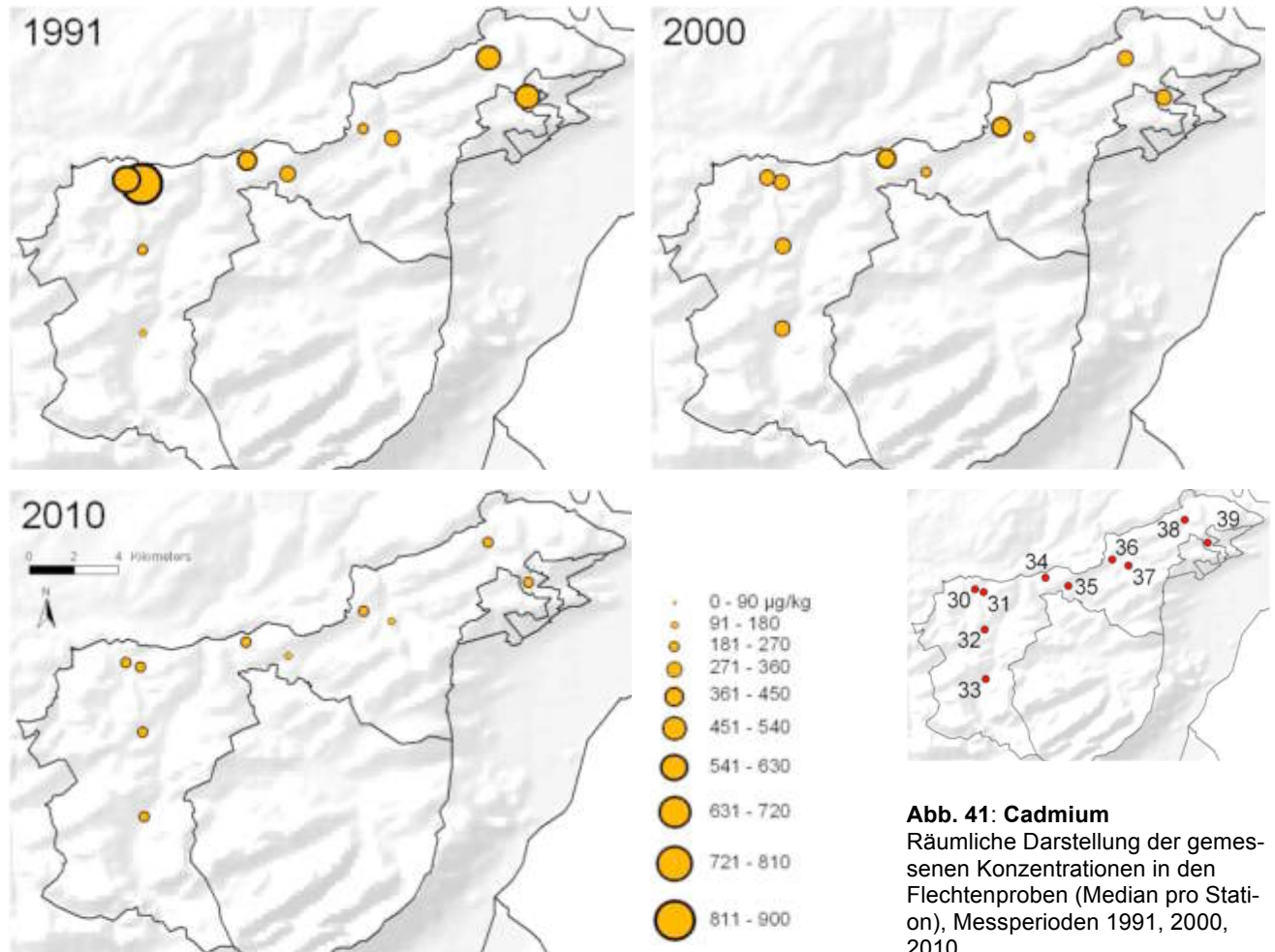


Abb. 41: Cadmium
Räumliche Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben (Median pro Station), Messperioden 1991, 2000, 2010.

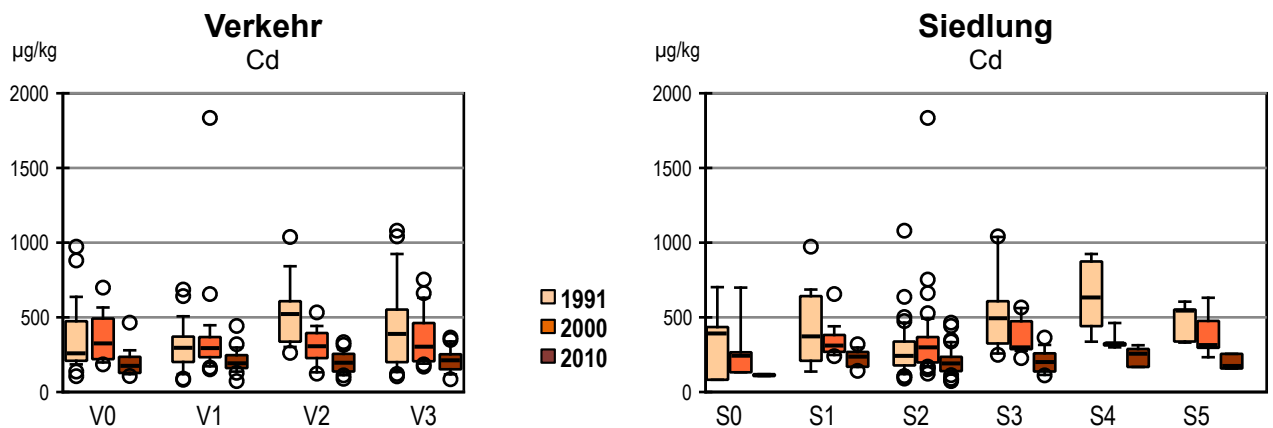


Abb. 42: Cadmium
Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben der drei Messperioden 1991, 2000 und 2010. Links: aufgeteilt in 4 Verkehrsklassen. Rechts: aufgeteilt in 6 Siedlungsklassen. Wegen zu geringer Stichproben ($n < 4$) sind die Klassen S0-2010 und S5-2010 nicht repräsentativ.

Chrom - Cr

Chrom ist ein essentielles Element, wirkt jedoch in der Cr(VI)-Form toxisch. Es wird vor allem in Legierungen (z.B. Edelstahl) und Farbpigmenten verwendet. Die natürlichen Emissionen überwiegen die anthropogenen.

Die Boxplotdarstellungen (Abb. 43) und Karten (Abb. 44) zeigen, dass die Konzentrationen an den berücksichtigten Stationen im Kanton Appenzell Ausserrhoden zwischen 1991 und 2000 um 29% abgenommen, jedoch bis 2010 bei vielen Stationen wieder zugenommen haben (35% gegenüber 2000). Dadurch hat es sich von 1991 zu 2010 kaum verändert hat. Ein ähnliches Ergebnis wurde auch bei der schweizerischen Moosuntersuchung (Thöni et al. 2008) gefunden: Abnahme von 30% zwischen 1990 und 2000, Zunahme von 36% zwischen 2000 und 2005. Auch in Deutschland wurde dieses Phänomen beobachtet. Der Grund für diesen Verlauf ist nicht klar, eventuell ist es eine Folge des Wirtschaftswachstums nach der Jahrtausendwende.

Bei den Stationen stechen vor allem Herisau (30, 31) und Heiden (38) heraus. Die Unterschiede zwischen allen sind 2010 jedoch deutlich geringer. Bei höherer Verkehrsbelastung und erhöhter Siedlungsdichte steigen die Chrom-Konzentration in der Flechte deutlich an (Abb. 45). Der positive Effekt der Emissionsminderungen in Industrie und Gewerbe ist, wie bei den anderen typischen Werkstoffen, an diesen Standorten gut erkennbar.

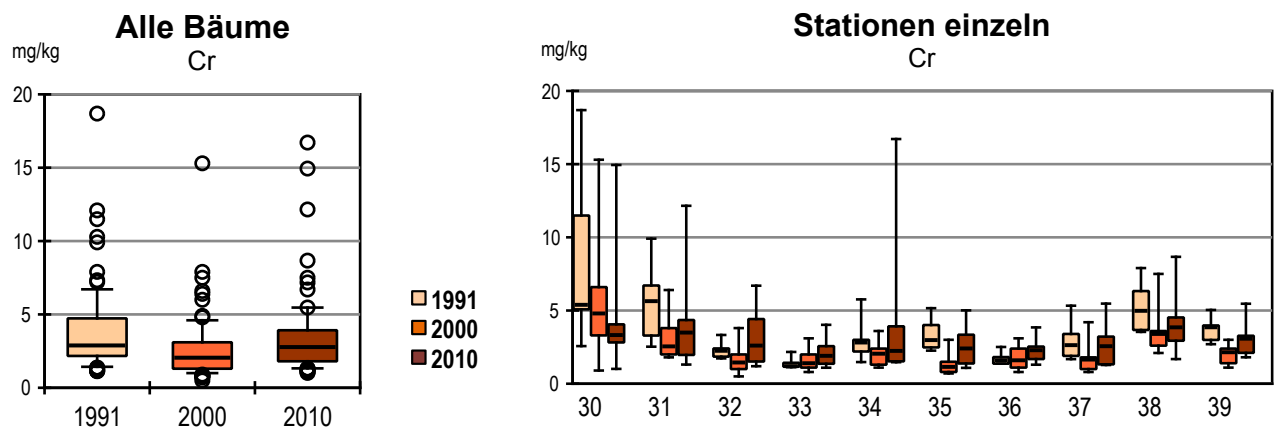


Abb. 43: Chrom

Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben, Messperioden 1991, 2000, 2010. Links: Daten aller Bäume der zehn Stationen zusammengefasst. Rechts: Daten aufgeteilt nach Stationen.

Cr – Chrom

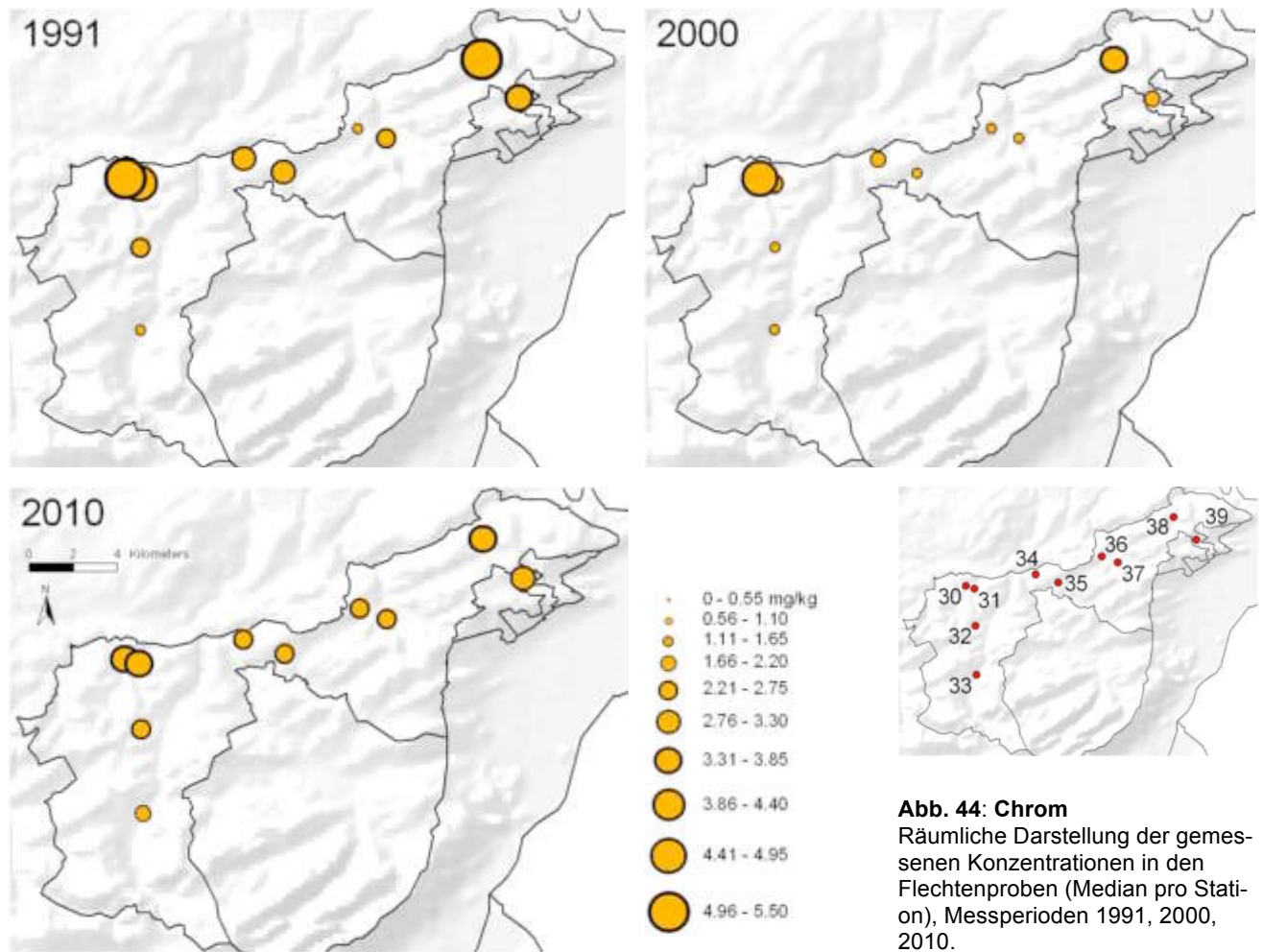


Abb. 44: Chrom
 Räumliche Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben (Median pro Station), Messperioden 1991, 2000, 2010.



Abb. 45: Chrom
 Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben der drei Messperioden 1991, 2000 und 2010. Links: aufgeteilt in 4 Verkehrsklassen. Rechts: aufgeteilt in 6 Siedlungsklassen. Wegen zu geringer Stichproben ($n < 4$) sind die Klassen S0-2010 und S5-2010 nicht repräsentativ.

Cobalt - Co

Cobalt ist ein essentielles Element und erst in hohen Dosen giftig. Es kommt überwiegend aus natürlichen Quellen, aber auch von der metallverarbeitenden Industrie.

Die Boxplotdarstellungen (Abb. 46) und Karten (Abb. 47) zeigen, dass die Konzentrationen an den berücksichtigten Stationen im Kanton Appenzell Ausserrhoden zwischen 1991 und 2010 um 24% abgenommen haben. Auch in der schweizerischen Moosuntersuchung (Thöni/Seitler 2004), in welcher allerdings emittentenferne Standorte berücksichtigt wurden, wurde zwischen 1990 und 2000 eine Abnahme von rund 30% gefunden.

Vor allem bei den Stationen Herisau (30, 31), Heiden (38) und Schachen b. Reute (39) wurden 1991 und weniger stark im Jahr 2000 erhöhte Werte gemessen. Die Verkehrsbelastung scheint kaum Einfluss auf die Cobalt-Konzentration in der Flechte zu haben, hingegen zeigen die Stationen mit grösserer Siedlungsdichte leicht erhöhte Werte infolge der allgemeinen Tätigkeiten im Siedlungsgebiet. (Abb. 48).

Der Rückgang der Konzentrationen ist wohl auf Sanierungen von Industrieanlagen in der Schweiz zurückzuführen.

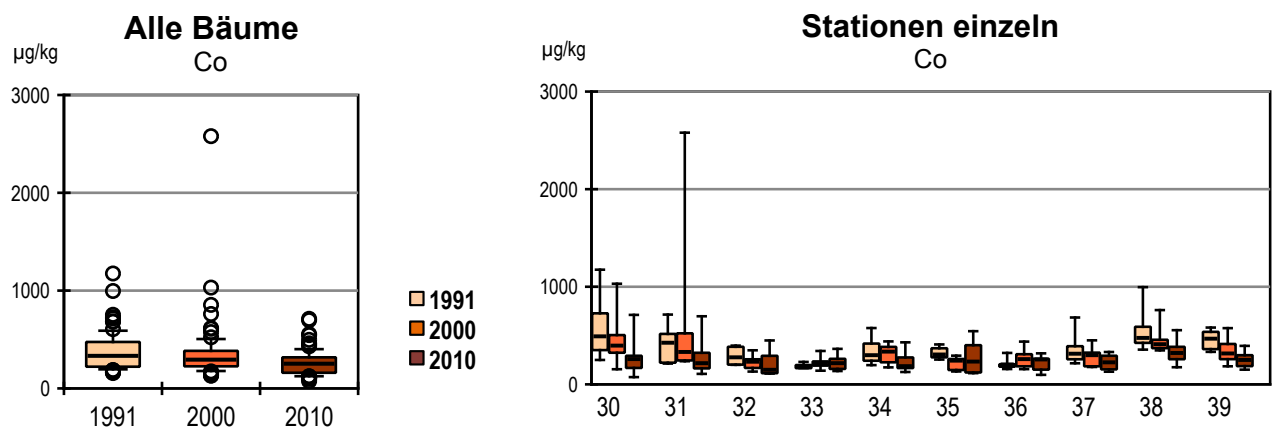


Abb. 46: Cobalt

Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben, Messperioden 1991, 2000, 2010. Links: Daten aller Bäume der zehn Stationen zusammengefasst. Rechts: Daten aufgeteilt nach Stationen.

Co – Cobalt

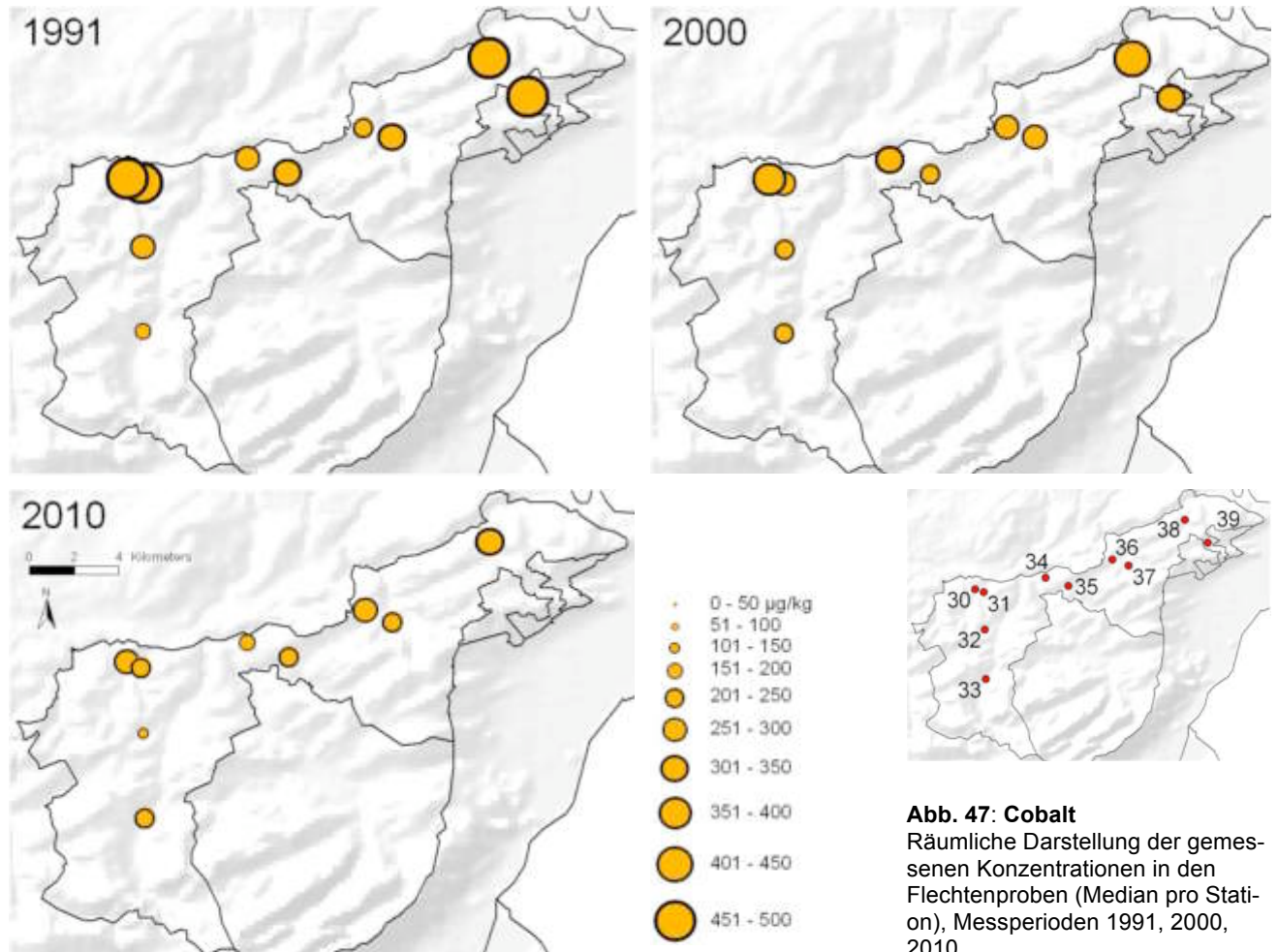


Abb. 47: Cobalt
 Räumliche Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben (Median pro Station), Messperioden 1991, 2000, 2010.

