



Flechten und Luftqualität in Ausserschwyz Ost: Wirkungskontrolle 2013

im Auftrag des Kantons Schwyz
Amt für Umweltschutz

31. Januar 2014

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 | 4 |
| 1.1 Flechten als Bioindikatoren..... | 4 |
| 1.2 Bisherige Untersuchungen..... | 4 |
| 1.3 Untersuchung 2013 | 4 |
| 1.4 Wirkungskontrolle | 5 |
| 2. ZIELE | 6 |
| 3. GESAMTBELASTUNG | 7 |
| 3.1 Methode..... | 7 |
| 3.1.1 Lebewesen Flechte | 7 |
| 3.1.2 Kalibrierte Flechtenindikationsmethode..... | 8 |
| 3.1.3 Flechtenuntersuchung 2013 | 9 |
| 3.2 Veränderung der Luftgüte | 10 |
| 3.2.1 Luftgütekarte 2004..... | 10 |
| 3.2.2 Luftgütekarte 2013..... | 13 |
| 3.2.3 Flächenanteile der einzelnen Zonen | 13 |
| 3.3 Differenzkarte von 2004 bis 2013 | 14 |
| 3.4 Veränderung des Luftgütewerts IAP18 | 16 |
| 3.4.1 Luftgüte 2004 und 2013 pro Georaum | 16 |
| 3.4.2 Luftgütewerte im Vergleich | 16 |
| 3.5 Acidoindex | 17 |
| 3.5.1 Acidoindex 2004 | 18 |
| 3.5.2 Acidoindex 2013 | 18 |
| 3.5.3 Veränderung des Acidoindex' von 2004 bis 2013 | 18 |
| 3.6 Nitroindex..... | 22 |
| 3.6.1 Nitroindex 2004 | 23 |
| 3.6.2 Nitroindex 2013 | 23 |
| 3.6.3 Veränderung des Nitroindex' 2004 bis 2013 | 23 |
| 3.7 Flechten-Diversität | 28 |
| 3.8 Entropie..... | 29 |
| 4. DISKUSSION | 30 |
| 4.1 Luftqualität..... | 30 |
| 4.1.1 Emissionsentwicklung | 30 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1.2 Immissionsmessungen | 31 |
| 4.2 Weitere Einflüsse auf Luftgüte-Veränderungen | 38 |
| 4.2.1 Methodische Fehler | 38 |
| 4.2.2 Standortfaktoren | 39 |
| 5. SCHLUSSFOLGERUNGEN | 41 |
| LITERATUR | 44 |
| ANHANG | 46 |

Impressum

Auftraggeber: Amt für Umweltschutz Kanton Schwyz,
Kollegiumsstrasse 28, Postfach 2162, 6431 Schwyz,
begleitet durch Melinda Suter, Luftreinhaltung

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

in Zusammenarbeit mit:

Kathrin Peter, Evaluationen, 3011 Bern

Michael Dietrich, Umweltbüro für Flechten, 6010 Kriens

Zitiervorschlag:

puls 2014: Flechten und Luftqualität in Ausserschwyz Ost: Wirkungskontrolle
2013. Amt für Umweltschutz Kanton Schwyz. 50 S.

Zusammenfassung

Mit Hilfe der Flechtenindikationsmethode wurde in der Region Ausser-schwyz Ost 2004 und 2013 die Luftqualität analysiert. Die vorliegende Untersuchung hat die Erhebung von 2004 wiederholt. Sie erfasst die Veränderung der letzten rund zehn 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 art-spezifisch empfindlich auf Luftschadstoffe. Je stärker die Gesamtbelas-tung der Luft ist, desto weniger Flechten können überleben.

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

Luftgüte 2004

Gebiete mit starker Luftbelastung finden sich in den Grossräumen Wan-gen-Siebnen, Tuggen sowie im Bereich Mühlenen - Buttikon. Gering be-lastet sind die Kleinregionen Rüti - Girendorf, Zollrüti und im oberen Teil von Isenburg. Die Zone der mittleren Gesamtbelastung besitzt 2004 den grössten Flächenanteil.

Luftgüte 2013

In den Jahren von 2004 bis 2013 hat sich die Gesamtluftbelastung in den untersuchten Gebieten mehrheitlich verschlechtert. Die Zone der starken Belastung besitzt nun den grössten Flächenanteil. Neu ist das Gebiet Gätzibach - Wangen - Zügerdörfli ausserdem von einer kritischen Luftbelastung betroffen. Die randlichen Bereiche des Untersuchungsge-biets liegen heute in der Zone mittlerer Belastung.

Veränderung der Luftgüte 2004 bis 2013

Im Untersuchungszeitraum haben sich keine Verbesserungen der Ge-samtbelastung ergeben. Alle vorher wenig belastete Gebiete haben eine Verschlechterung erfahren und viele vormals mittel bis stark belastete Gebiete weisen heute eine noch grössere Belastung auf.

Acidindex (Säure- und Basenverträglichkeit)

2004 ist das gesamte Untersuchungsgebiet basisch geprägt. 2013 hat sich die basische Prägung in Ausserschwyz Ost nochmals verstärkt. Basische Belastungen dominieren im Untersuchungsgebiet, nur lokal zeigt sich noch eine leicht saure Prägung.

Nitroindex (Stickstoff-Empfindlichkeit resp. -Verträglichkeit)

Die Region Ausserschwyz Ost weist bereits 2004 eine gesamthaft stickstoffreiche Immission auf. Die Verhältnisse von 2004 liegen auch heute noch als Gesamtbild vor, lokal ist die Stickstoffbelastung hingegen zurückgegangen. Nach wie vor sind aber sämtliche Gebiete stickstoffreich.

Flechtendiversität

In den Jahren 2004 und 2013 konnten jeweils ähnlich viele Flechtenarten festgestellt werden. Während der 9 Jahre hat die Häufigkeit, mit der die einzelnen Arten auftreten, jedoch überwiegend abgenommen. Davon sind sowohl säureliebende Arten als auch stickstofftolerante Arten betroffen. Am stärksten abgenommen haben hingegen säure- oder basenindifferente Arten.

Entropie

Um das ökologische Potential in Ausserschwyz Ost zu beschreiben, wurde die mittlere Entropie für die Jahre 2004 und 2013 berechnet. Als Referenzwert wurde der maximale Wert des Jahres 2004 herangezogen: Dieser beschreibt die maximale Diversität (das ökologische Potential des Gebiets) von 100%. Die Flechtendiversität ist von 2004 (68.5% des Maximalwerts) zu 2013 (58.4% des Maximalwerts) gesunken.

Diskussion

Die Flechtenkartierung zeigt eine Verschlechterung der Luftqualität von 2004 bis 2013. Die Flächen von Zonen mit sehr hohen Belastungen (stark-kritisch) haben auf Kosten der geringen bis mittleren Belastung zugenommen. Die Luftgütewerte scheinen sich in einer starken Gesamtbelastung zu nivellieren. Der Nitroindex zeigt, dass die Eutrophierung der Luft seit 2004 unverändert hoch ist.