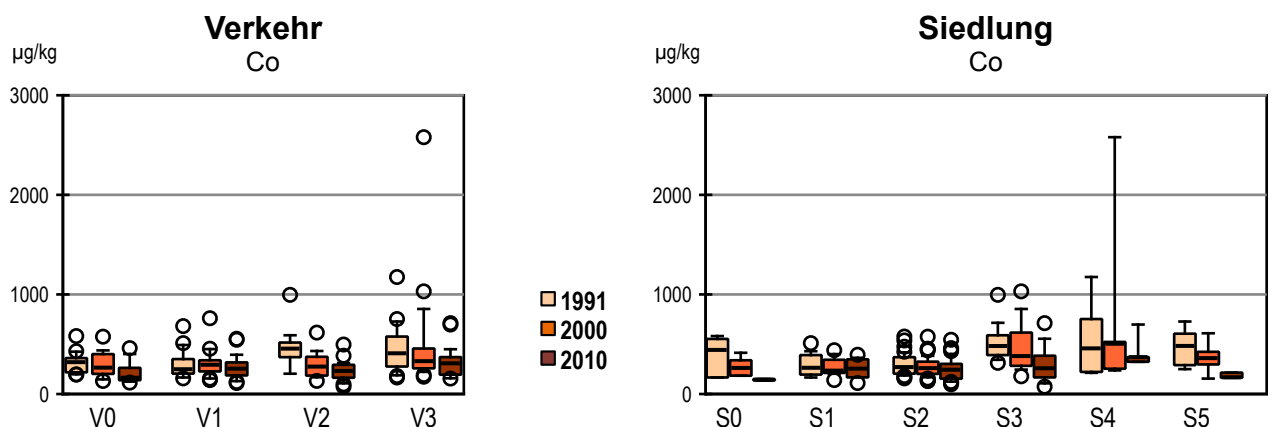


Abb. 48: Cobalt
 Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben der drei Messperioden 1991, 2000 und 2010. Links: aufgeteilt in 4 Verkehrsklassen. Rechts: aufgeteilt in 6 Siedlungsklassen. Wegen zu geringer Stichproben ($n < 4$) sind die Klassen S0-2010 und S5-2010 nicht repräsentativ.

Eisen - Fe

Eisen ist ein essentielles Element und nicht toxisch. Eisen findet vor allem in Form von Stahl Verwendung. Es gibt praktisch keinen vom Menschen gefertigten Gegenstand, der nicht Eisen enthält oder bei dessen Fabrikation nicht Geräte aus Stahl zum Einsatz kommen.

Die Boxplotdarstellungen (Abb. 49) und Karten (Abb. 50) zeigen, dass die Konzentrationen an den berücksichtigten Stationen im Kanton Appenzell Ausserrhoden zwischen 1991 und 2010 im Gesamten um 30% abgenommen haben. In der schweizerischen Moosuntersuchung (Thöni et al. 2008), in welcher emittentenferne Standorte berücksichtigt wurden, wurde zwischen 1990 und 2005 eine schwach signifikante Abnahme von 20% gefunden. Die Abnahme ist möglicherweise die Folge des Rückganges der eisenverarbeitenden Betriebe in der Schweiz und der emissionsmindernden Massnahmen in lokalen Industrie und dem Gewerbe. Relativ hohe Konzentrationen wurden bei den Stationen Herisau (30, 31) und Heiden (38) gemessen, sowie auch bei höherer Verkehrsbelastung (V3) und Siedlungsdichte (S 3,4,5; Abb. 51).

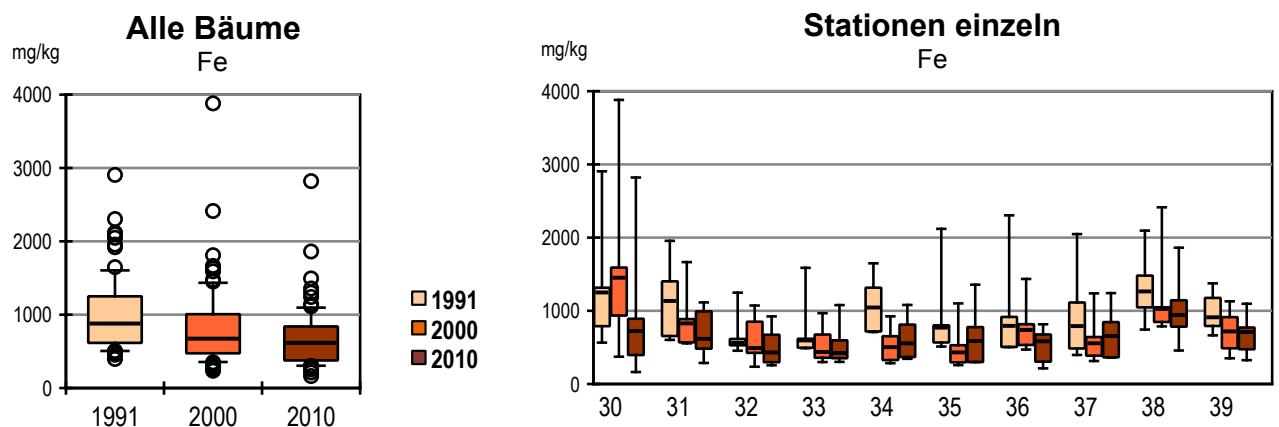


Abb. 49: Eisen

Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben, Messperioden 1991, 2000, 2010. Links: Daten aller Bäume der zehn Stationen zusammengefasst. Rechts: Daten aufgeteilt nach Stationen.

Fe – Eisen

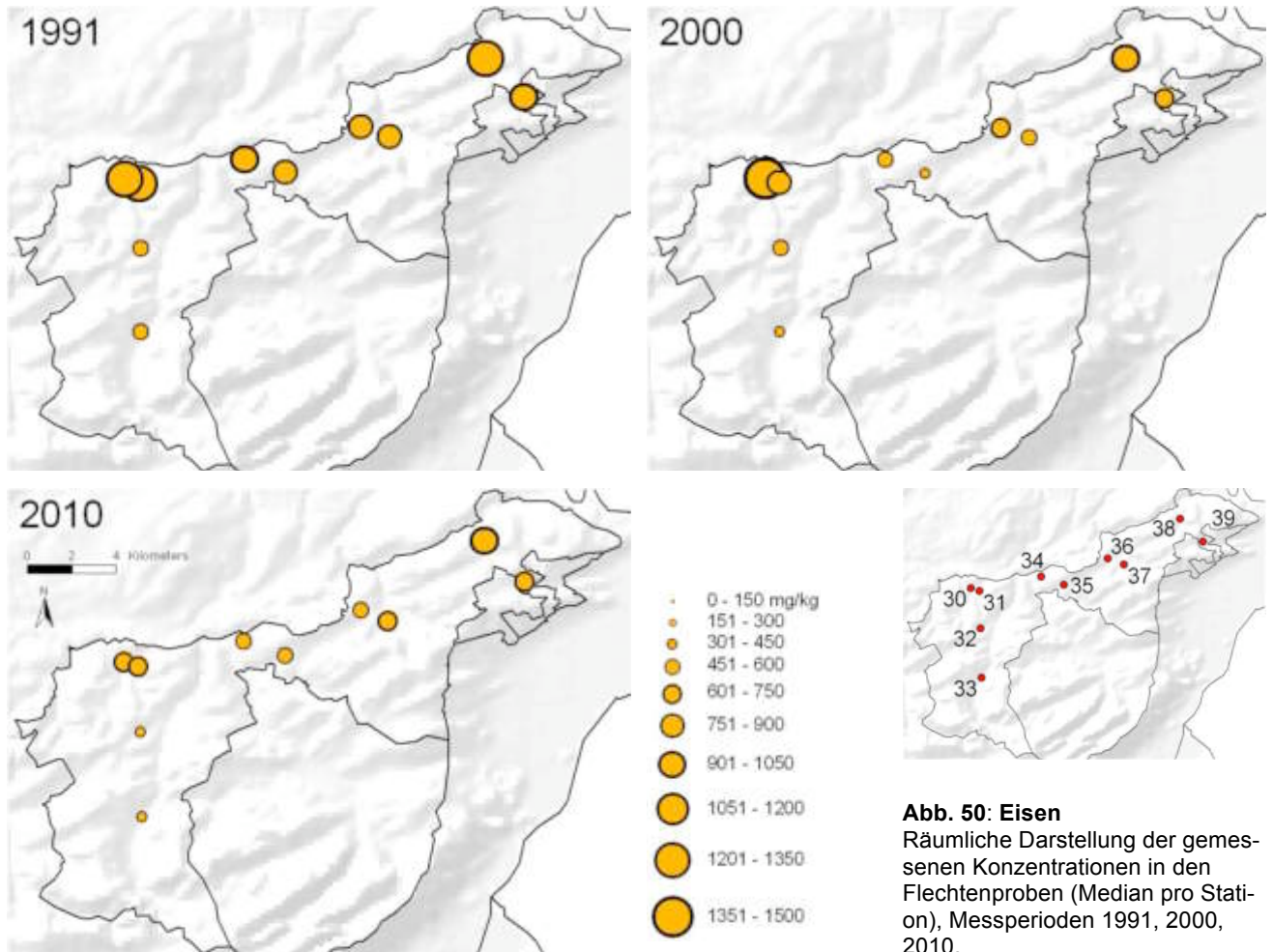


Abb. 50: Eisen
 Räumliche Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben (Median pro Station), Messperioden 1991, 2000, 2010.

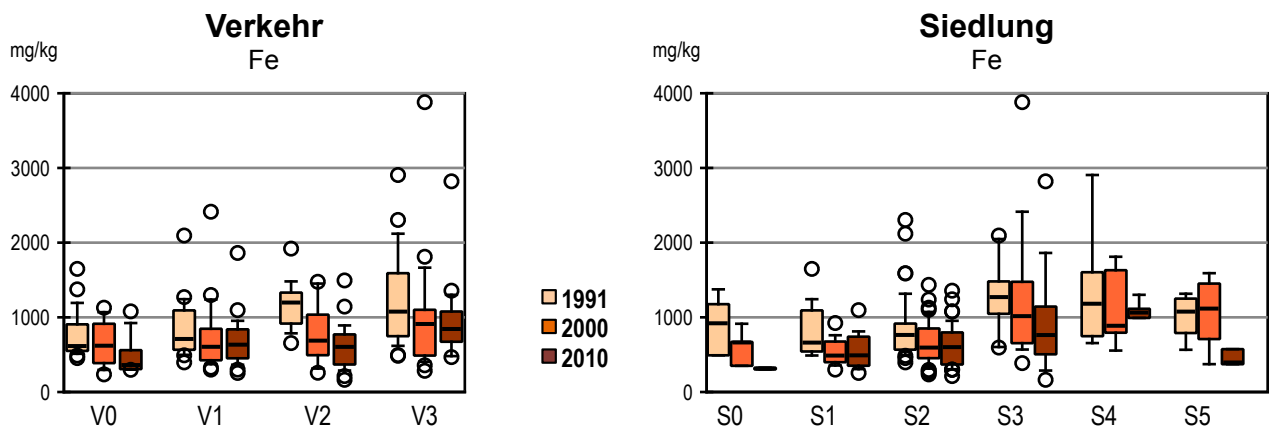


Abb. 51: Eisen
 Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben der drei Messperioden 1991, 2000 und 2010. Links: aufgeteilt in 4 Verkehrsklassen. Rechts: aufgeteilt in 6 Siedlungsklassen. Wegen zu geringer Stichproben ($n < 4$) sind die Klassen S0-2010 und S5-2010 nicht repräsentativ.

Kupfer - Cu

Kupfer ist ein essentielles Element, für Mensch und Tier erst in hohen Dosen giftig, das jedoch auf Algen und Pilzen bereits in relativ geringer Menge toxisch wirkt. Es wird darum auch als Algi- und Fungizid eingesetzt (Schwimmbäder, Rebbau). Es wird vor allem auch in Legierungen, elektrischen Leitern und Verkleidungen verwendet. Die natürlichen und anthropogenen Emissionen sind ähnlich hoch.

Die Boxplotdarstellungen (Abb. 52) und Karten (Abb. 53) zeigen, dass die Konzentrationen an den berücksichtigten Stationen im Kanton Appenzell Ausserrhoden zwischen 1991 und 2010 im Gesamten um 25% abgenommen haben. In der schweizerischen Moosuntersuchung (Thöni et al. 2008), in welcher allerdings emittentenferne Standorte berücksichtigt wurden, wurde keine signifikante Konzentrationsänderung gefunden.

Relativ hohe Konzentrationen wurden bei den Stationen Herisau (30, 31) und Heiden (38) gemessen, sowie auch bei höherer Verkehrsbelastung und Siedlungsdichte, vor allem bei Industrie-Standorten (S5, Abb. 54). Dies spiegelt den Einsatz von Kupfer an Bauten und dessen Korrosion.

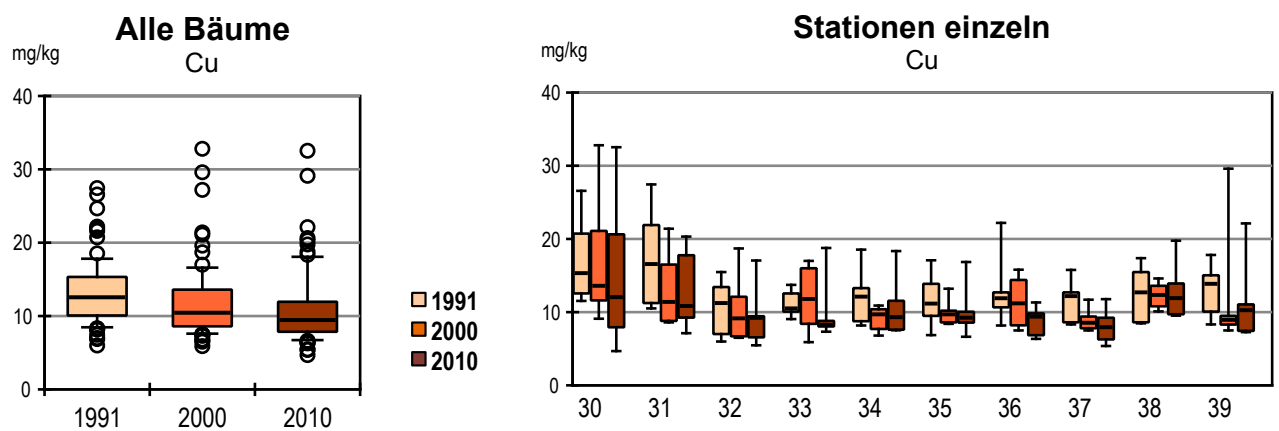


Abb. 52: Kupfer

Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben, Messperioden 1991, 2000, 2010. Links: Daten aller Bäume der zehn Stationen zusammengefasst. Rechts: Daten aufgeteilt nach Stationen.

Cu – Kupfer

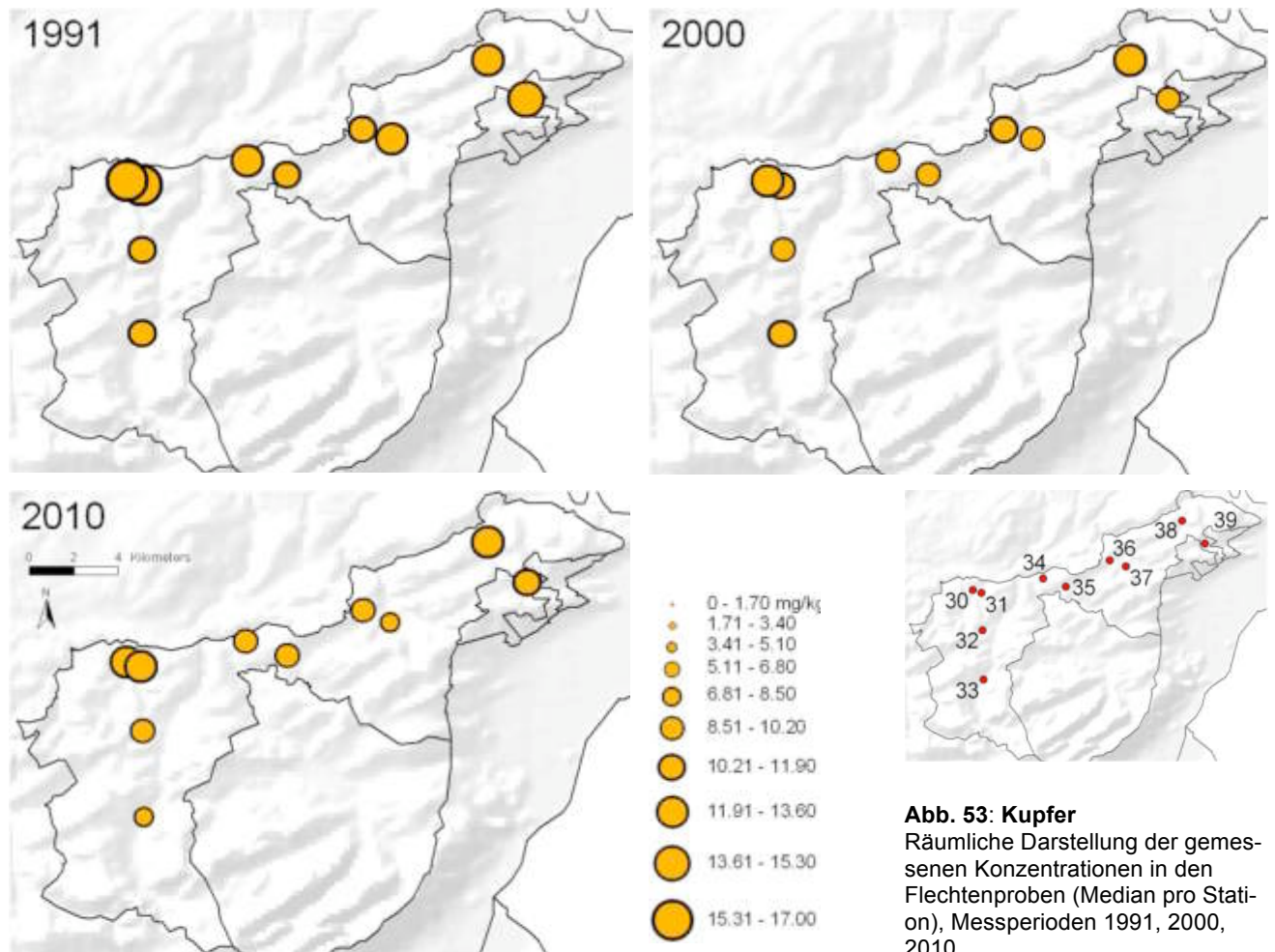


Abb. 53: Kupfer
 Räumliche Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben (Median pro Station), Messperioden 1991, 2000, 2010.