Diese Tendenzen decken sich mit den Emissions- bzw. Immissionsmessungen in dieser Zeitperiode für Stickstoffoxide, Feinstaub und Ozon, insbesondere mit jenen für Stickstoffbelastung.

Die Immissionen der Schadstoffe Stickstoffdioxid, Ozon und Feinstaub 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 Ausserschwyz Ost regelmässig auf.

Die Schadstoffkarte des BAFU zeigt für 2007 in den Grossräumen Luzern und Thurgau-St.Gallen-Appenzell die schweizweit höchsten Belastungen durch Ammoniak. 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 µg/m³ für höhere Pflanzen und massiv über dem Grenzwert für Flechten von 1 µg/m³.

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. Allerdings beeinflussen lokal wirksame klimatische Verhältnisse wie Inversionslagen oder die Hauptwindrichtung die Luftbelastung, sie begünstigen die Konzentration bzw. Deposition von Schadstoffen.

Schlussfolgerungen

Trotz der ergriffenen Massnahmen zur Senkung der Luftbelastung zeigt die Flechten-Luftgütekarte 2013 keine Verbesserung, sondern eine Verschlechterung der Verhältnisse gegenüber 2004. Die gleichbleibend hohen Belastungen durch Stickstoffoxide, Feinstaub und Ozon stellen für die Flechten eine chronische Belastung dar, welche sich offensichtlich negativ auf das Flechtenwachstum auswirkt.

Der hohe Nitroindex der Flechtenauswertungen bestätigt die nach wie vor starke Eutrophierung in Ausserschwyz Ost. 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 Partikeln 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

Der Kanton Schwyz hat eine langjährige Erfahrung mit Flechten als Bioindikatoren zur Beurteilung der Luftbelastung im Kanton. Neben zwei Untersuchungen in der Region Innerschwyz (1997 und 2008) konnten mit zwei Untersuchungen im Gebiet Ausserschwyz West (2001 und 2009) sowie einer Erstuntersuchung im Gebiet Ausserschwyz Ost (2004) wichtige Erkenntnisse über die räumliche Struktur, über wesentliche Quellen und über die Entwicklung der Luftbelastung gewonnen werden. 2013 sollen die Veränderungen der Luftbelastung in räumlicher und zeitlicher Dimension auch für Ausserschwyz Ost erfasst werden.

Ein verstärktes Augenmerk gilt heute 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 auf die Ammoniakbelastung liefert.

1.3 Untersuchung 2013

Die vorliegende Untersuchung wiederholt die Flechtenerhebung in Ausserschwyz Ost, so dass die Entwicklung seit 2004 räumlich und zeitlich aufgezeigt werden kann. Die Erhebung 2013 und die Analyse sind nach derselben Methode wie die Untersuchung von 2004 erfolgt, wodurch die Resultate direkt vergleichbar werden.

1.4 Wirkungskontrolle

Wiederholungsuntersuchungen mit Flechten sind ein Instrument zur Wirkungskontrolle von lufthygienischen Massnahmen, die gemäss Luftreinhalteverordnung (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 2004 soll eine erneute Untersuchung der Flechtenvegetation in Ausserschwyz Ost den Zustand der Luftbelastung ermitteln. Die Entwicklung der Gesamt-Luftbelastung in den letzten neun Jahren soll aufgezeigt und vergleichend interpretiert werden.

Die **Oberziele** der Untersuchung sind:

- die Bereitstellung von Grundlagen für die Ausrichtung der Luftreinhaltung im Kanton Schwyz und
- die Durchführung einer Erfolgskontrolle nach neun Jahren Luftreinhaltung.

Die **Projektziele** sind:

- die räumliche Abbildung der Gesamtbelastung durch Luftschadstoffe im Siedlungsgebiet der Gemeinden Wangen und Galgenen sowie Teilen von Schübelbach und Tuggen.
- die Darstellung der Entwicklung der allgemeinen Luftbelastung von 2004 bis 2013.
- das Erkennen von speziellen Belastungssituationen und -quellen.
- die Gegenüberstellung von Flechtenkarten und von technischen Emissions- und Immissionsdaten zur Interpretation der bioindikativen Ergebnisse; Einbezug der Passivsammler- und Monitormessungen in die Auswertung.
- der Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit denjenigen aus der Region Innerschwyz (1997 und 2008) und aus dem Kantonsteil Ausserschwyz West (2001 und 2009).
- die Gewinnung von zusätzlichen Aussagen gemäss dem Stand der Forschung durch die Auswertung der vorkommenden Flechtenarten: So können beispielsweise Angaben über den Säuregrad der Immissionen (Acidindex) oder die Nährstoffversorgung (Nitroindex) und deren Veränderung gewonnen werden.
- Dokumentation der Untersuchungsergebnisse, so dass weitere Wiederholungsuntersuchungen in späteren Jahren möglich sind.

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-Wert 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 untersuchten 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 Stamm-
fläche angebracht,
dass 10 gleich grosse
Felder entstehen



3.1.3 Flechtenuntersuchung 2013

Die Flechtenerhebung 2013 wurde analog zur Untersuchung 2004 durchgeführt. In den Gebieten Wangen und Galgenen sowie Teilen von Schübelbach und Tuggen wurden die Flechtendaten auf einer Fläche von 26 km² (Abb. 3 und 4, Seite 12 und 13) erhoben.

Der Flechten-Luftgütewert IAP18 wurde nach Möglichkeit an den selben Bäumen wie 2004 mit der identischen Methode ermittelt. Von den ursprünglich 164 kartierten Bäumen mussten 75 (45%) ersetzt werden, da sie gefällt, eingewachsen oder aus anderen Gründen für die Methode nicht mehr geeignet waren. Der Anhang enthält die Flechtendaten sämtlicher 2013 untersuchten Bäume.

Die Flechtenwerte der einzelnen Bäume wurden in Gruppen von in der Regel fünf Bäumen zu einem Mittelwert verrechnet. Die Baumgruppen wurden innerhalb von geographisch einheitlichen Räumen, so genannten Georäumen, gebildet. Durch die ähnlichen geographischen Bedingungen innerhalb eines Georaums darf dort mit derselben Wirkung der Gesamtluftbelastung auf die Flechten gerechnet werden. Für das untersuchte Gebiet ergaben sich 32 Georäume.

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 2004 in keinem Teil des Untersuchungsgebiets Ausserschwyz Ost, 2013 musste sie hingegen im Gebiet Gätzibach - Wangen - Zügerdörfli festgestellt werden. 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 |

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 2004.

3.2.1 Luftgütekarte 2004

Die Karte weist für das Untersuchungsgebiet drei Flechtenzonen aus (Abb. 2, Seite 11), die Gesamtbelastung reicht von gering bis stark.

Gebiete mit starker Luftbelastung finden sich in den Grossräumen Wangen-Siebnen, Tuggen sowie im Bereich Mühlennen - Buttikon. Gering belastet sind die Kleinregionen Rüti - Girendorf, Zollrüti und im oberen Teil von Isenburg. In den übrigen Gebieten besteht grossflächig eine mittlere Gesamtbelastung der Luft. Diese Zone besitzt 2004 den grössten Flächenanteil (55% des Untersuchungsgebietes).