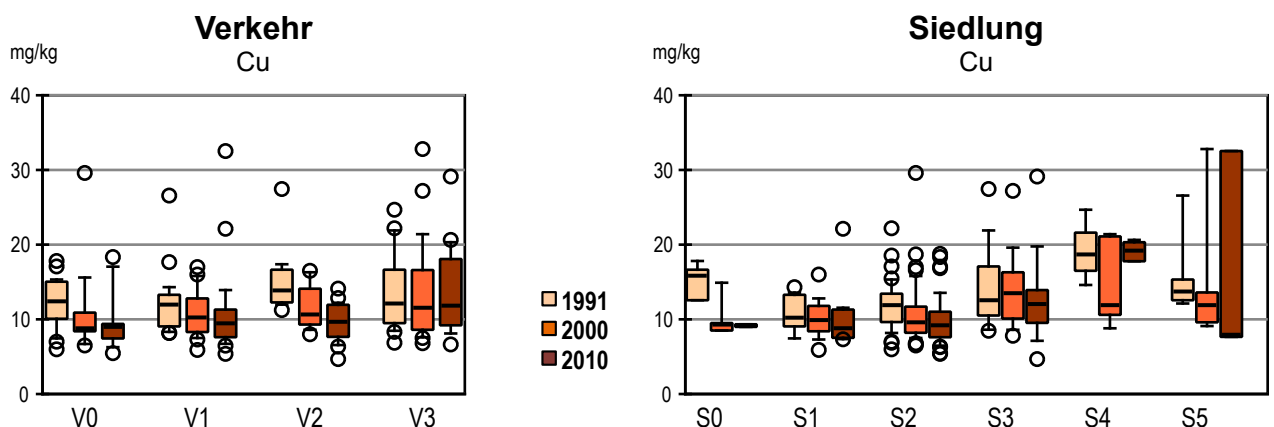


Abb. 54: Kupfer
 Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben der drei Messperioden 1991, 2000 und 2010. Links: aufgeteilt in 4 Verkehrsklassen. Rechts: aufgeteilt in 6 Siedlungsklassen. Wegen zu geringer Stichproben ($n < 4$) sind die Klassen S0-2010 und S5-2010 nicht repräsentativ.

Molybdän - Mo

Molybdän ist in Spuren essentiell und kaum toxisch. Es wird u.a. als Legierungselement für Härtung von Stahl benutzt. Die Emission ist vorwiegend anthropogen, durch Industrie, Verbrennungsprozesse (Mineralöl) und Düngung.

Die Boxplotdarstellungen (Abb. 55) und Karten (Abb. 56) zeigen, dass die Konzentrationen an den berücksichtigten Stationen im Kanton Appenzell Ausserrhoden zwischen 1991 und 2000 im Gesamten meist abgenommen (um 17%), jedoch bis 2010 bei vielen Stationen wieder um 38% zugenommen haben. Das gleiche „Verhalten“ zeigt auch Chrom. Der Grund für diesen Verlauf ist nicht klar, eine mögliche Erklärung ist, dass beide Elemente vor allem für Stahllegierungen verwendet werden und durch das Wirtschaftswachstums nach der Jahrtausendwende mehr davon produziert oder gebraucht wurde.

Bei den Stationen stechen vor allem Herisau (30, 31) und Heiden (38) heraus. Bei höherer Verkehrsbelastung (V2, V3) und erhöhter Siedlungsdichte (S3 bis S5) steigen die Molybdän-Konzentration in der Flechte deutlich an (Abb. 57).

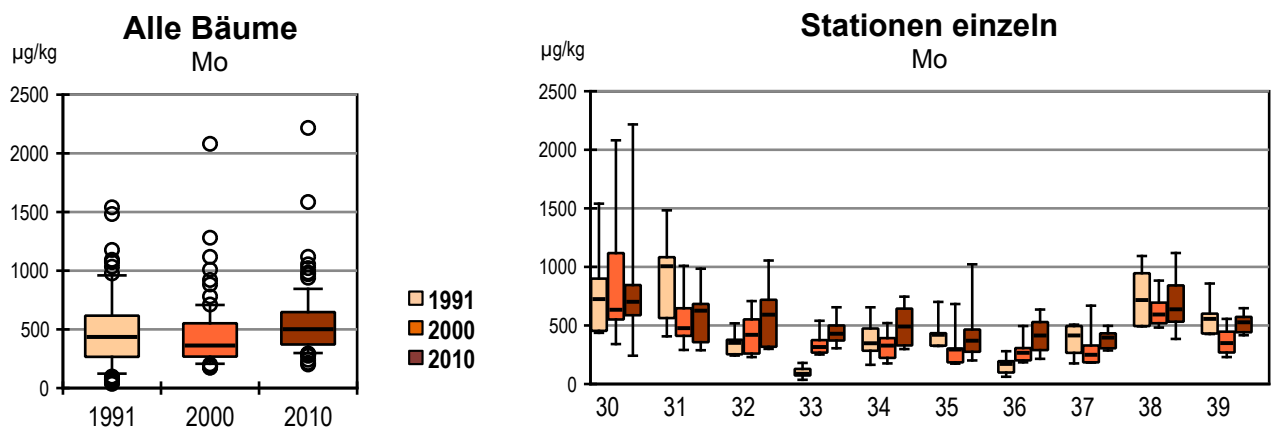


Abb. 55: Molybdän

Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben, Messperioden 1991, 2000, 2010. Links: Daten aller Bäume der zehn Stationen zusammengefasst. Rechts: Daten aufgeteilt nach Stationen.

Mo – Molybdän

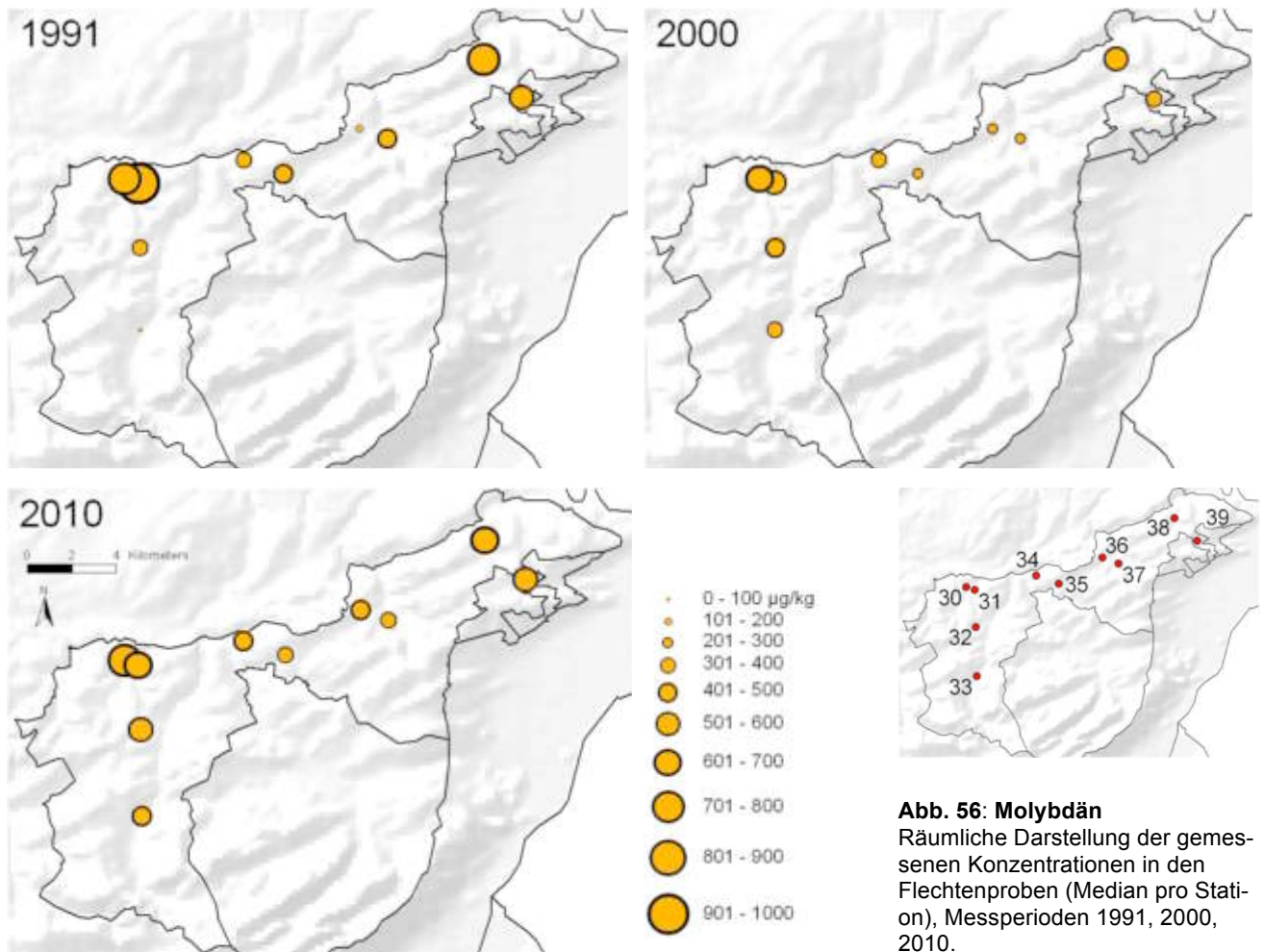


Abb. 56: Molybdän
 Räumliche Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben (Median pro Station), Messperioden 1991, 2000, 2010.

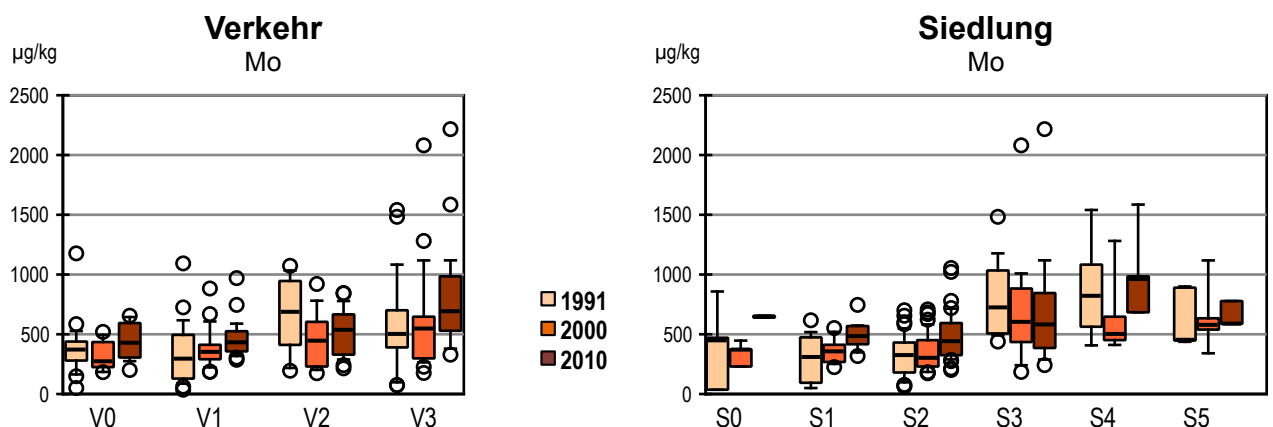


Abb. 57: Molybdän
 Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben der drei Messperioden 1991, 2000 und 2010. Links: aufgeteilt in 4 Verkehrsklassen. Rechts: aufgeteilt in 6 Siedlungsklassen. Wegen zu geringer Stichproben ($n < 4$) sind die Klassen S0-2010 und S5-2010 nicht repräsentativ.

Nickel - Ni

Nickel ist in ganz geringen Mengen essentiell, wirkt in wenig höherer Konzentration toxisch und ist als Kontaktallergen bekannt. Nickel wird vor allem als Legierungsbestandteil bei Stahl eingesetzt (Chrom-Nickel-Stahl).

Die Boxplotdarstellungen (Abb. 58) und Karten (Abb. 59) zeigen, dass die Konzentrationen an den berücksichtigten Stationen im Kanton Appenzell Ausserrhoden zwischen 1991 und 2010 im Gesamten um 42% abgenommen haben. Sehr auffällig ist diese Abnahme mit ca. 80% bei den Stationen in Herisau (30, 31). Bei der Untersuchung 2010 wurde eine kleinere Streuung gefunden als vor allem 2000. Lokale Quellen, vor allem in der Industrie- und Gewerbezone, sind vermutlich saniert worden. In der schweizerischen Moosuntersuchung (Thöni et al. 2008), in welcher emittentenferne Standorte berücksichtigt wurden, wurde zwar eine Abnahme zwischen 1990 und 2000 gefunden, zwischen 2000 und 2005 jedoch wieder eine Zunahme.

Relativ hohe Konzentrationen wurden bei den Stationen Herisau (30, 31) und etwas weniger bei Heiden (38) gemessen, sowie auch bei höherer Verkehrsbelastung (V3) und Siedlungsdichte (S 3,4,5; Abb. 60). Die starke Abnahme in Herisau belegen die Erfolge bei der Emissionsminderung in den lokalen Industrie- und Gewerbebetrieben.

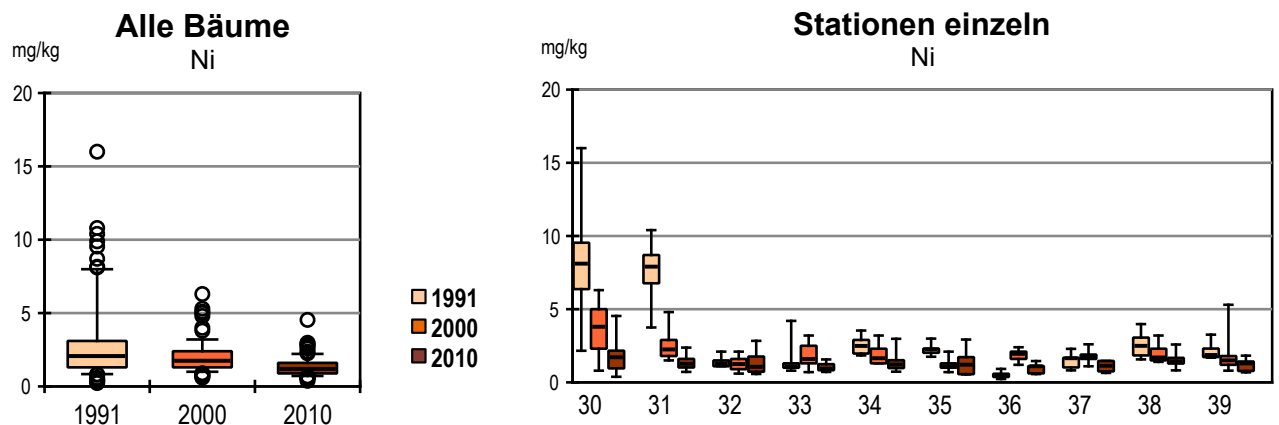


Abb. 58: Nickel

Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben, Messperioden 1991, 2000, 2010. Links: Daten aller Bäume der zehn Stationen zusammengefasst. Rechts: Daten aufgeteilt nach Stationen.

Ni – Nickel

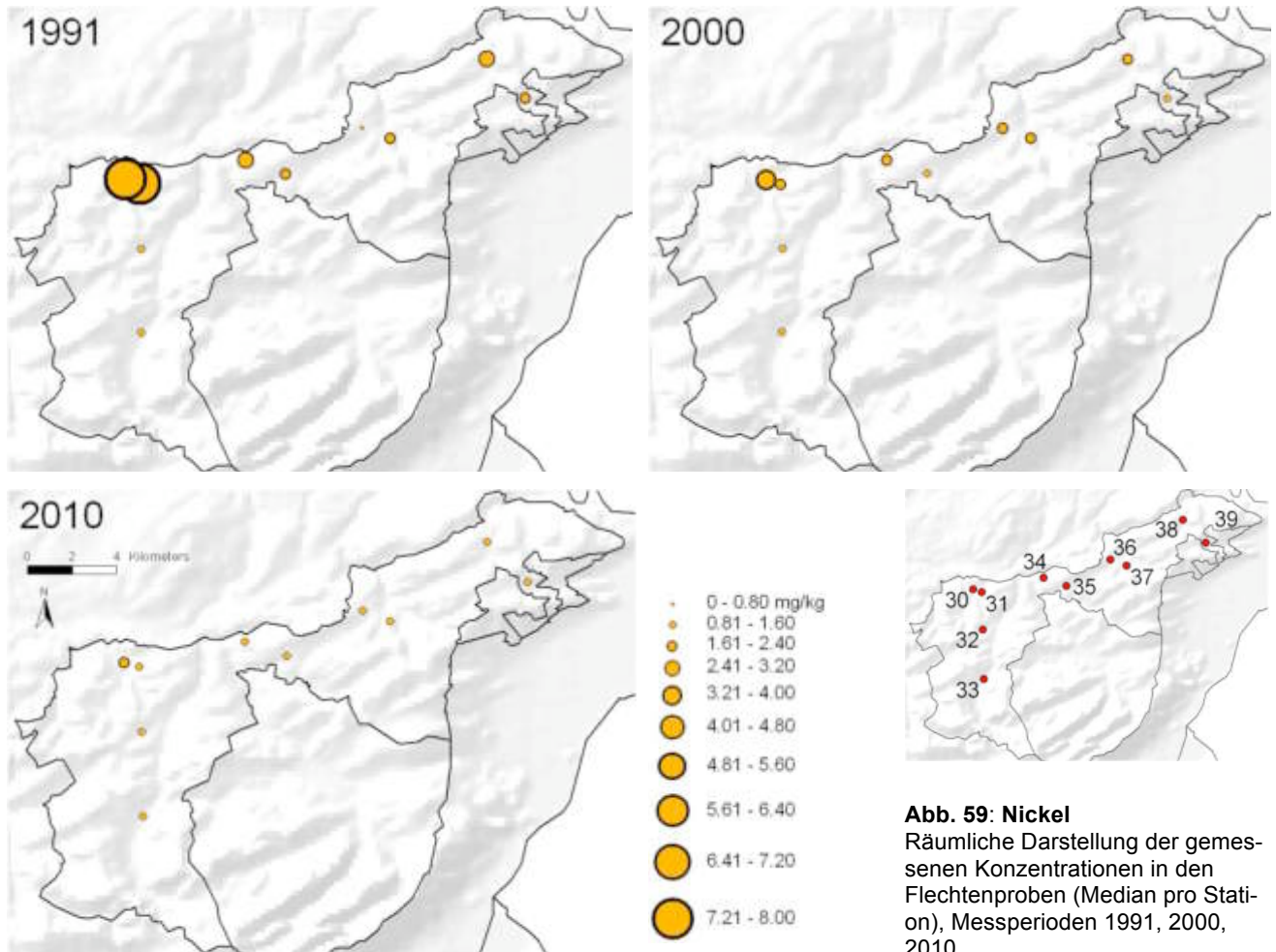


Abb. 59: Nickel
 Räumliche Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben (Median pro Station), Messperioden 1991, 2000, 2010.

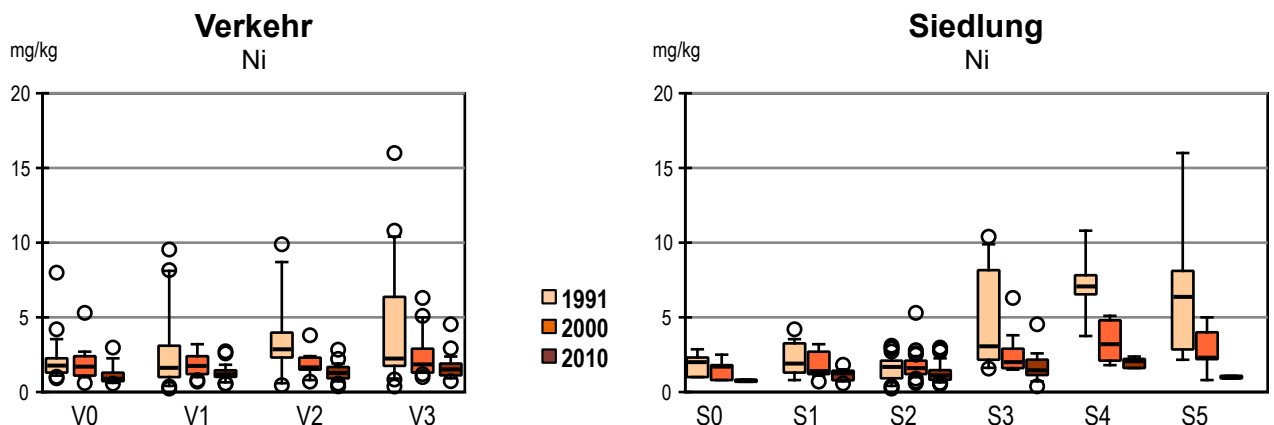


Abb. 60: Nickel
 Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben der drei Messperioden 1991, 2000 und 2010. Links: aufgeteilt in 4 Verkehrsklassen. Rechts: aufgeteilt in 6 Siedlungsklassen. Wegen zu geringer Stichproben ($n < 4$) sind die Klassen S0-2010 und S5-2010 nicht repräsentativ.

Vanadium - V

Vanadium ist vermutlich in ganz kleinen Mengen essentiell, wirkt aber bei hoher Belastung toxisch. Es wird hauptsächlich für Legierungen verwendet. Weltweit überwiegen die natürlichen Emissionen in besiedeltem Gebiet jedoch die anthropogenen, vor allem auch wegen der Verbrennung von fossilen Brennstoffen, welche relativ viel Vanadium enthalten.

Die Boxplotdarstellungen (Abb. 61) und Karten (Abb. 62) zeigen, dass an den berücksichtigten Stationen im Kanton Appenzell Ausserrhoden die Werte seit der Untersuchung 1991 stark abgenommen haben, über alle Bäume 59% zwischen 1991 und 2010 und 23% zwischen 2000 und 2010. Bei der Untersuchung 2010 wurde eine kleinere Streuung gefunden als vor allem 2000. Lokale Quellen, vor allem in der Industrie- und Gewerbezone, sind vermutlich saniert worden. Auch in der schweizerischen Moosuntersuchung (Thöni et al. 2008), in welcher allerdings emittentenferne Standorte berücksichtigt wurden, wurde zwischen 1990 und 2005 eine Abnahme von gegen 70% gefunden.

Die Unterschiede zwischen den Stationen war 2010 klein. Relativ hohe Werte wurden 1991 und 2000 bei den Stationen Herisau (30, 31) und Heiden (38) gemessen, niedrige Werte bei der ländlichen Station Urnäsch (33). Die Siedlungsdichte und (etwas weniger) die Verkehrsbelastung zeigen vor allem 1991 und 2000 einen grossen Einfluss auf die Vanadium-Konzentration (Abb. 63).

Der starke Rückgang kann auf Emissionsminderungen in den Verabreichungsprozessen, auf bessere Filtertechniken bei Emittenten sowie auf den Rückgang der Kohle- und Schwerölverbrennung zurückgeführt werden.

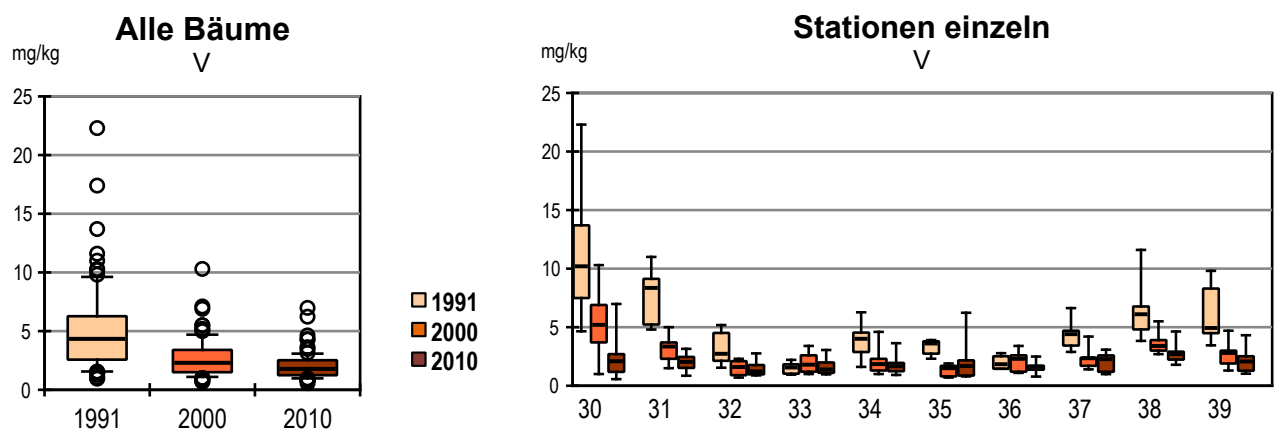


Abb. 61: Vanadium

Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben, Messperioden 1991, 2000, 2010. Links: Daten aller Bäume der zehn Stationen zusammengefasst. Rechts: Daten aufgeteilt nach Stationen.

V – Vanadium

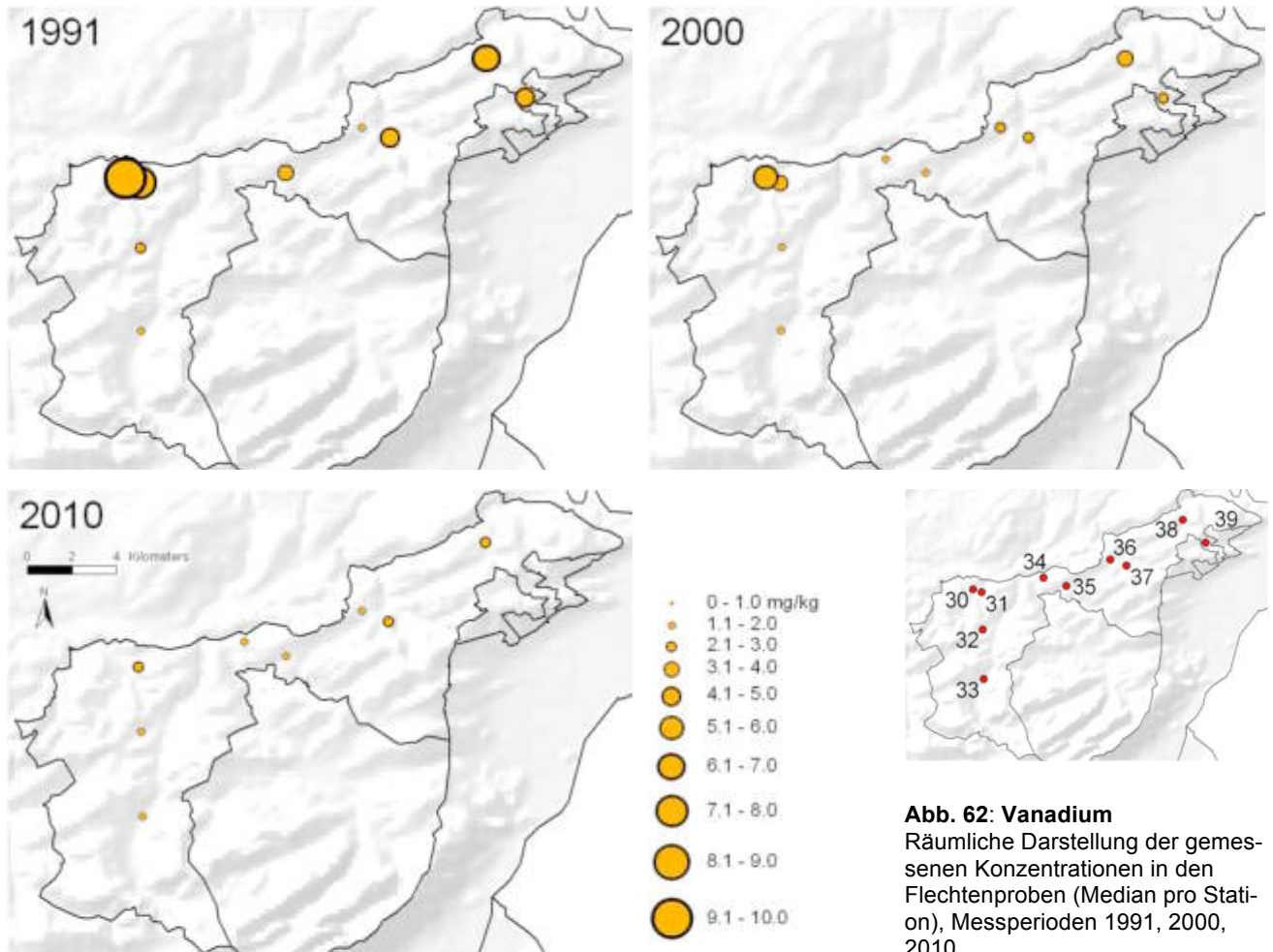


Abb. 62: Vanadium
 Räumliche Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben (Median pro Station), Messperioden 1991, 2000, 2010.

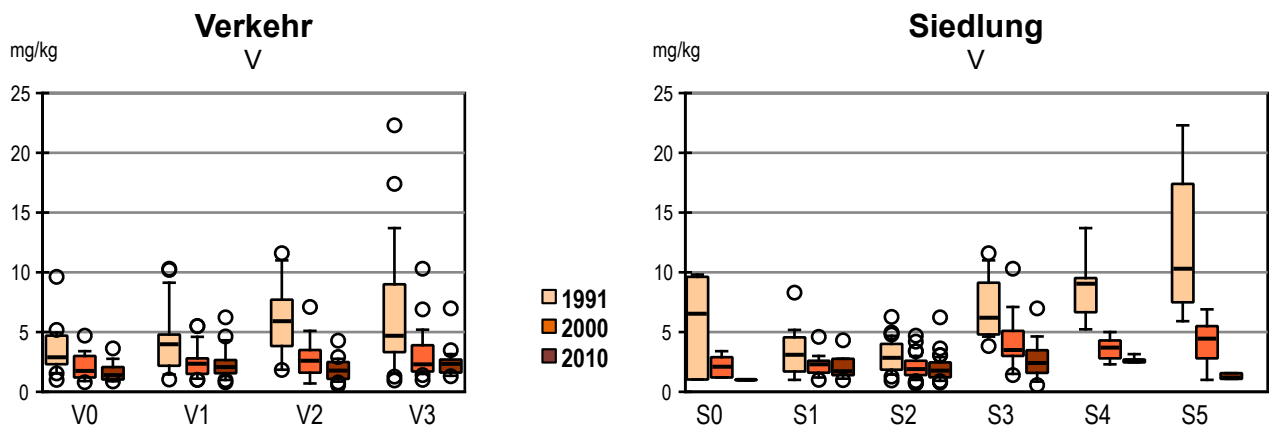


Abb. 63: Vanadium
 Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben der drei Messperioden 1991, 2000 und 2010. Links: aufgeteilt in 4 Verkehrsklassen. Rechts: aufgeteilt in 6 Siedlungsklassen. Wegen zu geringer Stichproben ($n < 4$) sind die Klassen S0-2010 und S5-2010 nicht repräsentativ.

Zink - Zn

Zink ist ein sehr wichtiges essentielles Element und erst in hohen Dosen toxisch. Es wird in vielen Produkten verwendet, hauptsächlich als Korrosionsschutz. Dabei sind verzinkte Oberflächen bisher noch nicht mit einem Schutzanstrich vor den Witterungseinflüssen geschützt. Die anthropogenen Emissionen sind deutlich höher als die natürlichen.

Die Boxplotdarstellungen (Abb. 64) und Karten (Abb. 65) zeigen, dass sich die Zn-Konzentration über die Zeit im Gesamten kaum verändert hat. Auch in der schweizerischen Moosuntersuchung (Thöni et al. 2008), in welcher allerdings emittentenferne Standorte berücksichtigt wurden, wurde zwischen 1990 und 2005 nur eine geringe Abnahme gemessen.

Hohe Konzentrationen wurden bei der Station Herisau Industrie (30) gemessen, niedrige in Trogen (37). Die Zinkbelastung nimmt auch bei höherer Verkehrsbelastung (V3) und Siedlungsdichte (S3, S4, S5) zu (Abb. 66). Dabei spielt sicher die Präsenz von Zink in vielen Produkten insbesondere auch als Korrosionsschutz bei metallischen Oberflächen eine wichtige Rolle.

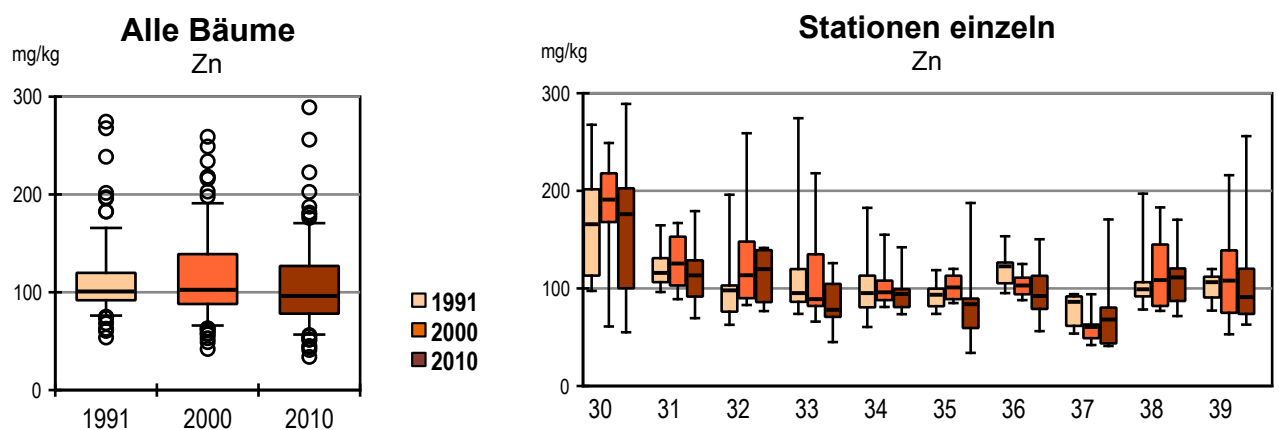


Abb. 64: Zink

Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben, Messperioden 1991, 2000, 2010. Links: Daten aller Bäume der zehn Stationen zusammengefasst. Rechts: Daten aufgeteilt nach Stationen.

Zn – Zink

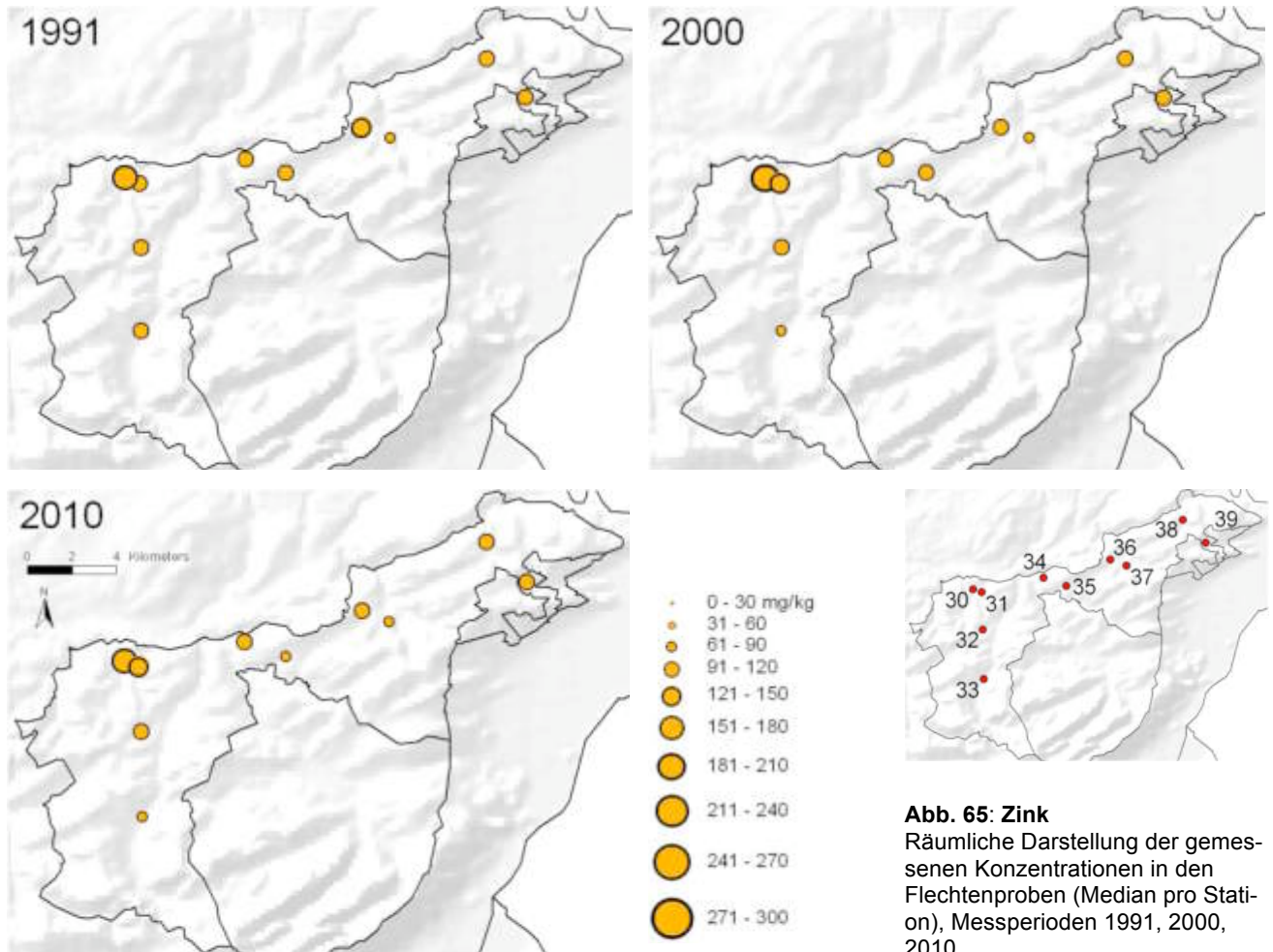


Abb. 65: Zink
 Räumliche Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben (Median pro Station), Messperioden 1991, 2000, 2010.

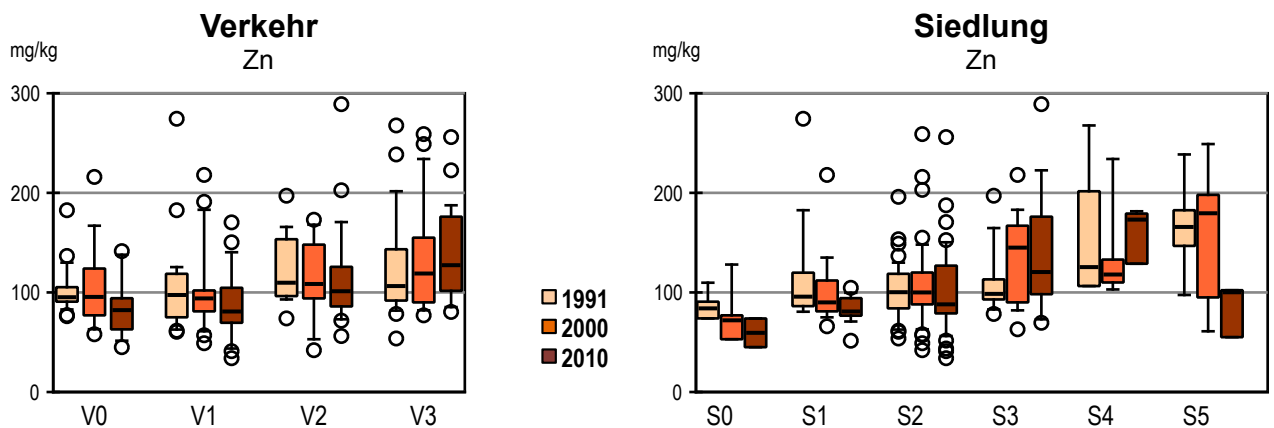


Abb. 66: Zink
 Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben der drei Messperioden 1991, 2000 und 2010. Links: aufgeteilt in 4 Verkehrsklassen. Rechts: aufgeteilt in 6 Siedlungsklassen. Wegen zu geringer Stichproben ($n < 4$) sind die Klassen S0-2010 und S5-2010 nicht repräsentativ.