Abb. 2

Luftgütekarte Ausserschwyz Ost 2004

Bioindikation mit Flechten

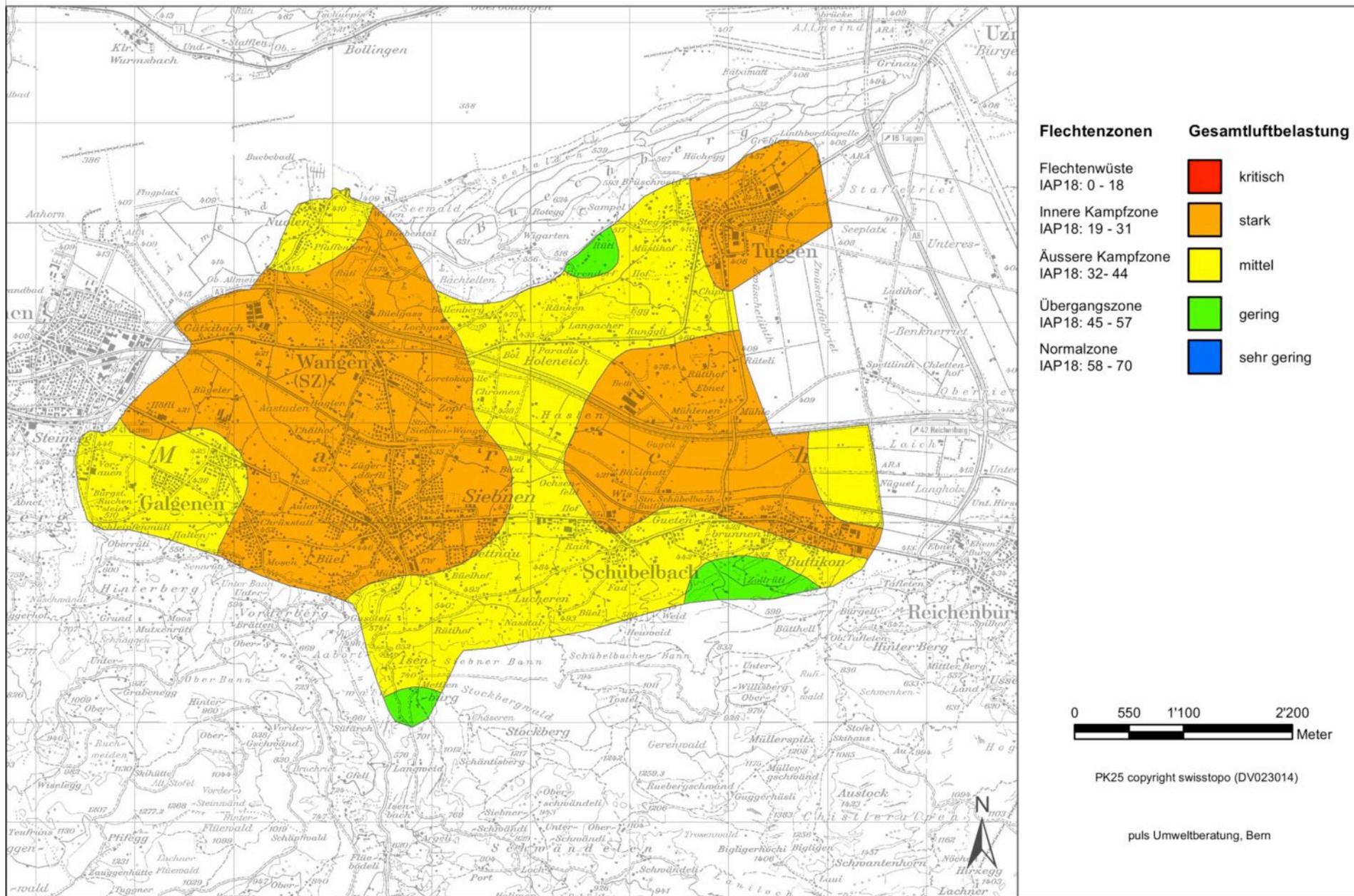
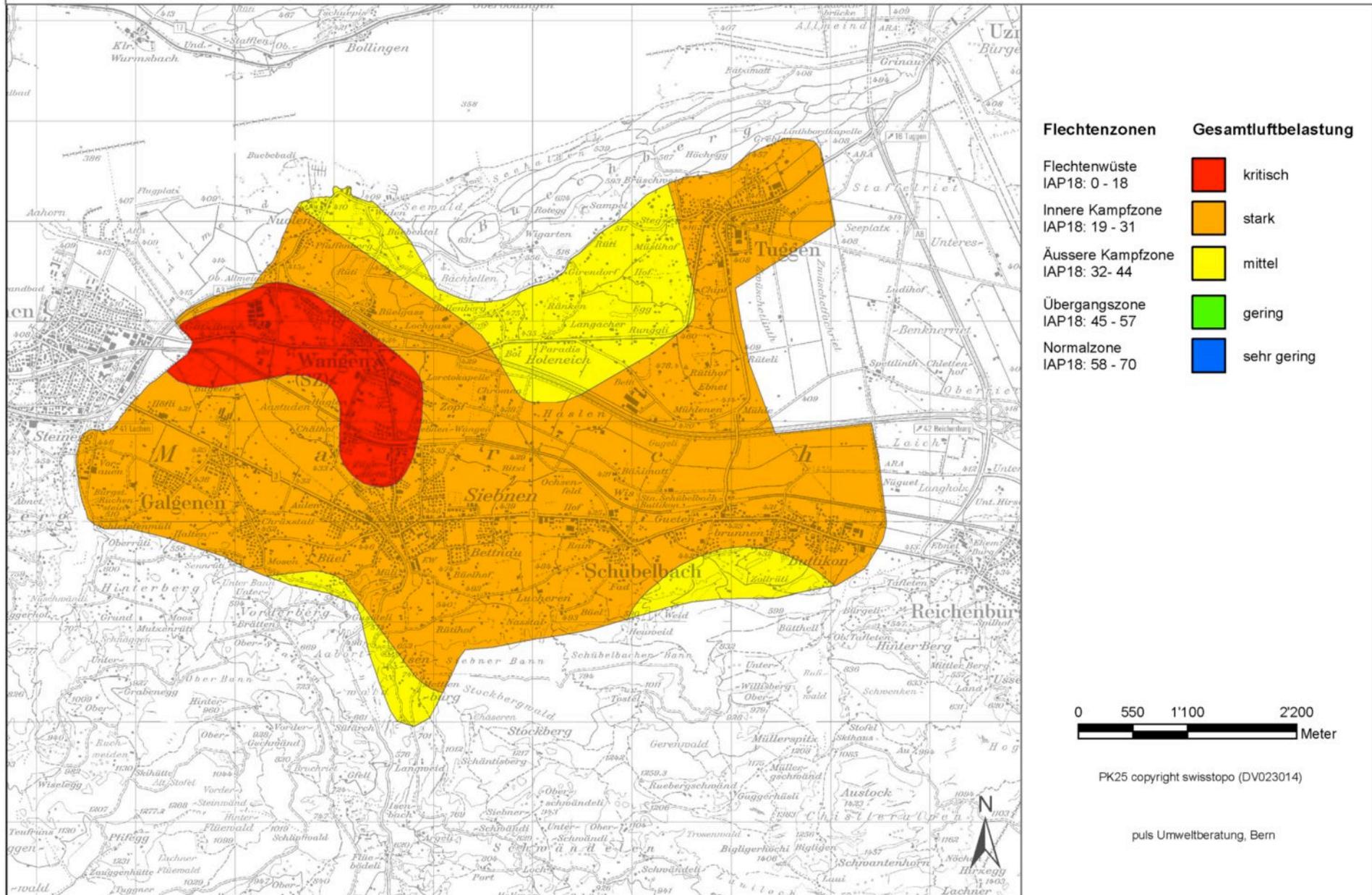