Zinn - Sn

Zinn ist in metallischer Form ungiftig (Zinnbecher, verzinnte Weissblech-Konservendosen), Organoverbindungen sind jedoch sehr toxisch. Zinn wird in der metallverarbeitenden Industrie und für Legierungen (Bronze) verwendet. Die natürlichen Emissionen sind ähnlich hoch wie die anthropogenen.

Bei der Betrachtung der Resultate muss berücksichtigt werden, dass die Zinn-Analytik Unsicherheiten aufwies. Die Boxplotdarstellungen (Abb. 67) und Karten (Abb. 68) zeigen, dass die Konzentrationen an den berücksichtigten Stationen im Kanton Appenzell Ausserrhoden zwischen 1991 und 2000 um 44% abgenommen, jedoch bis 2010 bei vielen Stationen wieder zugenommen haben, im Gesamten 42%, ähnlich wie bei Chrom und Molybdän. Der Grund für diesen Verlauf ist nicht klar, eventuell ist es eine Folge des Wirtschaftswachstums nach der Jahrtausendwende.

Bei den Stationen stechen vor allem Herisau (30, 31) und Heiden (38) heraus. Bei höherer Verkehrsbelastung und erhöhter Siedlungsdichte steigen die Zinn-Konzentrationen in der Flechte deutlich an (Abb. 69).

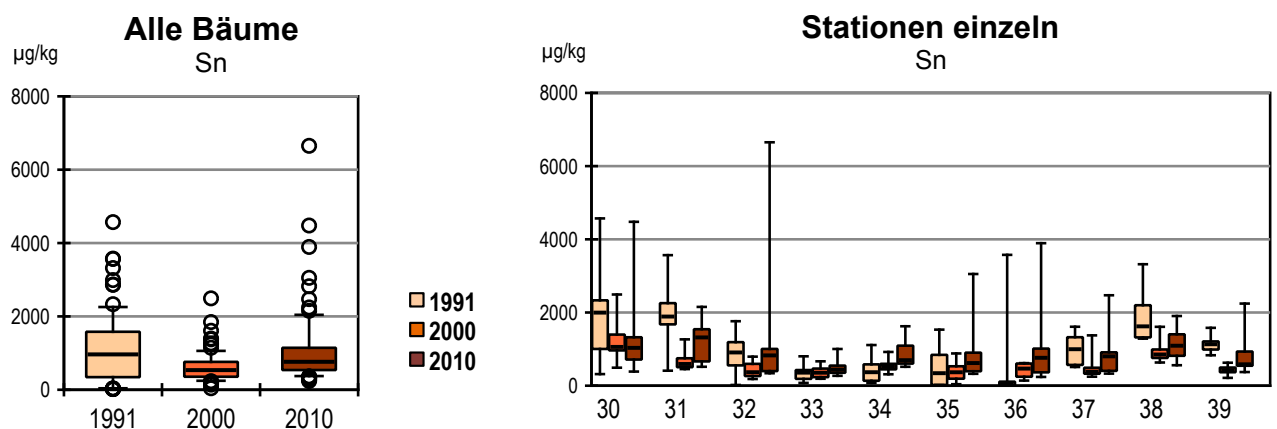


Abb. 67: Zinn

Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben, Messperioden 1991, 2000, 2010. Links: Daten aller Bäume der zehn Stationen zusammengefasst. Rechts: Daten aufgeteilt nach Stationen.

Sn – Zinn

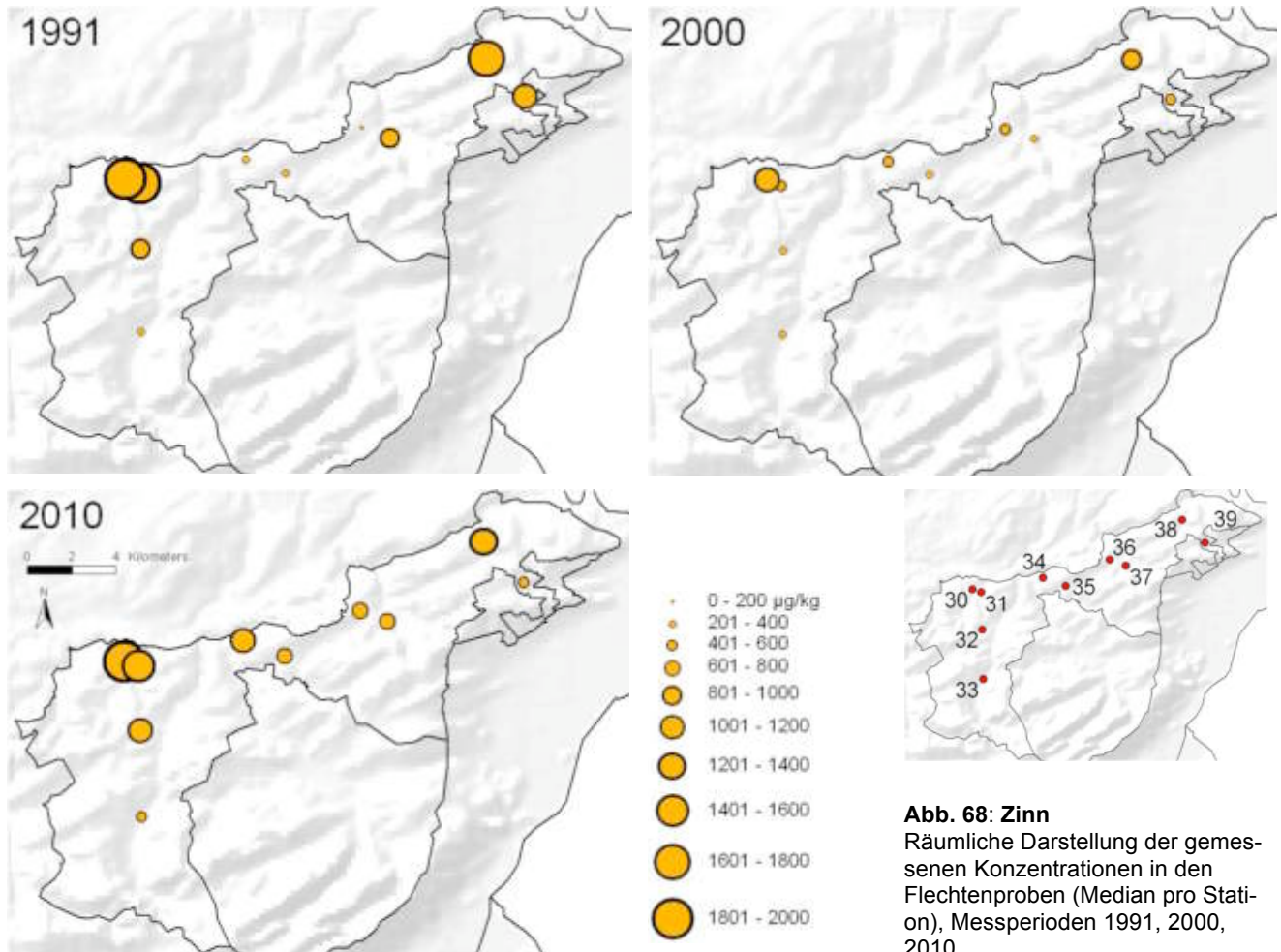


Abb. 68: Zinn
 Räumliche Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben (Median pro Station), Messperioden 1991, 2000, 2010.

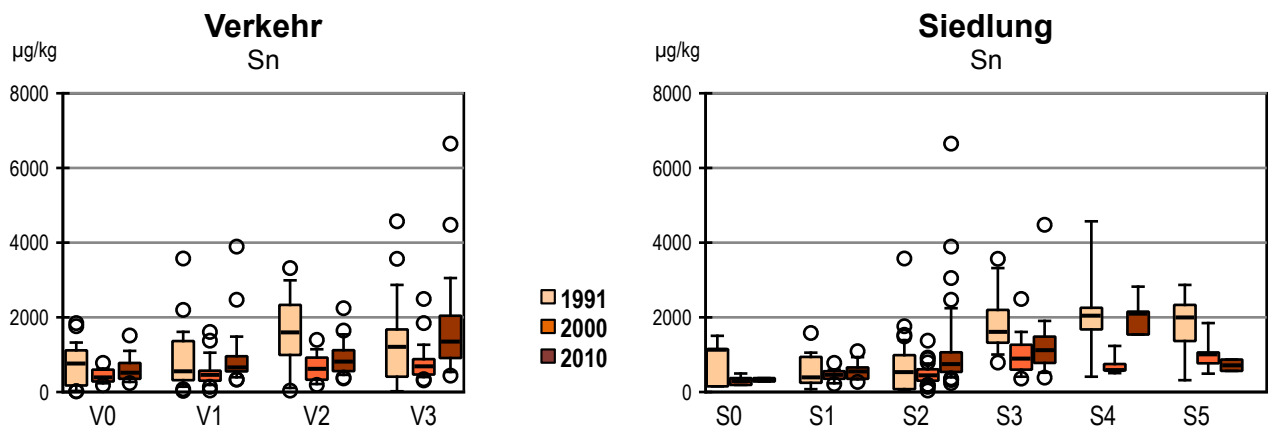


Abb. 69: Zinn
 Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben der drei Messperioden 1991, 2000 und 2010. Links: aufgeteilt in 4 Verkehrsklassen. Rechts: aufgeteilt in 6 Siedlungsklassen. Wegen zu geringer Stichproben ($n < 4$) sind die Klassen S0-2010 und S5-2010 nicht repräsentativ.

Schwefel - S

Schwefel ist ein essentielles Element, gewisse Verbindungen sind jedoch toxisch. In der Erdkruste ist es das 16. häufigste Element, es ist bei Vulkanen und in Form von Gips weit verbreitet. Als anthropogener Luftschadstoff wird Schwefel als SO_2 durch Verbrennung von fossilen Brennstoffen emittiert, welche natürlicherweise hohe Konzentrationen von Schwefel aufweisen.

Für die Karten wurde der „natürliche“ Gehalt von ca. 600 mg pro kg abgezogen (Kubin 1990).

Die Boxplotdarstellungen (Abb. 70) und Karten (Abb. 71) zeigen, dass die Konzentrationen an den berücksichtigten Stationen im Kanton Appenzell Ausserrhoden zwischen 1991 und 2010 um 23% abgenommen haben. Der Rückgang der Konzentrationen ist vor allem auf die Einführung von schwefelarmen fossilen Brennstoffen in der Schweiz (Rückgang der SO_2 -Emission zwischen 1985 und 2007 um ca. 80%) zurückzuführen.

Die Verkehrsbelastung scheint kaum Einfluss auf die Schwefelkonzentration in der Flechte zu haben, hingegen zeigen die Stationen mit höherer Siedlungsdichte eher höhere Werte (Abb. 72).

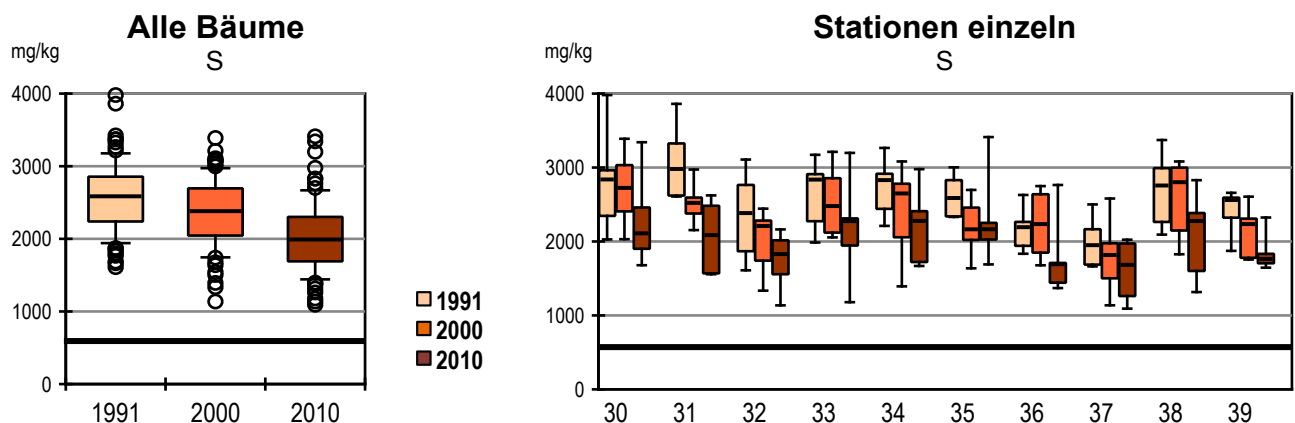


Abb. 70: Schwefel

Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben, Messperioden 1991, 2000, 2010.

Links: Daten aller Bäume der zehn Stationen zusammengefasst. Rechts: Daten aufgeteilt nach Stationen. Der waagrechte Strich zeigt den ungefähren „natürlichen“ Gehalt an Schwefel in der Flechte an (Kubin, 1990).

S – Schwefel

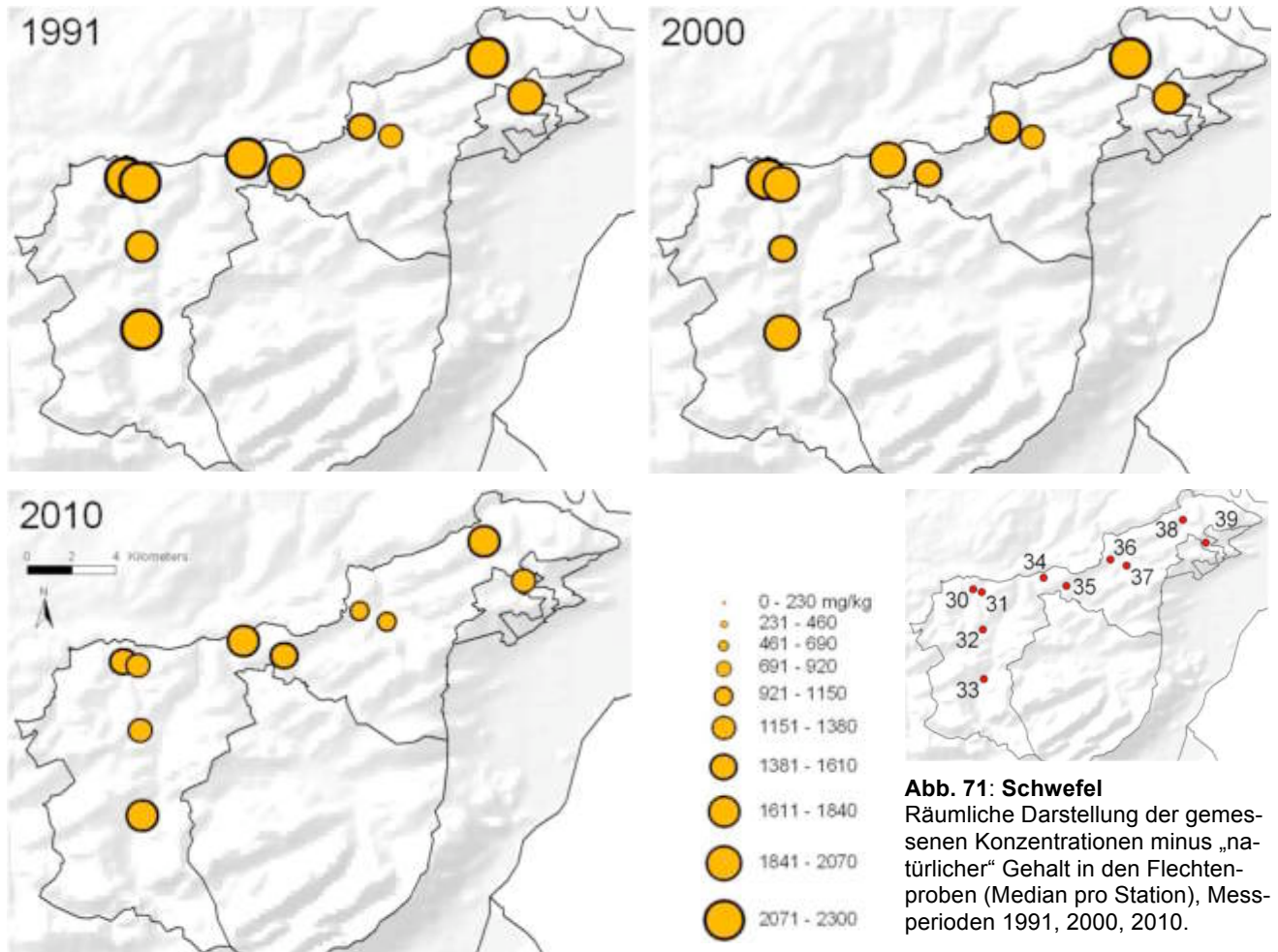


Abb. 71: Schwefel
 Räumliche Darstellung der gemessenen Konzentrationen minus „natürlicher“ Gehalt in den Flechtenproben (Median pro Station), Messperioden 1991, 2000, 2010.

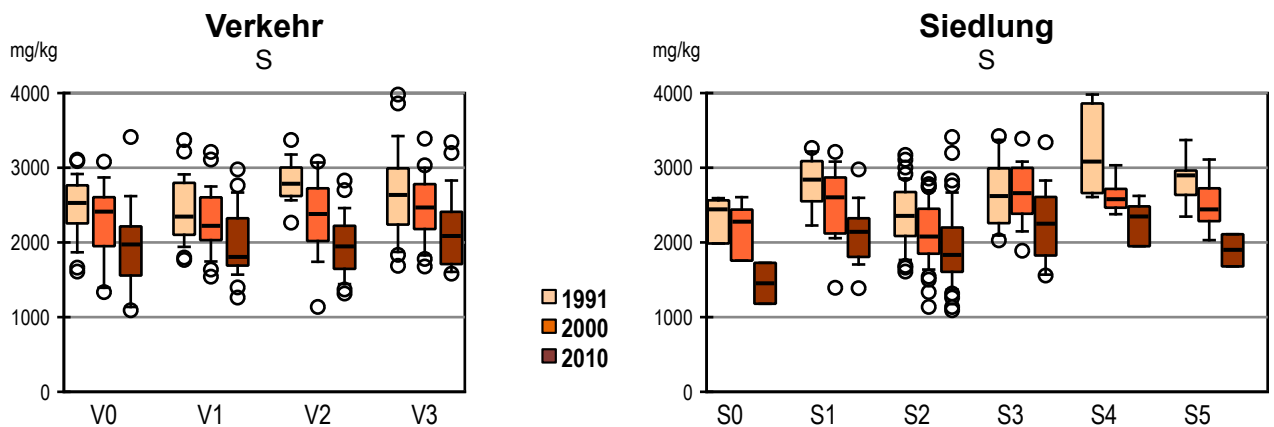


Abb. 72: Schwefel
 Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben der drei Messperioden 1991, 2000 und 2010. Links: aufgeteilt in 4 Verkehrsklassen. Rechts: aufgeteilt in 6 Siedlungsklassen. Wegen zu geringer Stichproben ($n < 4$) sind die Klassen S0-2010 und S5-2010 nicht repräsentativ.

Stickstoff - N

Stickstoff ist ein Makronährstoff, gewisse Verbindungen sind jedoch toxisch und/oder sie überdüngen naturnahe Ökosysteme. Als anthropogener Luftschadstoff wird Stickstoff als NO_x durch Verbrennung bei hohen Temperaturen gebildet (Oxidation des Luftstickstoffes und des Stickstoffs in den Brennstoffen). Eine weitere in ländlichem Raum eher noch wichtigere Stickstoffverbindung ist Ammoniak, der hauptsächlich in der Landwirtschaft emittiert wird.

Für die Karten wurde der „natürliche“ Gehalt von ca. 7'500 mg pro kg (Kubin 1990) abgezogen.