Abb. 3

Luftgütekarte Ausserschwyz Ost 2013

Bioindikation mit Flechten



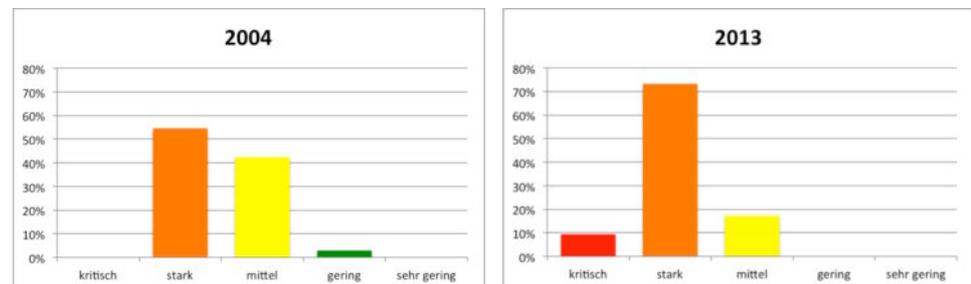
3.2.2 Luftgütekarte 2013

In den Jahren von 2004 bis 2013 hat sich die Gesamtluftbelastung in den untersuchten Gebieten mehrheitlich verschlechtert (Abb. 3, Seite 12). Die Zone der starken Belastung besitzt nun den grössten Flächenanteil (73%) und findet sich von Galgenen über Siebnen - Schübelbach nach Buttikon und Tuggen. Neu ist das Gebiet Gätzibach - Wangen - Zügerdörfli ausserdem von einer kritischen Luftbelastung betroffen. Die randlichen Bereiche des Untersuchungsgebiets Nuolen - Holeneich - Müslihof, Zollrüti und südwestlich von Büel - Mettlen liegen heute in der Zone mittlerer Belastung.

3.2.3 Flächenanteile der einzelnen Zonen

Abbildung 4 stellt die Flächenanteile der verschiedenen Belastungszonen für die Jahre 2004 und 2013 in Prozent zur Gesamtfläche dar: Die Flächen von Zonen mit sehr hohen Belastungen (stark-kritisch) haben auf Kosten der geringen bis mittleren Belastung zugenommen. Die Luftgütewerte scheinen sich in einer starken Gesamtbelastung zu nivellieren. Die Optimalzone mit einer unbelasteten Flechtenvegetation konnte im Untersuchungsgebiet nicht ausgeschieden werden, 2013 fehlt zudem auch die Übergangszone mit einer geringen Gesamtbelastung.

Abb. 4:
Verteilung der Flächenanteile einzelner Belastungszonen in Prozent



3.3 Differenzkarte von 2004 bis 2013

Die Karte stellt die Differenz zwischen den Luftgütwerten von 2004 und 2013 dar (Abb. 5, Seite 15) 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 Luftgütezone und umfasst rund 6.6 IAP18-Punkte. Folgende Differenzonen 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 | Flieder |
| Starke Verschlechterung | -16.3 bis -9.9 | Violett |

Eine Verbesserung der Verhältnisse von 2004 bis 2013 hat in keinem Teil des Untersuchungsgebiets stattgefunden.

Keine wesentlichen Veränderungen ergaben sich im Gebiet südlich von Wangen bis Büel sowie in der Region von Widen über Lochgass - Holeneich - Bäzimmatt - Mühlennen nach Tuggen.

Verschlechterungen finden sich im nördlichen Gebiet Girendorf - Müslihof, in den Regionen Galgenen, Wangen und Siebnen sowie daran anschliessend grossräumig im Gebiet um Buttikon. Sehr stark verschlechtert hat sich die Situation in Schübelbach sowie südwestlich davon über Lucheren und Rütihof nach Isenburg.

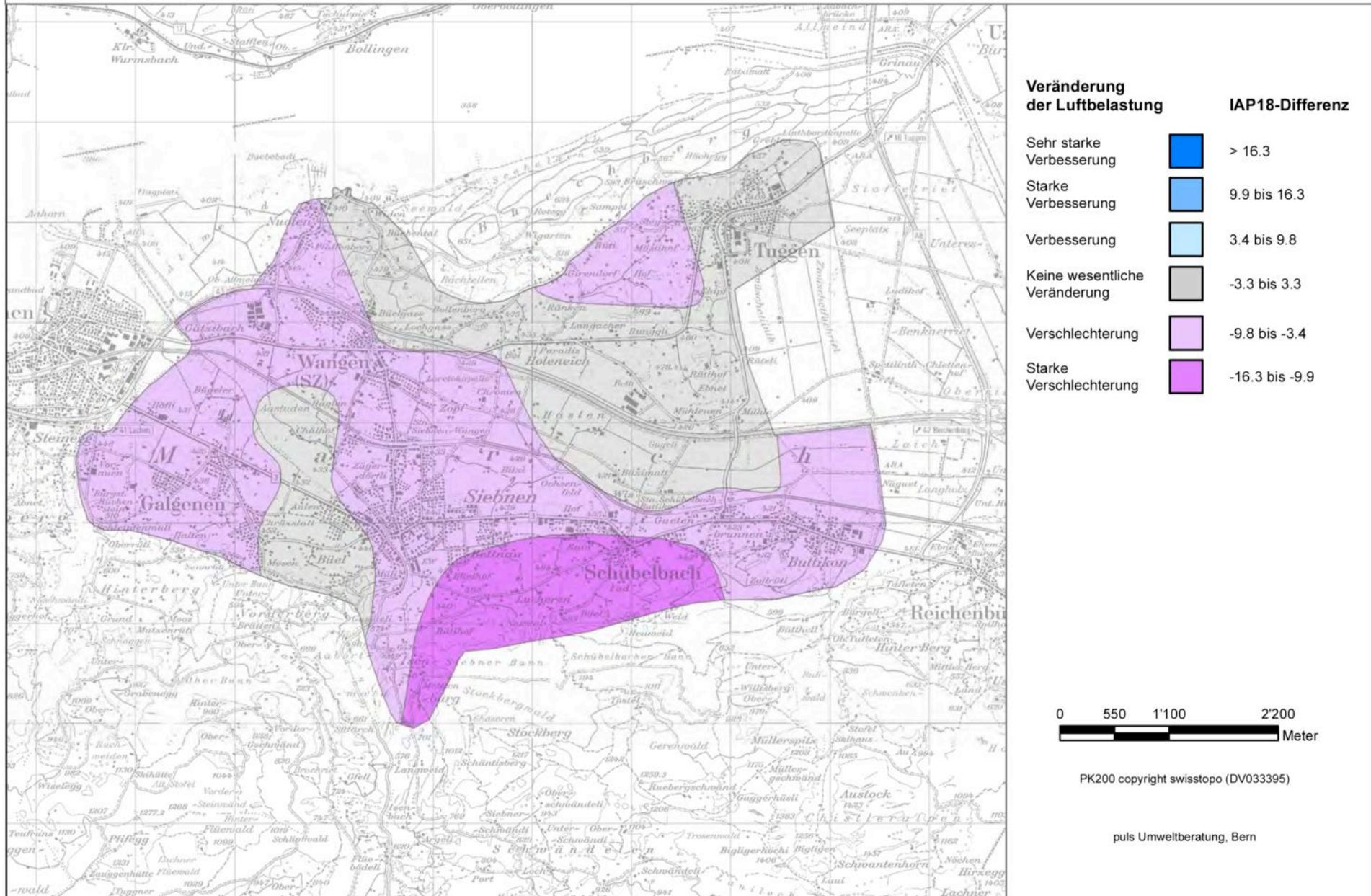
Insgesamt haben demnach alle vorher wenig belastete Gebiete tendenziell eine Verschlechterung erfahren. Aber auch vormals mittel bis stark belastete Gebiete weisen heute vielfach eine noch grössere Belastung auf. So hat sich das Gebiet westlich und südlich von Wangen weiter verschlechtert und ist nun kritisch belastet.

Da die Zonenbreite der Differenzkarte nur die Hälfte der Zonenbreite der Luftgütekarte beträgt, ist nicht jede Veränderung in der Differenzkarte auch automatisch in der Luftgütekarte abgebildet. So können Gebiete, für welche die Differenzkarte eine Verschlechterung ausweist, in der Luftgütekarten 2004 und 2013 der gleichen Zone angehören.

Abb. 5

Differenzkarte Ausserschwyz Ost 2004 - 2013

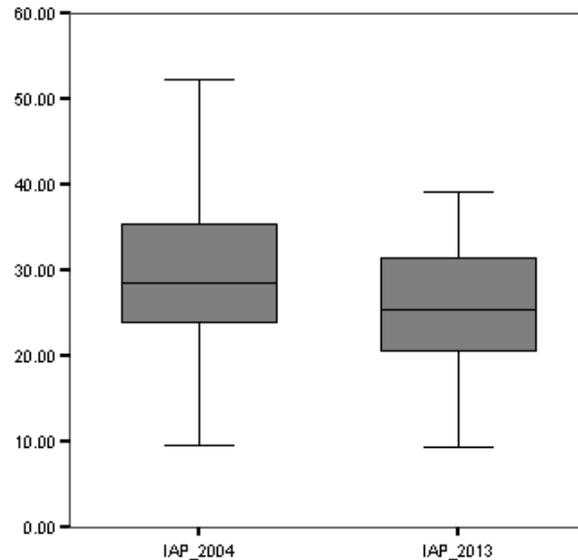
Bioindikation mit Flechten



3.4 Veränderung des Luftgütewerts IAP18

3.4.1 Luftgüte 2004 und 2013 pro Georaum

Abb. 6:
IAP-Werte pro Georaum
(nur identische Georäume 2004 - 2013)
Im Boxplot sind folgende
Perzentile dargestellt:
- 50er P.: Mittellinie
(= Median)
- 25er und 75er P.: Box
- 10er und 90er P.: Linie



Die Abbildung 6 stellt für 2004 und 2013 die IAP-Werte der Georäume dar. Das weniger breite Wertespektrum findet sich 2013. Im Jahr 2004 ist der IAP-Mittelwert höher und das Spektrum grösser. Die Abweichung der Ausreisser ist 2004 gegen oben grösser als 2013. 2013 ist im Niveau deutlich unter dasjenige von 2004 gesunken.

3.4.2 Luftgütewerte im Vergleich

Abb. 7:
Vergleich der IAP-Werte
von 2004 mit der Verän-
derung zwischen 2004
und 2013

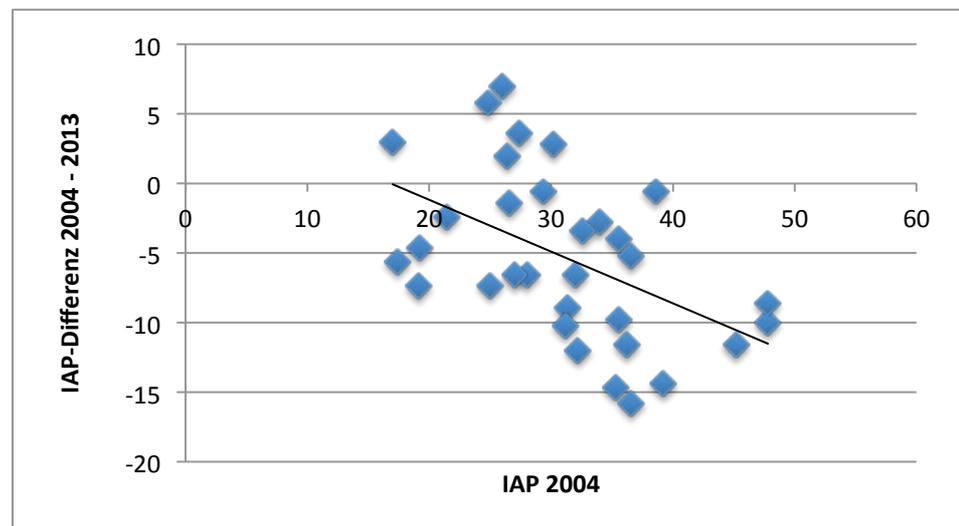


Abbildung 7 stellt für alle Georäume die Differenz der IAP18-Werte von 2004 und 2013 den IAP-Werten von 2004 gegenüber. Dieser Vergleich zeigt, dass die 2004 tiefen Luftgütewerte bis 2013 etwas zugenommen haben, die hohen Werte von damals haben sich hingegen deutlich verschlechtert. Diese Veränderungen 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 verantwortlich. In Gebieten, wo die Baumrinden durch Immissionen basisch werden, verschwinden acidophile (Säure liebende) Flechtenarten kontinuierlich.

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 fünf acidophilen Flechtenarten *Hypogymnia physodes* (Hp), *Hypogymnia tubulosa* (Ht), *Pseudevernia furfuracea* (Pf), *Evernia prunastri* (Ep) und des halben Summenwerts der Artengruppe *Parmelia glabratula* (Pg) sowie den Frequenzsummen der fünf basiphilen Arten *Xantoria parietina* (Xp), *Physconia distorta* (Pd), *Parmelia subargentifera* (Ps), *Phaeophyscia orbicularis-Gr.* (Po) und des halben Summenwerts der Artengruppe *Physcia adscendens* (Pa).