Die Boxplotdarstellungen (Abb. 73) und Karten (Abb. 74) zeigen, dass die Konzentrationen an den berücksichtigten Stationen im Kanton Appenzell Ausserrhoden zwischen 1991 und 2000 tendenziell angestiegen sind und erst zwischen 2000 und 2010 mit 16% leicht abgenommen haben. Der Rückgang der Konzentrationen ist vor allem auf die Einführung von Katalysatoren für benzinbetriebene Fahrzeuge und auf die Optimierung der bei Verbrennungsprozesse bei Öl- und Gasfeuerungen in der Schweiz zurückzuführen (Rückgang der NO_2 -Emission zwischen 1985 und 2007 um ca. 56%), aber die Ammoniakimmission hat sich in den letzten beiden Jahrzehnten kaum vermindert (OSTLUFT, 2010).

Die Verkehrsbelastung scheint kaum Einfluss auf die Stickstoff-Konzentration in der Flechte zu haben. Bei den unterschiedlichen Siedlungsdichten ergibt sich kein einheitliches Bild. Die höchsten Werte wurden meist bei Bäumen in relativ wenig besiedeltem Gebiet (S1) gefunden, was wohl auf die Nähe zur Landwirtschaft zurückgeführt werden kann (Abb. 75).

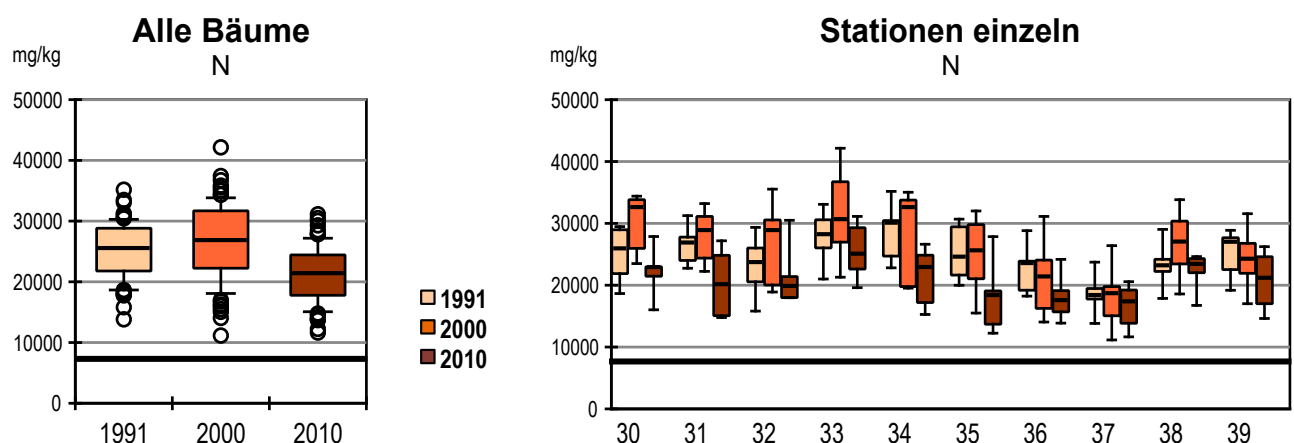


Abb. 73: Stickstoff

Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben, Messperioden 1991, 2000, 2010.

Links: Daten aller Bäume der zehn Stationen zusammengefasst. Rechts: Daten aufgeteilt nach Stationen. Der waagrechte Strich zeigt den ungefähren natürlichen Gehalt an Stickstoff in der Flechte an (Kubin, 1990).

N – Stickstoff

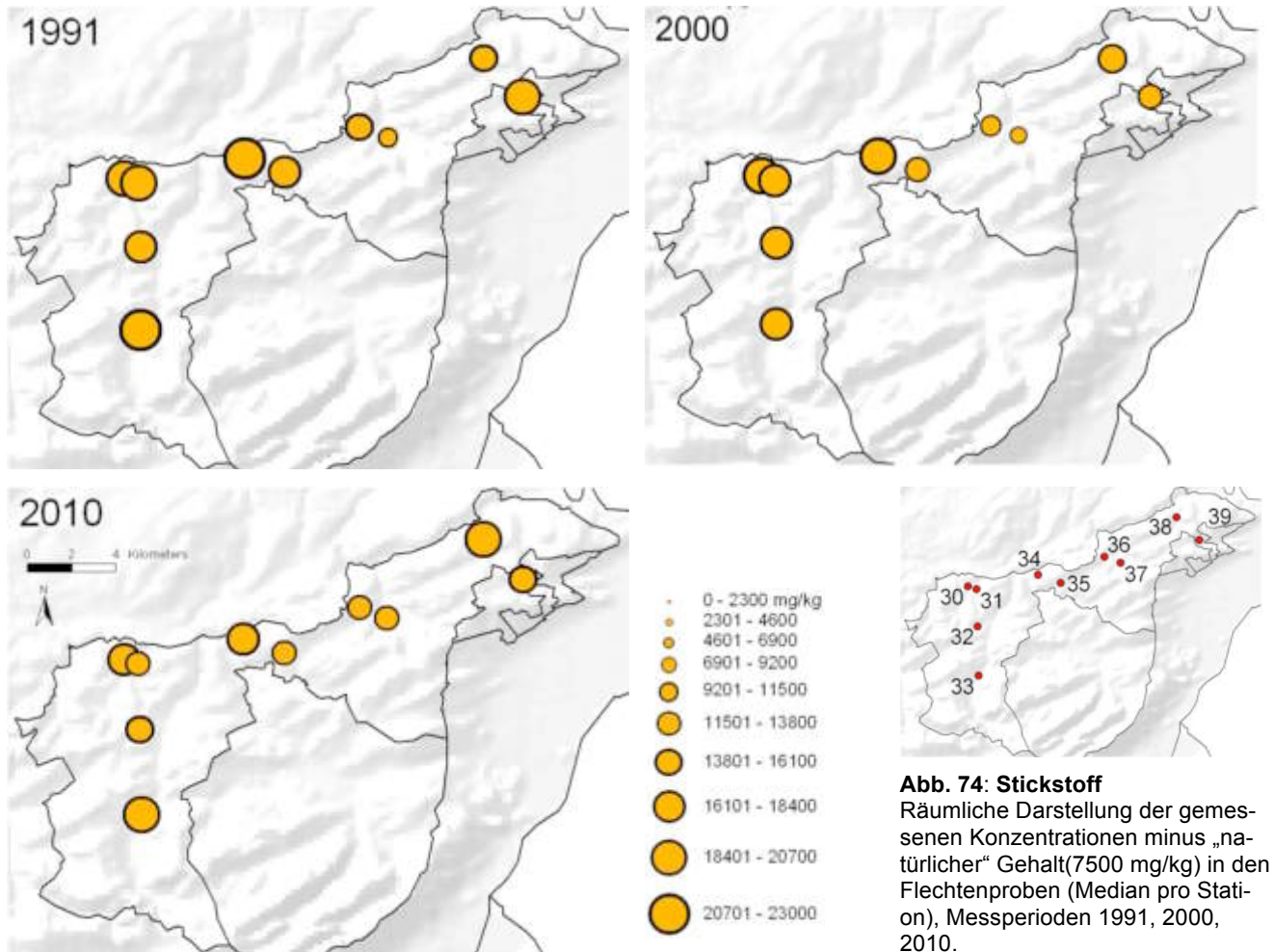


Abb. 74: Stickstoff
 Räumliche Darstellung der gemessenen Konzentrationen minus „natürlicher“ Gehalt(7500 mg/kg) in den Flechtenproben (Median pro Station), Messperioden 1991, 2000, 2010.

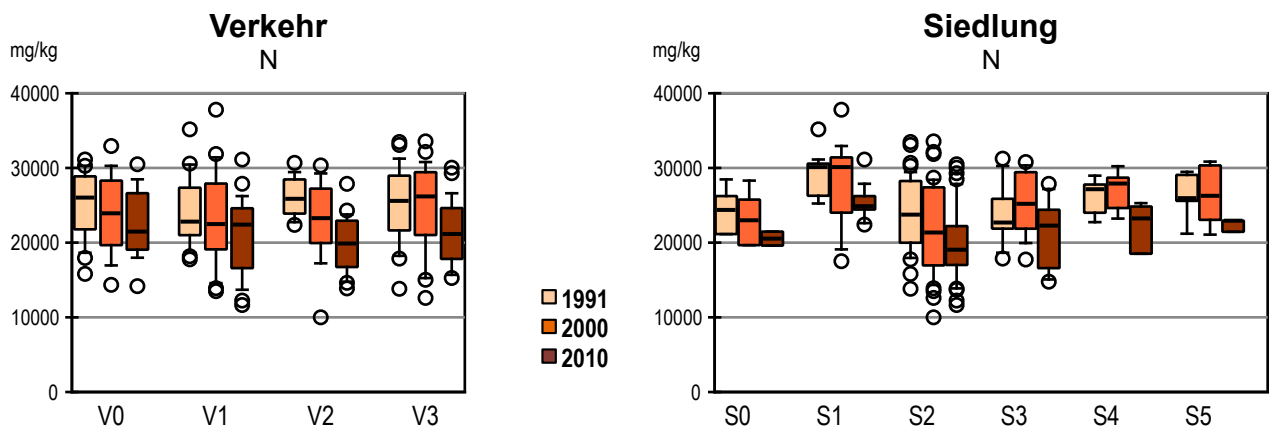
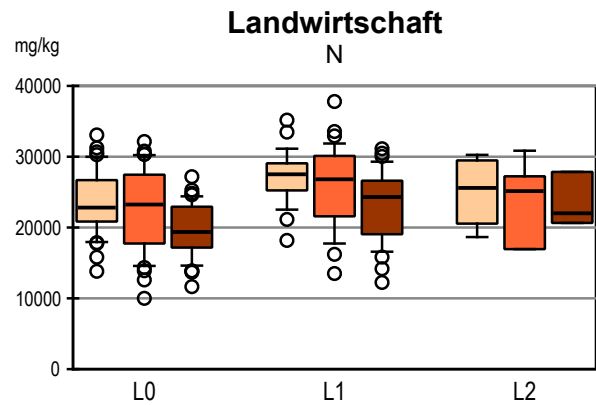


Abb. 75: Stickstoff
 Boxplot-Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den Flechtenproben der drei Messperioden 1991, 2000 und 2010. Links: aufgeteilt in 4 Verkehrsklassen. Rechts: aufgeteilt in 6 Siedlungsklassen. Wegen zu geringer Stichproben (n<4) sind die Klassen S0-2010 und S5-2010 nicht repräsentativ.

Vergleich N mit Landwirtschaft

Die Stickstoffkonzentrationen in den Flechten sind in der Nähe der intensiven Landwirtschaft (L1 - mittlere Boxplots) tendenziell höher als bei extensiver Landwirtschaft (L2 - rechte Boxplots) und deutlich höher gegenüber Standorten ohne Landwirtschaft (L0 – keine Landwirtschaft).

Abb. 76:
Vergleich des N-Gehalts in der Flechte (Einzelwerte als Boxplot in den drei Jahren dargestellt).
L0 = keine Landwirtschaft
L1= Intensive LW
L2= extensive LW
Wegen zu geringer Stichprobe (n=3) ist die Klasse L2 2010 nicht repräsentativ.



Platin - Pt

Auch Platin wurde in allen drei Perioden gemessen. Jedoch sind die Konzentrationen, die 1991 bestimmt worden sind, nicht plausibel, diejenigen von 2010 meist unter der Bestimmungsgrenze (siehe Anhang 9 Qualitätssicherung). Es werden deshalb keine Auswertungen gezeigt.

5. Diskussion

Die Flechtenkartierung zeigt eine Verbesserung der Luftqualität von 1991 bis 2000, anschliessend aber eine Nivellierung der Belastungsverhältnisse. Die Zone der mittleren Belastung hat sich auf Kosten der sehr geringen Gesamtbelastung ausgedehnt, sie besitzt nun den grössten Flächenanteil. Die Zone der geringen Gesamtbelastung hat sich etwas vergrössert, Zonen mit kritischer Luftbelastung sind erfreulicherweise verschwunden. Der Nitroindex zeigt, dass die Eutrophierung der Luft seit 1991 stark zugenommen hat.

Im Folgenden sollen die Luftgütewerte, welche die Flechten ausweisen, mit den Einzelstoffmessungen aus den Flechten sowie den technischen Messdaten in Beziehung gesetzt und mögliche Ursachen für die Veränderungen der Belastungsverhältnisse betrachtet werden.

5.1 Luftqualität

5.1.1 Emissionsentwicklung

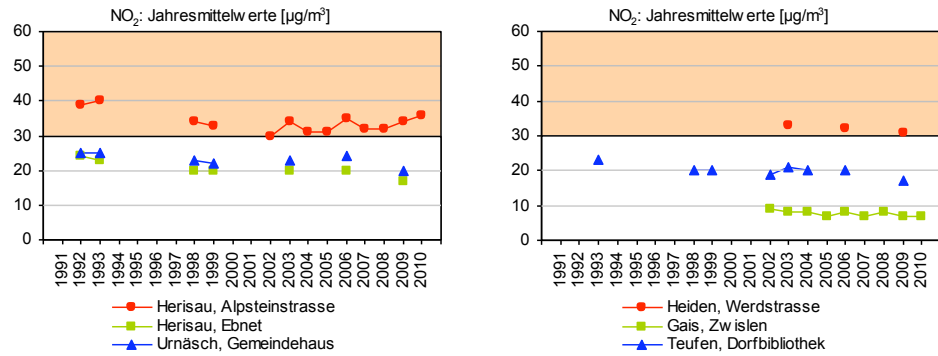
Seit Inkraftsetzung des Umweltschutzgesetzes und der Luftreinhalteverordnung 1992 haben verschiedene Schadstoffemissionen in die Luft massiv abgenommen. Dazu beigetragen haben technische Verbesserungen in Industrie und Gewerbe bei der Produktion und Energiegewinnung, Optimierungen des Material- und Energieeinsatzes, Verzicht und Minimierung von problematischen Substanzen sowie der Einbau von Abluftreinigungsanlagen bei kritischen Prozessen, wie z.B. bei den Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA). So konnten die Belastungen mit Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid und Schwermetallen in der Schweiz unter die Schwelle der Schädlichkeit gesenkt werden (Eidgenössische Kommission für Lufthygiene 2010). Starke positive Auswirkungen hatte die Ausrüstung der Benzinmotoren mit Katalysatoren und damit verbunden dem Verzicht auf verbleites Benzin bei den Personen- und Lieferwagen. Im Bereich der Haushalte haben die Entwicklungen bei den Öl- und Gasfeuerungen sowie die Verminderung respektive der Ersatz von Lösungsmitteln in Farben, Reinigungsmitteln und Kosmetika ebenfalls zu Entlastungen der Luft beigetragen.

Seit rund fünf Jahren wurden die Anstrengungen zur Emissionsminderung auf die Russminderung bei Dieselmotoren, die Verbesserung der Holzfeuerungen (bei Haushalts- wie auch bei Grossfeuerungen) und die Verminderung der Ammoniakemissionen aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung ausgeweitet. In diesen Bereichen werden sich die Erfolge erst mit der Zeit abzeichnen.

Die Erfolge durch die Katalysatortechnik im Strassenverkehr werden zurzeit durch die laufende Verkehrszunahme und vor allem auch durch die überproportionale Zunahme der Dieselfahrzeuge gefährdet.

Auch wenn die lokalen Spitzenbelastungen zurückgingen, führt die Zunahme der menschlichen Aktivitäten und die Ausdehnung der Siedlungsflächen tendenziell zu einem Anstieg der weiträumigen diffusen Hintergrundbelastung.

Abb. 78:
Stickstoffdioxid-Jahresmittlwerte ausgewählter NO₂-Passivsammlerstandorte in Appenzell Ausserrhoden



In der Ostschweiz treten die höchsten Belastungen durch Stickstoffdioxid (NO₂) und Feinstaub an verkehrsintensiven städtischen Standorten auf. Am geringsten ist die Stickstoffdioxid-Belastung in ländlichen Gebieten und in Höhenlagen. Dies gilt auch im Appenzellerland. So liegt die Stickstoffdioxid-Belastung entlang der Hauptverkehrsachsen auch in Herisau und an der Werdstrasse in Heiden weiterhin im Bereich des Grenzwertes von 30 µg/m³. Im hoch gelegenen und gut durchlüfteten Dorf Schwellbrunn oder am Hintergrundstandort Gais Zwislen werden Stickstoffdioxid-Jahresmittlwerte kleiner 10 µg/m³ gemessen.

An der Station Heiden Dunantheus wird der Feinstaub-Jahresgrenzwert eingehalten, der Tagesmittelgrenzwert aber wiederholt überschritten. Grenzwertüberschreitungen von Feinstaub sind auch entlang der Hauptverkehrsachsen von Herisau zu erwarten.

Die Entwicklung der Luftbelastung ist in Appenzell Ausserrhoden mit der restlichen Ostschweiz vergleichbar. Zwischen 1990 und 2000 haben die Stickstoffdioxidbelastungen deutlich abgenommen. Die in den 90er Jahren beobachteten Abnahmen der NO₂-Konzentrationen (sowohl bei den Jahresmittlwerten als auch bei den maximalen Tagesmittlwerten) setzten sich nach 2000 nicht mehr in gleichem Masse fort. An vielen Messstationen schwanken die Werte in den letzten Jahren auf gleichbleibendem Niveau.

Die Entwicklung der Feinstaubbelastung ist noch schwieriger abzuschätzen, da noch nicht so lange Messreihen wie z.B. für Stickstoffdioxid vorliegen. Die Werte schwanken witterungsbedingt von Jahr zu Jahr. In den letzten Jahren ist eine leicht sinkende Tendenz bei den Jahresmittlwerten feststellbar.

Massive Entlastungen der Luft konnten in der Ostschweiz bei Schwefeldioxid, Salzsäure und den Schwermetallen nachgewiesen werden (OSTLUFT 2010).

Ergebnisse der Ozonmessungen

Ozon bildet sich in der Luft aus anderen Schadstoffen, insbesondere aus Stickoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen. Diese chemischen Prozesse werden durch intensive Sonneneinstrahlung gefördert. Ozon reagiert auch mit anderen Luftschadstoffen und wird dabei teilweise abgebaut (Ozonzerhung). Die vielfältigen Prozesse wirken sich auf die räumlichen Muster der Ozonbelastung aus. Die höchsten Ozonbelastungen treten häufig an den Randbereichen der grossen Sied-

lungsgebiete und am Nachmittag auf. Langanhaltende Ozonbelastungen werden zudem in den erhöhten Lagen festgestellt (OSTLUFT 2010). Die Ozongrenzwerte werden im ganzen Kantonsgebiet überschritten. In den Hügellagen führen die lang andauernden Ozonbelastungen zu einer hohen Stundenzahl mit Überschreitung des Stundenmittelgrenzwertes von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und damit verbunden zu einer hohen Gesamtbelastung, welche sich besonders auf die Vegetation negativ auswirkt. In den letzten zwei Jahrzehnten hat sich die Ozonbelastung wenig verändert, die Ozonspitzenbelastungen haben jedoch leicht abgenommen.

Spezielle Witterungseinflüsse

Die Unterschiede in der Luftbelastung zwischen den einzelnen Jahren zeigen, dass die Luftbelastung nicht nur von zu hohem Schadstoffausstoss, sondern auch durch die Witterung beeinflusst wird. Anhaltende Inversionslagen führen im Winter zu überdurchschnittlichen Stickoxid- und Feinstaubbelastungen unter der Nebeldecke und in den Nebelrandgebieten. Ausgeprägte Inversionslagen traten in den Wintern 2002/03 und 2005/06 mit entsprechenden Belastungsspitzen auf. Daneben führen anhaltende Perioden mit sonnenreichen Sommertagen zu hohen Ozonbelastungen, so zum Beispiel im Hitzesommer 2003.