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 angemessen hohe Werte annehmen. Die Berechnungsformel lautet:

$$AI = \frac{(Hp + Ht + Pf + Ep + 0.5 \times Pg) - (Xp + Pd + Ps + Po + 0.5 \times Pa)}{IAP18}$$

3.5.1 Acidoindex 2004

2004 ist das gesamte Untersuchungsgebiet basisch geprägt (Abb. 8, Seite 19). In Gebieten mit geringerer Luft-Gesamtbelastung zeigt sich der Trend hin zu weniger basischen Verhältnissen. Das deutet auf eine höhere Vielfalt der Flechtenvegetation bezüglich ihrer Aciditäts-Ansprüche hin, saure und basische Einflüsse halten sich in etwa die Waage. Die basische Prägung überwiegt hier allerdings bereits in der gesamten untersuchten Region.

3.5.2 Acidoindex 2013

2013 hat sich die basische Prägung in Ausserschwyz Ost nochmals verstärkt und scheint heute auf hohem Niveau in kleinen Amplituden zu fluktuieren (Abb. 9, Seite 20). Basische Belastungen dominieren im Untersuchungsgebiet, nur lokal zeigt sich noch eine leicht saure Prägung.

3.5.3 Veränderung des Acidoindex' von 2004 bis 2013

Von 2004 bis 2013 haben zwei Drittel der untersuchten Georäume eine basische Prägung erfahren (Abb. 10, Seite 21). Veränderungen sind lokal: Einige ehemals weniger basisch geprägte Gebiete weisen nun stark basische Immissionen auf (z.B. Rüti), andernorts haben die sauren Immissionen leicht zugenommen. Dies gilt z.B. für die Siedlungsräume Siebnen und Schübelbach, Wangen und Galgenen, während die eher ländlichen Gebiete tendenziell eine Zunahme der basischen Verhältnisse zeigen. In der Veränderung des Säuregrads von 2004 bis 2013 ist keine räumlich klare Tendenz erkennbar (Abb. 10, Seite 21), die Prägung ist heute insgesamt noch basischer als 2004. Einige vormals stark basisch geprägte Räume zeigen eine leichte Abnahme der Belastung, einige Gebiete sind unverändert basisch.