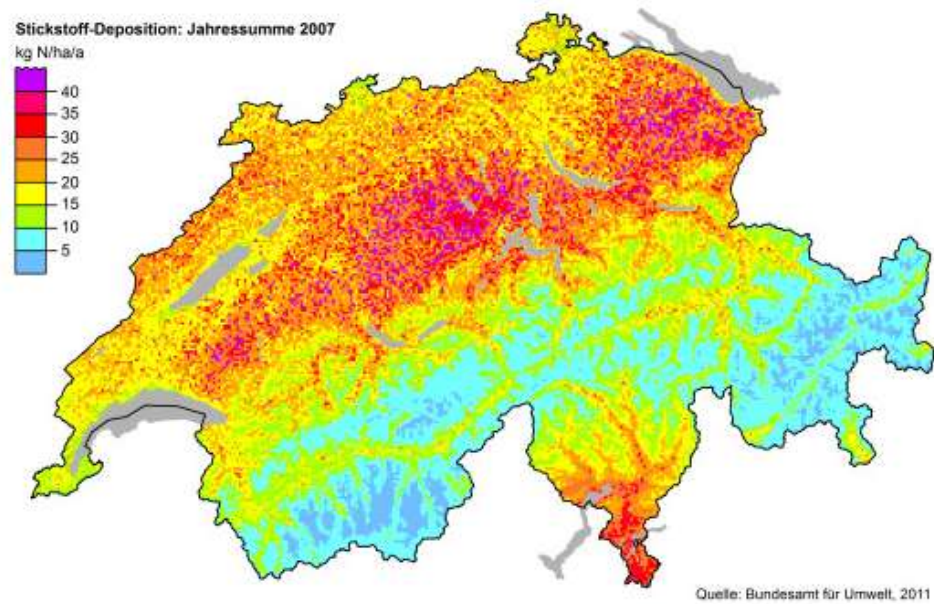
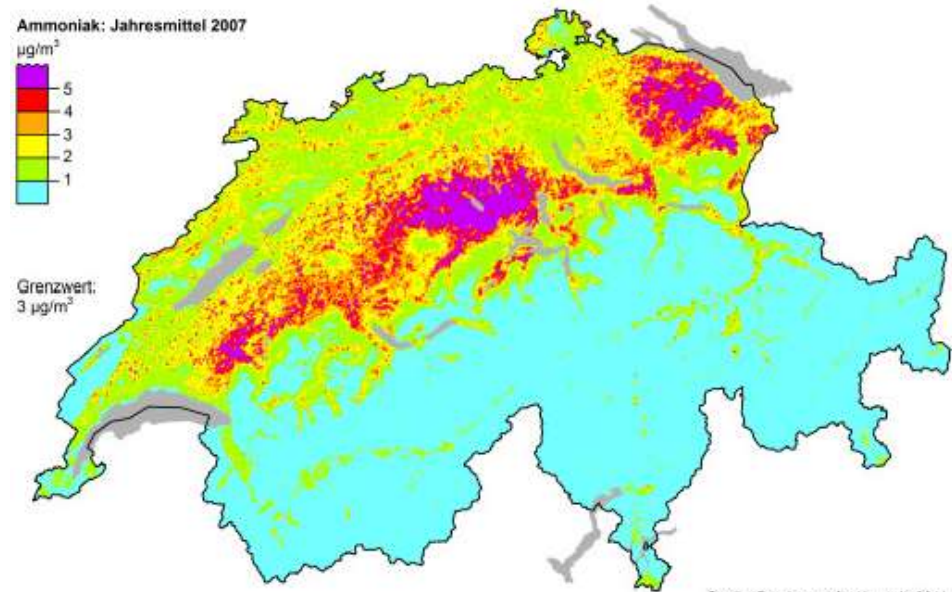
Ammoniak und Ammonium

Für Ammoniak bestehen in Appenzell Ausserrhoden keine repräsentativen Messergebnisse. Die Schadstoffkarte des BAFU zeigt für 2007 in den Grossräumen Luzern und Thurgau-St.Gallen-Appenzell die schweizweit höchsten Belastungen durch Ammoniak (Abb. 79). Die Intensität der Belastung hat zwischen 2000 und 2007 gesamtschweizerisch zugenommen, insbesondere im Schweizer Mittelland. Im Untersuchungsgebiet liegen die modellierten Werte teilweise deutlich über den international von den Fachleuten diskutierten Grenzwerten von $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für höhere Pflanzen und $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für Flechten (Sutton et al. 2009).

Ammoniak (NH_3 , gasförmig) deponiert innerhalb von wenigen Stunden in der Umgebung seiner Quellen; der Schadstoff konzentriert sich daher in den landwirtschaftlich stark genutzten Gebieten von Luzern sowie in der Ostschweiz seinem Emissionsmuster entsprechend (Abb. 79 oben).

Bei Ammonium (NH_4^+) handelt es sich vorwiegend um weiträumige Transporte. Auch beachtliche Teile des reduzierten Stickstoffes werden weiträumig verfrachtet und als Nitrat (NO_3^-) nass deponiert (uwe 2007). So erfolgt die Stickstoff-Gesamtdeposition und damit die Eutrophierung insgesamt viel weiträumiger als die Ammoniakbelastung (Abb. 79).

Abb. 79:
Ammoniakbelastung und
Stickstoff-Gesamt-
belastung 2007 in der
Schweiz;
Schadstoffkarten des
BAFU

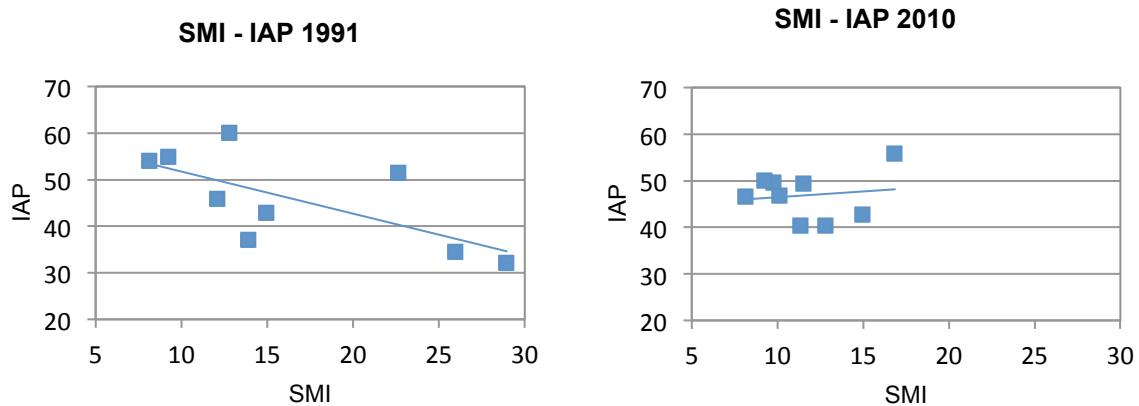


5.2 Einzelstoff- und Gesamtbelastung

5.2.1 Schwermetallindex und Gesamtbelastung

Aus den Einzelstoffmessungen an zehn Stationen wurde der Schwermetallindex (SMI) berechnet. An neun Stationen kann dieser Index mit dem IAP-Wert der jeweils acht nächstliegenden Bäume verglichen werden (an der Station Nr. 39 Schachen b. Reute wurde der IAP nicht erhoben). Dieser Vergleich zeigt den Zusammenhang zwischen der Einzelstoff- und der Gesamtbelastung (Abb. 80).

Abb. 80:
Vergleich des Schwermetallindex (SMI) und der Gesamtbelastung (IAP18) 1991 und 2010

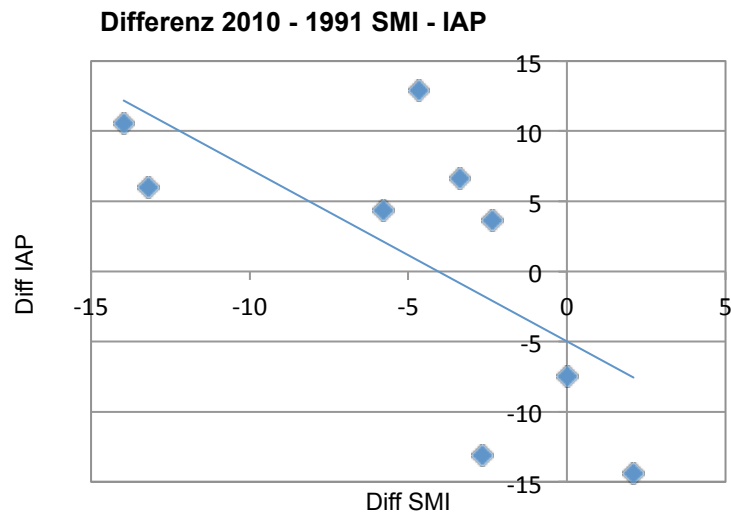


1991 ist ein schwacher Zusammenhang feststellbar: Je höher der SMI, desto tiefer ist der IAP-Wert. Der Zusammenhang ist signifikant (Korrelationskoeffizient $r = -0.68^*$).

2010 ist die Belastung durch Schwermetalle stark zurückgegangen, während sich die IAP-Werte auf mittlerem Niveau angeglichen haben. Es ist kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Schwermetallindex und der Gesamtluftbelastung mehr feststellbar ($r = 0.14$).

Abbildung 81 zeigt das Verhältnis der Differenzen von SMI und IAP von 1991 bis 2010. Hier ist eine klare Tendenz erkennbar: Wo der SMI abgenommen hat, sind die IAP-Werte angestiegen ($r = -0.67^*$). Diese Gleichläufigkeit weist darauf hin, dass die Schwermetalle mindestens früher einen Einfluss auf die Flechtenanzeige gehabt haben könnten oder dass die Schwermetallbelastung und die Gesamtbelastung (IAP18) durch die gleichen Hauptquellen geprägt wurden. Heute besteht aber kein Zusammenhang mehr zwischen den Schwermetallen und der Gesamtbelastung (Abb. 80). Die Schwermetallbelastung (SMI) ist 2010 im ganzen Untersuchungsgebiet auf tiefem Niveau und recht ausgeglichen. Daraus lässt sich schliessen, dass die Schwermetalle für die Gesamtbelastung der Luft möglicherweise an Bedeutung verloren haben.

Abb. 81:
Vergleich Differenz von
SMI und IAP 1991-2010

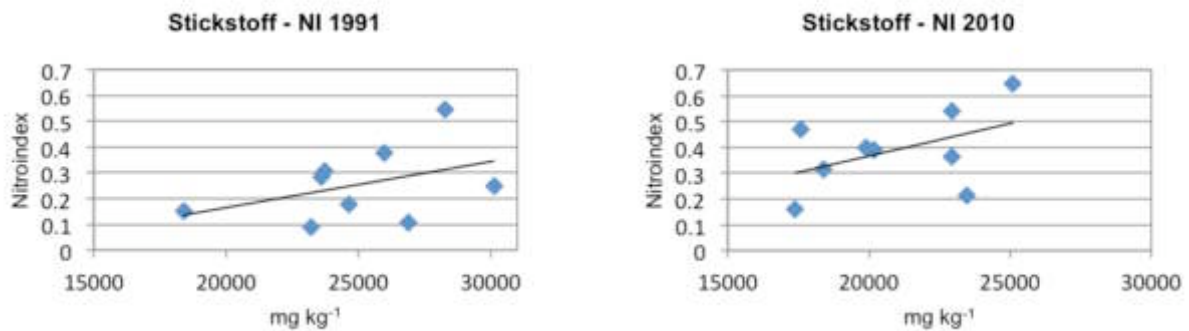


5.2.2 Stickstoff

Der Vergleich der Stickstoffmessungen an denselben neun Stationen mit dem Nitroindex der entsprechenden nächstgelegenen Bäumen zeigt für 1991 einen leicht positiven Zusammenhang (Abb. 82, $r = 0.42$): Wo hohe Stickstoff-Werte gemessen wurden, sind tendenziell auch die Nitroindizes hoch.

Abb. 82
Vergleich Stickstoff
und Nitroindex 1991
und 2010

2010 ist der Stickstoffgehalt zurückgegangen. Die Nitroindizes hingegen sind leicht angestiegen. Der Zusammenhang ist aber immer noch nicht signifikant ($r = 0.48$).



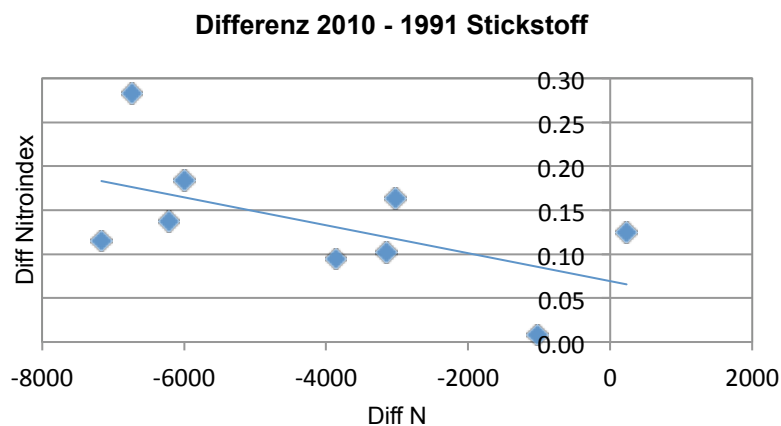
Dieselbe unerwartete Tendenz zeigt auch der Vergleich zwischen den Differenzen von Stickstoff und Nitroindex 1991 bis 2010, der Zusammenhang ist allerdings auch nicht signifikant (Abb. 83, $r = -0.59$): Wo der Stickstoffgehalt nur leicht abgenommen hat, ist der Nitroindex leicht gestiegen. Dort, wo der Stickstoffgehalt stark zurückgegangen ist, hat der Nitroindex stärker zugenommen.

Es besteht zwar ein positiver Zusammenhang zwischen Stickstoffgehalt in den Flechten und dem Nitroindex. Für beide Größen kann eine Anzeige des Stickstoffgehalts der Luft postuliert werden. Aber die Verände-

rungen des Stickstoffgehalts und die Veränderung des Nitroindex' sind gegenläufig.

Dies könnte bedeuten, dass die Eutrophierung der Luft (gemessen als Flechten-Nitroindex) nicht allein nur durch erhöhten Stickstoffgehalt in der Luft gegeben ist. Denkbar ist auch, dass die Flechte nicht alle Stickstoffverbindungen gleich aufnimmt oder speichern kann. Düngeversuche weisen darauf hin, dass die Flechten ammoniumhaltige Dünger wesentlich besser aufnehmen als nitrathaltige Dünger (Franzen-Reuter et al. 2007). Nicht ganz auszuschliessen ist auch, dass der Unterschied im Stickstoffgehalt von 1991 und 2010 durch analytische Unsicherheiten bedingt ist.

Abb. 83
Vergleich Differenz
Stickstoff und Nitroindex
1991 und 2010



Ausblick auf laufende Untersuchung des BAFU

Ein zurzeit laufendes Forschungsprojekt untersucht den Zusammenhang zwischen der Flechtenvegetation und der modellierten Stickstoffbelastung. Auftraggeber ist das Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Luftreinhaltung und NIS, Auftragnehmer sind die Universität Basel, Meteotest Bern und puls Bern.

Anhand der Daten von rund 7'000 mit der Kalibrierten Flechtenmethode in den letzten zwanzig Jahren untersuchten Bäumen im Schweizer Mittelland wird untersucht, ob es einen räumlich und zeitlich differenzierten Zusammenhang zwischen Flechten und den modellierten Immissions- und Klimadaten gibt. Die Daten der Flechtenuntersuchungen im Kanton Appenzell Ausserrhoden sind Teil dieser Untersuchung.

Das Projekt wird im Frühjahr 2012 abgeschlossen. Einige wichtigen Ergebnisse liegen bereits vor: Der Zusammenhang zwischen Flechten und den modellierten Immissions- und Klimadaten hat sich in den letzten 20 Jahren gewandelt. Es gibt keine konstante, über die Zeit gleichbleibende Abhängigkeit der Flechten von den verschiedenen in die Untersuchung einbezogenen Einflussgrössen, die Gewichte der Faktoren haben sich verschoben. Dies ist nicht erstaunlich, hat sich doch die Verteilung der Luftschadstoffe in den letzten 20 Jahren ebenfalls verändert, einzelne Komponenten haben stark abgenommen, andere sind beinahe unverän-

dert geblieben – heute wirkt ein anderes Schadstoffgemisch auf die Flechten als vor 20 Jahren.



























Für die neuste Untersuchung zeichnet sich ein neuer Ammoniakindex ab, welcher die modellierten NH_3 -Werte gut widerspiegelt und keinen Zusammenhang zu den andern Schadstoffen zeigt. Er berechnet sich aus 6 Flechtenarten, die bezüglich der NH_3 -Anzeige plausibel sind.

Die Auswertungen sind noch nicht abgeschlossen. Für Schlussfolgerungen bezüglich der Anwendung der Flechtenuntersuchung zur NH_3 -Überwachung im Kanton Appenzell Ausserrhoden wird sinnvollerweise der Schlussbericht des Stickstoffprojektes abgewartet.

5.2.3 Flechtendaten und technische Messdaten

Die Tendenzen der Emissionen, Immissionen und der Gesamtbelastung im Appenzell Ausserrhoden sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tab. 4
Tendenzen von Emissionen, Immissionen und Gesamtbelastung

Emissionen:	Tendenz	
	1991 bis 2000	2000 bis 2010
NO_x		
PM10		
SO_2		
Schwermetalle		
Immissionen:		
Nox		
PM10		
Ozon		
Ammoniak		
Stickstoff-Gesamtbelastung		
Flechtendaten:		
Schwermetalle		
Gesamtbelastung		
Nitroindex		
Acidoindex		

Die Flechten weisen von 1991 bis 2000 eine Verbesserung der Luftgüte aus. Nach 2000 stagnieren die Werte. Diese Tendenz deckt sich mit den Emissions- bzw. Immissionsmessungen in dieser Zeitperiode für Stickstoffoxide, Feinstaub und Ozon. Dasselbe gilt für die Schwermetalle: Flechten und Messdaten zeigen eine Abnahme bei der Belastung durch

Einzelstoffe. Gleichläufig sind die Resultate auch bezüglich der Eutrophierung: Die Immissionen von Ammoniak und Gesamtstickstoff haben zugenommen, der Flechten-Nitroindex ist ebenfalls gestiegen.

5.3 Weitere Einflüsse auf das Untersuchungsergebnis

5.3.1 Methodische Fehler

Die Flechtenindikationsmethode ist ein standardisiertes Verfahren. Die Entwicklung im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP14 optimierte die Methode hinsichtlich der Erklärbarkeit der IAP-Werte einzig durch die Unterschiede in den Luftbelastungen. Trotz der Optimierung besitzen einzelne Faktoren in der Untersuchung eine potenzielle Fehleranfälligkeit:

- die Qualität der Trägerbäume,
- die Kenntnisse der Flechtenarten und -methode der Bearbeitenden und
- die Datenauswertung mit Koordinatenbestimmung, Kartenkonstruktion, Digitalisierung etc.

Qualität der Trägerbäume

Die frei stehenden Trägerbäume, an denen die Flechtenerhebungen erfolgen, müssen verschiedene Mindestanforderungen erfüllen hinsichtlich der Baumart, des Alters, der Wuchsrichtung etc. Auch unter denjenigen Bäumen, die diesen Anforderungen gerecht werden, bestehen Qualitätsunterschiede. Ein beschatteter Baum (z.B. durch Gebäude, tief hängende Äste) ist weniger geeignet als ein gut besonnener Baum.

Die Baumqualität wird für jeden erfassten Baum in einer sechsstufigen Skala festgehalten. In ländlichen Gebieten liegt die Baumqualität generell tiefer als in Siedlungsgebieten; dafür verantwortlich ist unter anderem der Aspekt der unterschiedlichen Baumpflege. Die Baumqualitäten der Bäume 1991, 2000 und 2010 weichen nicht signifikant voneinander ab.

Von den ursprünglich 495 kartierten Bäumen mussten 186 ersetzt werden, da sie gefällt, eingewachsen oder aus anderen Gründen für die Methode nicht mehr geeignet waren. Analysen ergaben, dass sich die IAP-Werte dieser Ersatzbäume von denjenigen der bisherigen Bäume in zwei Gebieten signifikant voneinander unterscheiden. In Heiden lagen die Werte der Ersatzbäume tiefer. Hier wurden nachträglich zwei Ersatzbäume durch zwei andere zusätzlich kartierte Ersatzbäume ausgewechselt (siehe Anhang 3). Im zweiten Gebiet, in Speicher, weisen die Ersatzbäume signifikant höhere IAP-Werte als die bisherigen Bäume auf. Hier wurde auf eine nachträgliche Ergänzung der Kartierung verzichtet.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Qualität der Trägerbäume und die Ersatzbäume keinen entscheidenden Einfluss auf die Flechtenergebnisse haben.