Abb. 8

Acidoindex Ausserschwyz Ost 2004

Biindikation mit Flechten

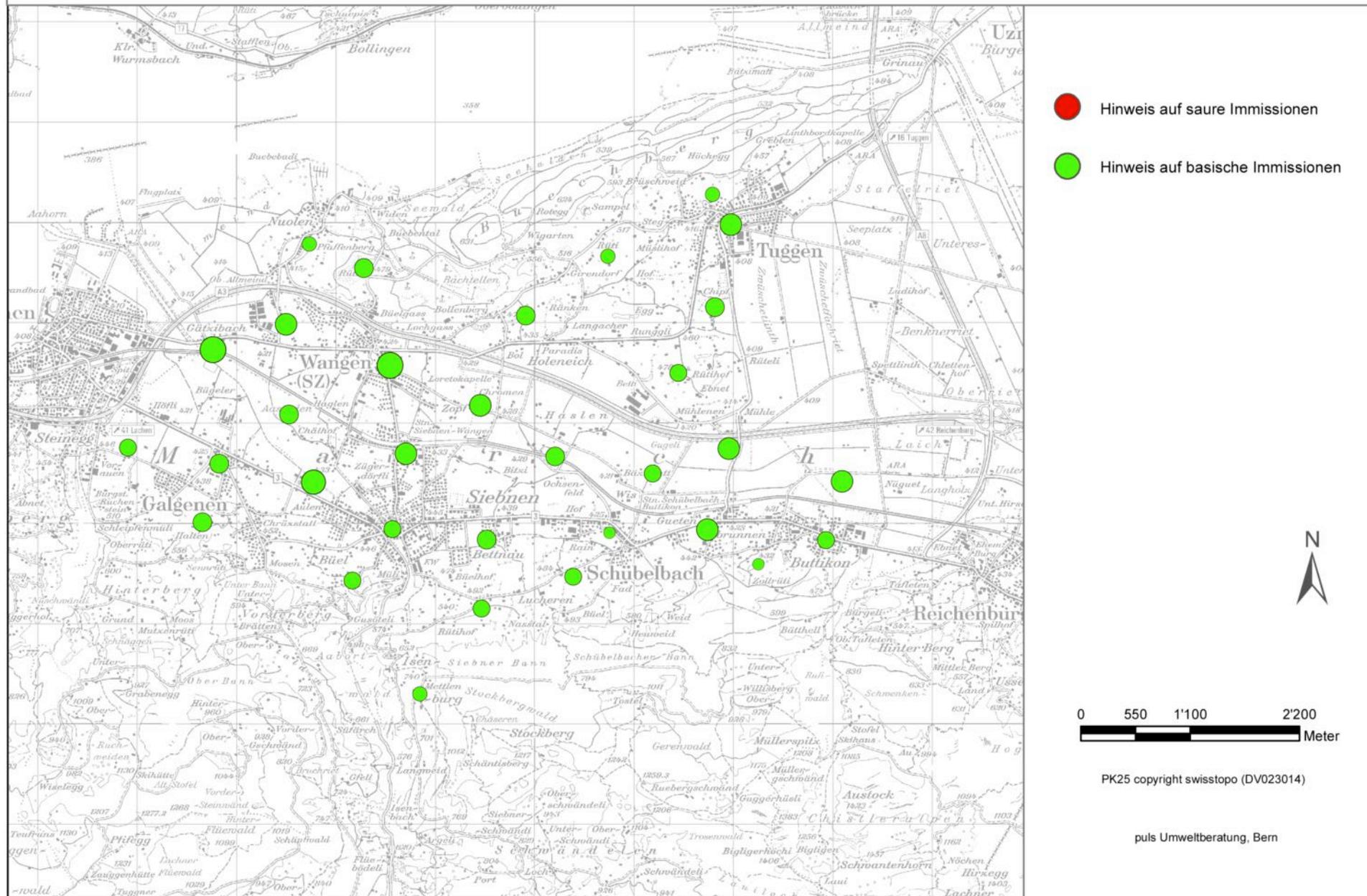


Abb. 9

Acidoindex Ausserschwyz Ost 2013

Biindikation mit Flechten

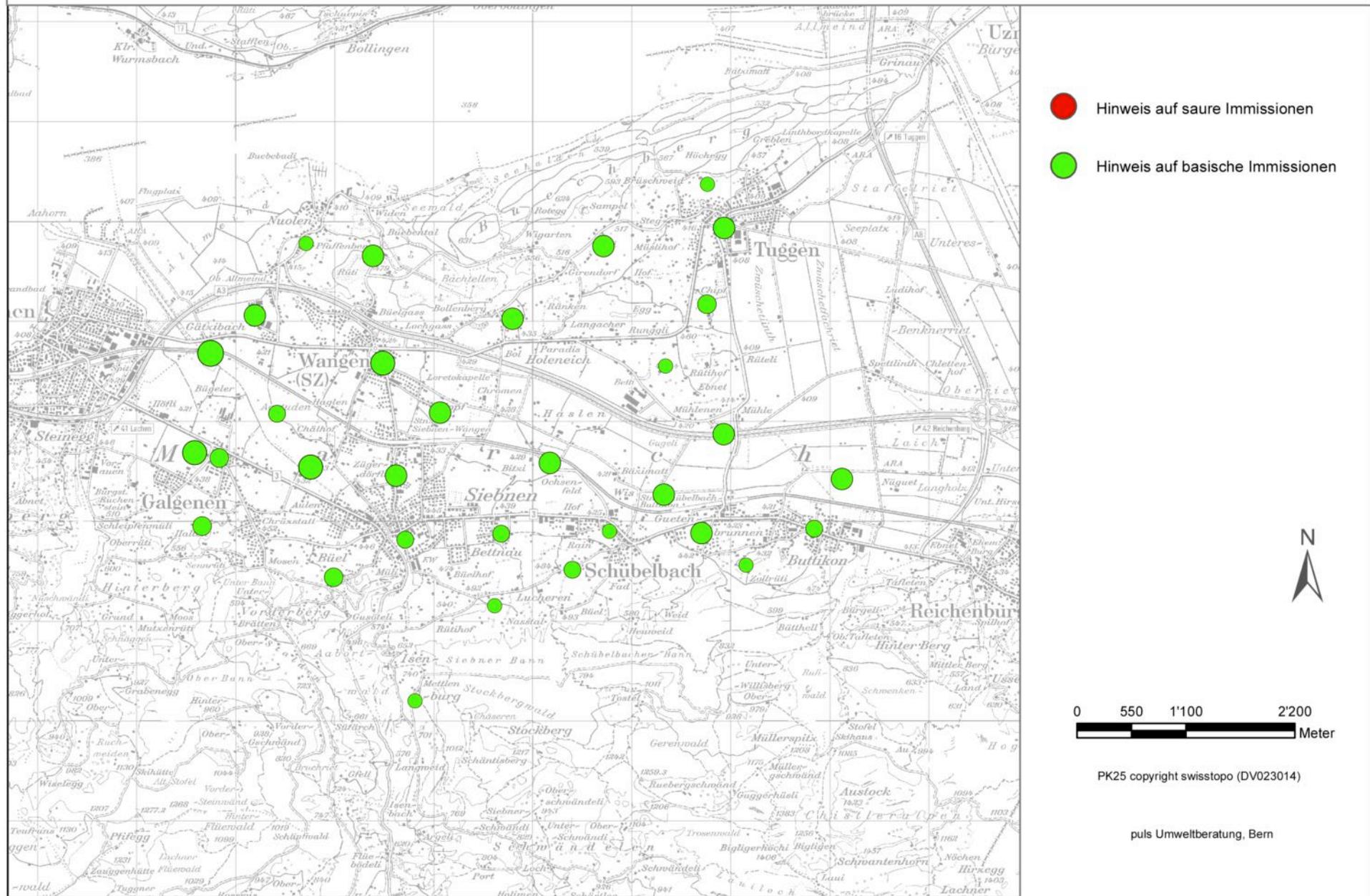
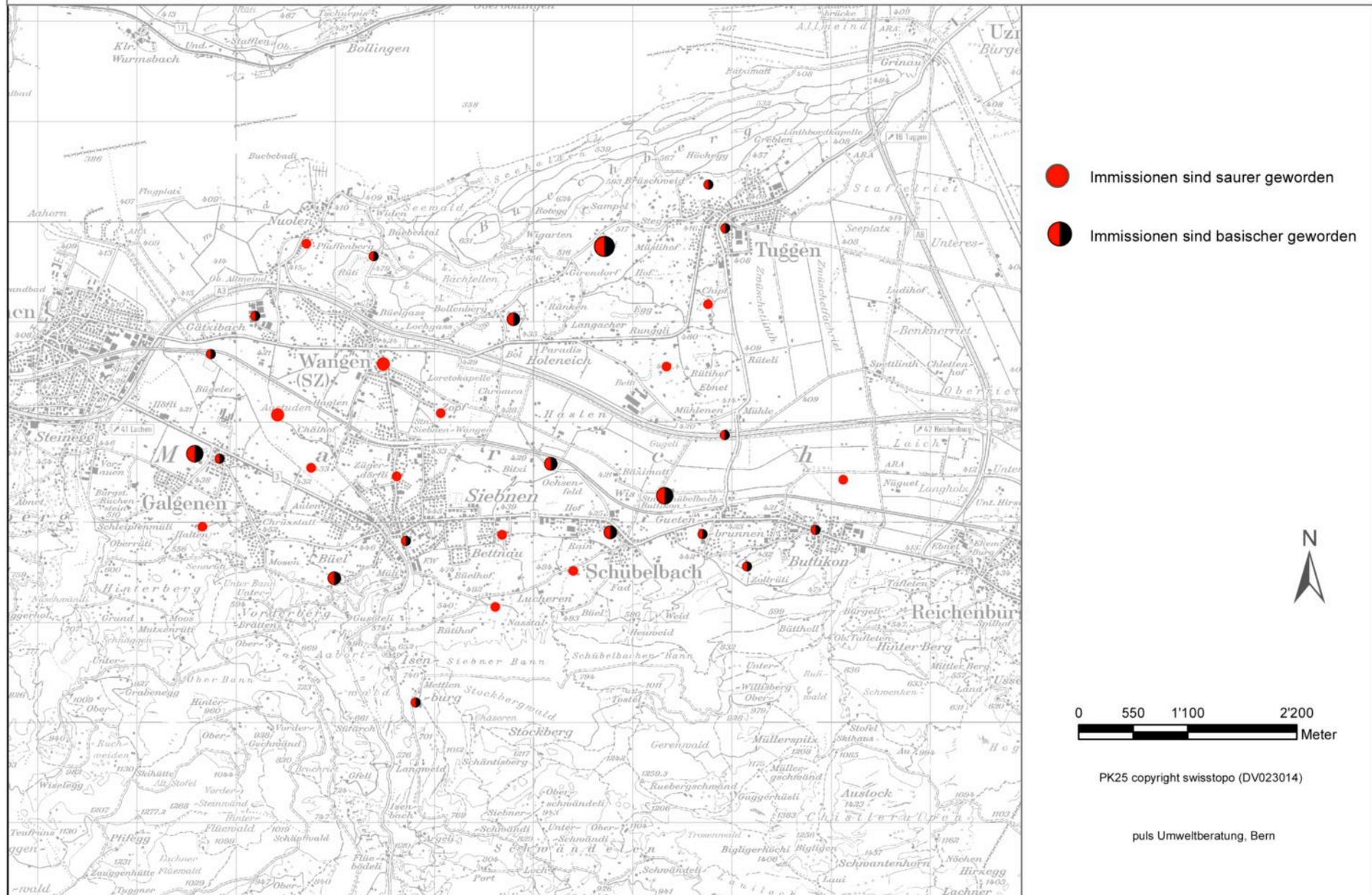