Flechtenartenkenntnisse der BearbeiterInnen

Die Ansprache der Flechtenarten ist anspruchsvoll, nicht zuletzt deshalb, weil die Systematik der Flechten einem ständigen Wandel unterliegt. Verschiedene Personen könnten dieselben Flechten daher möglicherweise unterschiedlich ansprechen. Um dieser Schwierigkeit entgegen zu wirken, werden schwierig zu bestimmende Flechtenarten zu Artengruppen mit eindeutigen Erkennungsmerkmalen zusammengefasst.

Die Erhebungen von 1991, 2000 und 2010 wurden von qualifizierten FlechtenkundlerInnen durchgeführt. Diese sind bereits an mehreren Flechtenuntersuchungen beteiligt gewesen und können auf eine fundierte Erfahrung zurückgreifen.

Die Analyse zu den Ersatzbäumen (siehe oben und Anhang 3) zeigte, dass die Auswahl dreier Ersatzbäume in Heiden nicht optimal erfolgte. Diese wurde durch zwei andere Bäume ersetzt, so dass die Resultate der Ersatzbäume sich jetzt auch in Heiden nicht mehr von denjenigen der bisherigen Bäume unterscheiden.

Zur Qualitätssicherung sind gesammelte Proben im Labor nachbestimmt und Stichprobenkontrollen an einzelnen Bäumen vorgenommen worden. Unabhängige Vergleichsuntersuchungen im Rahmen der Methodenentwicklung ergaben Abweichungen bei der Datenerhebung durch verschiedene BearbeiterInnen von wenigen IAP18-Punkten. Zum Vergleich: Die Zonenbreite der Luftgütekarte beträgt rund 13 IAP18-Punkte. Der Einfluss der BearbeiterInnen wird deshalb als unwesentlich für die Ergebnisse der Flechtenuntersuchung bewertet.

Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass auch die Kenntnisse der Flechtenarten und –methode keinen entscheidenden Einfluss auf die vorliegenden Flechtenergebnisse haben.

Datenauswertungen

Nach der Kartierung werden die Datensätze in mehreren Schritten bearbeitet: Die Koordinaten werden bestimmt, die Georäumwerte berechnet, die Isolinien ermittelt, die konstruierten Flächen digitalisiert und in GIS verarbeitet. Die Ergebnisse all dieser Schritte werden einzeln auf ihre Plausibilität geprüft. Die Auswertungen erfolgen nach Möglichkeit im Doppel, so dass allfällige Fehler entdeckt und behoben werden können. Systematische Methodenfehler hätten bereits in früheren Untersuchungen in anderen Gebieten zu unrealistischen Ergebnissen führen müssen. Der Einfluss der Datenbearbeitung kann daher als Ursache für die Veränderungen in der Flechtenvegetation mit grösster Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

5.3.2 Standortfaktoren

Flechten sind erst ab einem gewissen Feuchtigkeitsgehalt in ihrer Umgebung stoffwechselaktiv. Sie nehmen dann Nähr- und Schadstoffe direkt aus der Atmosphäre auf (gasförmig, aus dem Regen, aus Tau und Nebel) und auch aus dem Abflusswasser, das über ihr Substrat fließt. Deshalb sind der pH-Wert des Substrats und des Niederschlags sowie klimatische Bedingungen, besonders Feuchtigkeit, Regen, Nebel und Inversionslagen, für das Flechtenwachstum massgebliche Standortfaktoren.

pH-Werte

Rinde: Die Rinde jeder Baumart hat einen spezifischen pH-Wert. Die berücksichtigten Arten Linde, Esche, Eiche und Ahorn haben nicht identische Borken-pHs, die Werte liegen aber nahe beieinander.

Stammabflusswasser: Die Baumkrone fängt Luftschadstoffe als trockene und nasse Depositionen auf. Bei Niederschlag werden diese abgewaschen und mit dem Abflusswasser dem Stamm entlang den Flechten zugeführt. Der pH-Wert des Abflusswassers korreliert direkt mit demjenigen des Niederschlags (Regen und Nebel).

Niederschlag (Regen und Nebel): Die Aufstellung des BAFU (2009) über die Gesamtemissionen der Schweiz zeigt, dass die Emission von Schwefelverbindungen und Stickstoffoxiden seit 1990 deutlich abgenommen hat. Entsprechend der Abnahme des Sulfat- und Nitratgehalts ist der Säuregrad des Regens in dieser Zeit gesunken - der pH-Wert des Niederschlags ist also angestiegen. Seit 2000 stagnieren die Werte.

Diesen Verlauf zeigt auch der Acidoindex: Eine deutliche Abnahme zwischen 1991 und 2000, danach nur noch eine leichte Abnahme, gebietsweise auch eine Stagnation dieses Säurewertes.

Klimafaktoren

Flechten sind für ihren Stoffwechselbetrieb auf Feuchtigkeit angewiesen; bei Trockenheit fallen sie in die so genannte Trockenstarre. Je höher die Feuchtigkeit, desto höher ist das Flechtenwachstum. Dies gilt aber nur bei guter Luftqualität: Enthält die Luftfeuchte viele Schadstoffe, werden diese von den Flechten aufgenommen und wirken sich schädigend aus.

Die Fähigkeit, bei grosser Trockenheit ihr Wachstum einzustellen, ermöglicht Flechten sogar eine Existenz auf Unterlagen wie Fels, die Spitzentemperaturen bis 80° erreichen. Flechten sind also sehr hitzeresistent. Eine direkte Schädigung durch hohe Temperaturen, wie sie beispielsweise im Sommer 2003 herrschten, ist daher nicht sehr wahrscheinlich. Denkbar sind indirekte Wirkungen wie zum Beispiel eine verminderte Regenerationsfähigkeit, vermindertes Wachstum und eine verkürzte Wachstumszeit. Da die Flechtenvegetation die Lebensbedingungen mehrerer vergangener Jahre integriert, bleibt der Einfluss einzelner Extremjahre gering.

Nebelhäufigkeiten hingegen haben eine starke Wirkung auf das Flechtenwachstum. Bei Nebel herrschen für Flechten optimale Wachstumsbedingungen. Ist der Nebel mit Schadstoffen belastet, so wirken sich diese schädigend auf die Flechten aus.

Das ist insbesondere bei Inversionslagen der Fall: Nebel bildet sich, wenn sich in windschwachen Verhältnissen unter einer wärmeren Luftschicht ein Kaltluftsee gebildet hat. Diese Schichtung ist sehr stabil, es findet kein Austausch zwischen den Luftschichten statt. Emittierte Schadstoffe reichern sich daher in der unteren kalten Luftschicht an, die Schadstoffkonzentration im Nebel ist äusserst hoch. Inversionslagen treten in Appenzell Ausserrhoden wie im übrigen Mittelland relativ häufig auf. Besonders in den Herbst- und Wintermonaten sind die Voraussetzungen zur Nebelbildung günstig (swisstopo 2011).

Die uns bekannten Klimadaten liefern keinen offensichtlichen Hinweis auf einen entscheidenden Einfluss des Klimas auf die Veränderungen in der Flechtenvegetation. Der in der Flechtenuntersuchungen im Fürstentum Liechtenstein 2009 beschriebene Zusammenhang zwischen Klimaänderungen (steigende Temperaturen, verminderte Niederschläge) und Flechtenrückgang konnte in Appenzell Ausserrhoden nicht festgestellt werden.

6. Schlussfolgerungen

Die Flechtenindikation erfasst die Gesamtbelastung der Luft in Appenzell Ausserrhoden: Die Schadstoffbelastung wirkt sich direkt auf das Flechtenwachstum aus. Durch die Methode kann die Luftqualität flächendeckend dargestellt werden. Die Flechtenindikation ist eine Ergänzung zu technischen Messdaten und ermöglicht eine regelmässige Überwachung bzw. eine Wirkungskontrolle von lufthygienischen Massnahmen.

Der Kanton Appenzell Ausserrhoden ist in das Luftmessnetz OSTLUFT eingebunden. OSTLUFT betreibt ein regionales Messnetz und verfolgt die Luftbelastung kantonsübergreifend. Emissionsminderungen in Industrie und Gewerbe wie auch im Verkehr konnten durch Betriebsoptimierungen und durch Abluftreinigung erfolgreich umgesetzt werden. Ebenfalls zeigte die Förderung von energiesparendem Bauen und andere Massnahmen im Bereich Haushalt Wirkung.

Dank der erfolgreichen Massnahmen zur Senkung der Luftbelastung zeigt die Luftgütekarte eine wesentliche Verbesserung der Verhältnisse gegenüber 1991 in den ehemaligen Belastungsgebieten. Die Verbesserungen sind im Vergleich der Flechtenuntersuchungen 1991 und 2000 zu erkennen. In den letzten Jahren konnte dieser Erfolg nicht fortgesetzt werden. Die Frequenzzahl der Flechtenarten (IAP18) hat sich auf mittleren Belastungswerten nivelliert.

Die Messung der Einzelstoffbelastung der Flechten ergibt einen Rückgang der Belastung mit Metallen, Stickstoff und Schwefel seit der Untersuchung 1991. Dabei haben sich allerdings nicht alle analysierten Einzелеlemente gleich verhalten. Diejenigen, bei denen direkte Massnahmen für die Minderung von Emissionen ergriffen wurden (z.B. Pb, Cd, S), zeigen 2010 meist niedrigere Konzentrationen in der Flechte. Trotzdem gibt es einzelne Standorte, die bei Blei und Cadmium eine Zunahme zu verzeichnen hatten. Elemente, welche in der Metallindustrie benutzt werden (Co, Cr, Mo, Sb, Sn, Zn), weisen teilweise einer Abnahme bis 2000 wieder eine Zunahme bis 2010.

Die Immissionen der Schadstoffe Stickstoffdioxid, Ozon und Feinstaub sowie der Schwermetalle weisen gesamtschweizerisch seit 1990 eine tendenziell abnehmende Entwicklung auf - seit etwa 2000 allerdings stagnieren diese Werte, wie die Emissionsaufstellung des BAFU (2009) zeigt. Die Grenzwerte werden überdies kurzfristig, d.h. im Tagesgang bzw. saisonal, grossräumig überschritten (OSTLUFT 2010).

Die Stickstoff-Karten des BAFU (BAFU 2011) zeigen, dass sich die Belastung durch Ammoniak und Ammonium weiter verstärken. Den höchsten Anteil an den Emissionen trägt nach wie vor die intensive landwirtschaftliche Produktion. Die nicht-landwirtschaftlichen Emissionen schwanken vergleichsweise konstant auf einem tieferen Niveau. Als Grund für die Emissionen in städtischen Gebieten werden Katalysatoren vermutet, die Stickoxide aus Abgasen über den Luftstickstoff (N₂) zu Ammoniak reduzieren (BAFU 2009).

Der hohe Nitroindex der Flechtenauswertungen bestätigt die nach wie vor starke Eutrophierung in Appenzell Ausserrhoden. Der Nitroindex scheint sich einem Maximalwert anzunähern und heute nur noch leicht auf einem hohen Niveau zu schwanken. Dieselbe Tendenz ist auch in anderen untersuchten Gebieten des Schweizer Mittellandes festzustellen.

Die Resultate der Flechtenauswertung im Appenzell Ausserrhoden zeigen ähnliche Tendenzen wie die Untersuchungen in andern Gebieten der Schweiz. Die Nivellierung und Stagnierung der Belastung über das ganze Kantonsgebiet und der gleichzeitige Anstieg des Nitroindex' weisen auf eine steigende Bedeutung der Ammoniakbelastung für die Flechten hin.

Die Flechtenkartierung in Appenzell Ausserrhoden 2010 erweitert das biologische Messnetz von 1991 und 2000 um aktuelle Daten und ist eine Erfolgskontrolle zur Luftreinhaltung. Durch regelmässige Wiederholung der Flechtenuntersuchungen kann die Wirksamkeit von emissionsmindernden Massnahmen beurteilt werden.

Die Zielsetzung der Luftreinhalte-Verordnung ist die Senkung der Luftbelastung auf ein Mass, in dem die Gesundheit von Mensch, Tier und Pflanze gewährleistet ist. Im Hinblick auf die Luftgütekarte bedeutet dies, dass die Zonen der mittleren Belastung wieder verkleinert und die Zonen der sehr geringer Belastung sich ausdehnen sollten. Insbesondere müssen die Anstrengungen zur Reduktion der Ammoniakemissionen weiter verfolgt werden, denn die starke Eutrophierung in der ganzen Schweiz ist verantwortlich für den Rückgang vieler Arten, nicht nur von Flechten, sondern auch von Pflanzen und Tieren.

Literatur

- AGB (1992): Luftqualitätsuntersuchungen mit Flechten im Kanton Appenzell A.Rh, Teilbericht II: Einzelstoffbelastung von Flechten, Passives Biomonitoring. Bericht an das Amt für Umweltschutz Kt. AR.
- AGB/Herzig, R. (2002): Erfolgskontrolle Luftreinhaltung 2000, Kanton Appenzell A.Rh. Wiederholung der Luftqualitätsuntersuchungen mit Flechten nach 10 Jahren. Bericht an das Amt für Umweltschutz Kt. AR.
- BAFU (2009): Luftschadstoff- und Klimagas-Emissionen in der Schweiz 1990 – 2007.
www.bafu.admin.ch/luft/00596/08399/index.html?lang=de...s-.pdf
- BAFU, Bundesamt für Umwelt (2009): Luftschadstoff- und Klimagas-Emissionen in der Schweiz 1990 – 2007.
www.bafu.admin.ch/luft/00596/08399/index.html?lang=de
- BAFU, Bundesamt für Umwelt (2011): Ammoniakbelastungen 2000 und 2007. Ittigen.
- BAFU, Bundesamt für Umwelt (2011): Stickstoff-Gesamtbelastungen 2000 und 2007. Ittigen.
- Beierkuhnlein, C. (2003): Der Begriff Biodiversität. *Nova Acta Leopoldina NF 87*, 328; 51-71
- Bergmann, W. (1988): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 762 S.
- BLW, Bundesamt für Landwirtschaft (2004): Agrarbericht 2004. Bern.
- Bronzetti, G., Galli A. (1992): Vanadium: An element with rediscovered interest, particularly regarding metabolism and mutagenicity. *Metal-compounds in environment and life* 4, 207-211
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2004): Hydrologischer Atlas der Schweiz. Version 2.0. Wabern.
- BUWAL (1995): Vom Menschen verursachte Luftschadstoff-Emissionen in der Schweiz von 1900 bis 2010. Schriftenreihe Umwelt Nr. 256, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 121 S.
- CRM 482, Quevauviller, P, Herzig, R, Muntau, H. (1996): The certification of the contents (mass fractions) of Al, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, P and Zn in lichen. *Bcr information EUR 16841 EN*
- Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL), 2010: 25 Jahre Luftreinhaltung auf der Basis des Umweltschutzgesetzes. Thesen und Empfehlungen. Bern. 122 S.
- FAL, IUL, FAT (1996): Ammoniakemissionen Schweiz. Bundesamt für Landwirtschaft BLW.
- Franzen-Reuter, I., Frahm, J-P., 2007: Auswirkungen experimenteller Stickstoffgaben auf die Epiphytenflora in Dauerbeobachtungsflächen (Rheinlan-Pfalz, Deutschland). *Herzogia*, 20: 61-75.
- Jenssen, M. (2006): Entropie und Biodiversität: Ökologische Potentiale der Artenvielfalt. In: PÖSCHEL, T.; MALCHOW, H.; SCHIMANSKY-GEIER, L. (Hrsg.): *Irreversible Prozesse und Selbstorganisation*. Logos-Verlag Berlin, 2006, ISBN 3-8325-1350-7, S. 265-279.
- Kanton Appenzell Ausserrhoden (2008): Massnahmenplan Luftreinhaltung. Aktualisierung 2008. 22. Juli, Amt für Umwelt, Herisau.

- Kubin, E. (1990): A survey of element concentrations in the epiphytic lichen *Hypogymnia physodes* in Finland in 1985-86. Kauppi et al. (Eds). *Acidification in Finland*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- LRV (1985): Luftreinhalte-Verordnung, vom 16. Dezember 1985. SR 814.318.142.1
- Merian, E. (1984): *Metalle in der Umwelt, Verteilung, Analytik, biologische Relevanz*. Verlag Chemie, Weinheim, 722.S
- NBS-1572: National Bureau of Standards. USA
- NIST-1573A (1995): National Institute of Standards & Technology. USA
- OSTLUFT (2004): Stickstoff-Deposition in der Ostschweiz 1994 bis 2003. Zusammenfassung. Download unter www.ostluft.ch
- OSTLUFT (2008): Ammoniakbelastung OSTLUFT 2000 bis 2007. Dezember 2008, Zürich.
- OSTLUFT (2010): Ammoniakbelastung OSTLUFT 2000 bis 2009. Download unter www.ostluft.ch
- OSTLUFT (2010): Stickstoff- & Elementdeposition OSTLUFT 2000 bis 2008. Februar 2010, Zürich.
- OSTLUFT (2011): Luftqualität 2010. Juni 2011, Zürich.
- OSTLUFT (2011): Messdaten des Ostschweizer Luftmessnetzes.
- Pacyna, J.M., Pacyna, E.G. (2001): An assessment of global and regional emissions of tracemetals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. *Canadian Journal of Environmental Reviews* 9, 269-298
- puls (2001): Flechten als Bioindikatoren: Luftqualitätsuntersuchungen im Kantonsteil Ausserschwyz West. Amt für Umweltschutz des Kantons Schwyz.
- puls (2008): Flechten und Luftqualität in der Region Innerschwyz: Wirkungskontrolle 2008. Amt für Umweltschutz des Kantons Schwyz.
- Rösler, H.J., Lange, H. (1975): *Geochemische Tabellen*. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 675 pp
- Scheffer, P., Schachtschabel, P., (1984): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 11. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 491 S.
- Stoeppler, M. (1991): Cadmium. In: Merian, E. (ed): *Metals and their compounds in the environment – occurrence, analysis and biological relevance*. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, New York, Basel, Cambridge, 803-851
- Sutton, M.A., Reis, S., Baker, S.M.H. 2009: Atmospheric Ammonia. Detecting emission changes and environmental impacts. Chapter 22: Critical Levels for Ammonia. Springer, Berlin, 464 S.
- Swisstopo 2011: *Klimaatlas der Schweiz*. 200 Einzelkarten. Vierte Teillieferung 1991, Nr. 9.1, Mittlere Nebelhäufigkeit im Winterhalbjahr.
- Thöni, L., Krieg, F., Siewers, U. (1999): Testing the Bergerhoffmethod to determine the bulkdepositionloads of 49 elements. *Atmospheric Environment* 33, 337-344
- Thöni, L., Matthaei, D., Seitler, E., Bergamini, A. (2008): *Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz. Moosanalysen 1990-2005*. Umwelt-Zustand Nr. 0827, Bundesamt für Umwelt, Bern, 150 S. Download pdf: www.umwelt-schweiz.ch/zu-0827-d

Thöni, L., Seitler, E. (2004): Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz. Moosanalysen 1990-2000. Umwelt-Materialien Nr. 180, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 140 S.

Trueb, L.F. (ed) (1996): Die chemischen Elemente. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, Leipzig, 416 S.

U.S. Geological Survey: Minerals Yearbook - 2005.
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/myb.html>

Urech, M., Herzig, R. (1991): Flechten als Bioindikatoren: Integriertes biologisches Messsystem der Luftverschmutzung für das Schweizer Mittelland. Bibliotheca Lichenologica 43.

Uwe, 2007: Massnahmenplan Luftreinhaltung. Teilplan Ammoniak. Umwelt und Energie, Luzern. 37 S.

von Arx, U. (2006): Kupfer. Verbrauch, Umwelteinträge und -vorkommen. Umwelt-Wissen Nr. 0601. Bundesamt für Umwelt, BAFU, Bern, 163 S.