Abb. 10

Acidoindex-Differenz Ausserschwyz Ost 2004 - 2013

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 (NH₃). 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. Durch die Oxidation wirkt Ammoniak versauernd. Insgesamt stammen über 70% der aus der Luft deponierten Stickstoffverbindungen aus Ammoniak und dessen Verbindungen (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* (Xp), *Xanthoria fallax*-Gr. (Xf), *Physconia grisea* (Pg), *Phaeophyscia orbicularis*-Gr. (Po) sowie *Physcia adscendens*-Gr. (Pa) berechnet; zum anderen der vier anitrophilen Arten *Hypogymnia physodes* (Hp), *Pseudevernia furfuracea* (Pf), *Evernia prunastri* (Ep) und *Parmelia saxatilis* (Ps). 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. Die Berechnungsformel lautet:

$$NI = \frac{(Xp + Xf + Pg + Po + Pa) - (Hp + Pf + Ep + Ps)}{IAP18}$$

3.6.1 Nitroindex 2004

Die Region Ausserschwyz Ost weist bereits 2004 eine gesamthaft stickstoffreiche Immission auf (Abb. 11, Seite 24). Besonders stark stickstoffreich sind die Immissionen in den Räumen Tuggen, Mühlenen, Wangen-Zügerdörfli - Galgenen und Gätzibach.

3.6.2 Nitroindex 2013

Die Verhältnisse von 2004 liegen auch heute noch als Gesamtbild vor, lokal ist die Stickstoffbelastung hingegen zurückgegangen (Abb. 12, Seite 25). Nach wie vor sind aber sämtliche Gebiete stickstoffreich. Am höchsten sind die Immissionen heute in Grätzibach, im Raum Wangen - Zügerdörfli und im Gebiet um Mühlenen.

3.6.3 Veränderung des Nitroindex' 2004 bis 2013

Von 2004 bis 2013 haben die Stickstoffimmissionen in einigen Teilen des Untersuchungsgebiets zugenommen, in andern hingegen teilweise abgenommen (Abb. 13, Seite 26). Besonders in den Räumen Rüti - Holeneich, Haslen, Buttikon - Mühlenen, Müli und Steinegg ist die Stickstoffbelastung gesunken.

Im Jahr 2004 stark stickstoffreiche Gebiete sind heute unverändert belastet oder leicht weniger stickstoffreich, während Regionen mit früher weniger ausgeprägten Stickstoffimmissionen heute ebenfalls stark stickstoffreich sind. Tendenziell hat die Stickstoffbelastung in Ausserschwyz Ost nochmals zugenommen.

Wie in anderen untersuchten Gebieten der Schweiz (Abb. 14, Seite 27) scheint sich der Grad der Stickstoffbelastung im Untersuchungsgebiet von 2004 bis 2013 auf einem hohen Niveau anzunähern.

Abb. 11

Nitroindex Ausserschwyz Ost 2004

Bioindikation mit Flechten

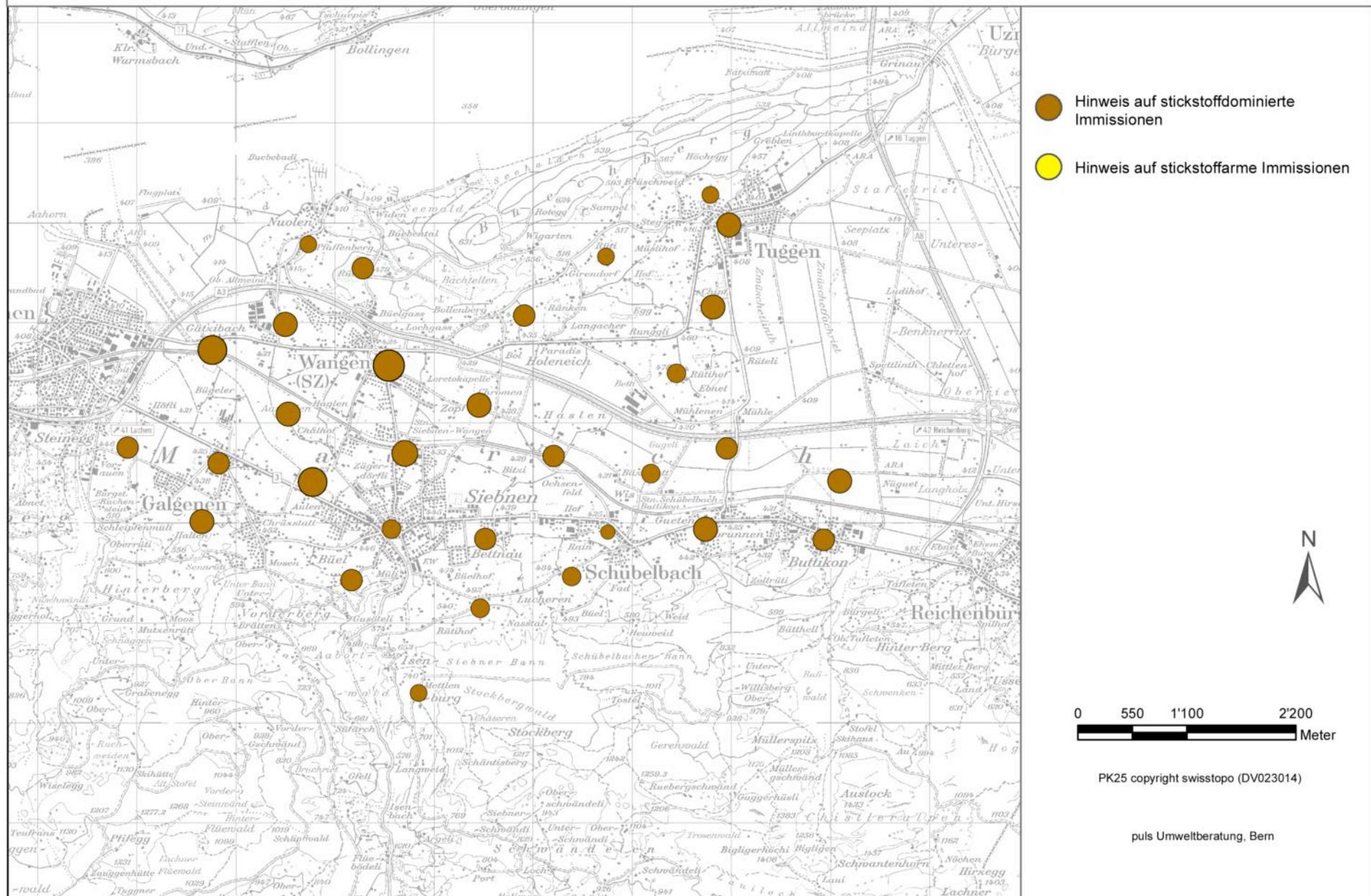


Abb. 12

Nitroindex Ausserschwyz Ost 2013

Biindikation mit Flechten

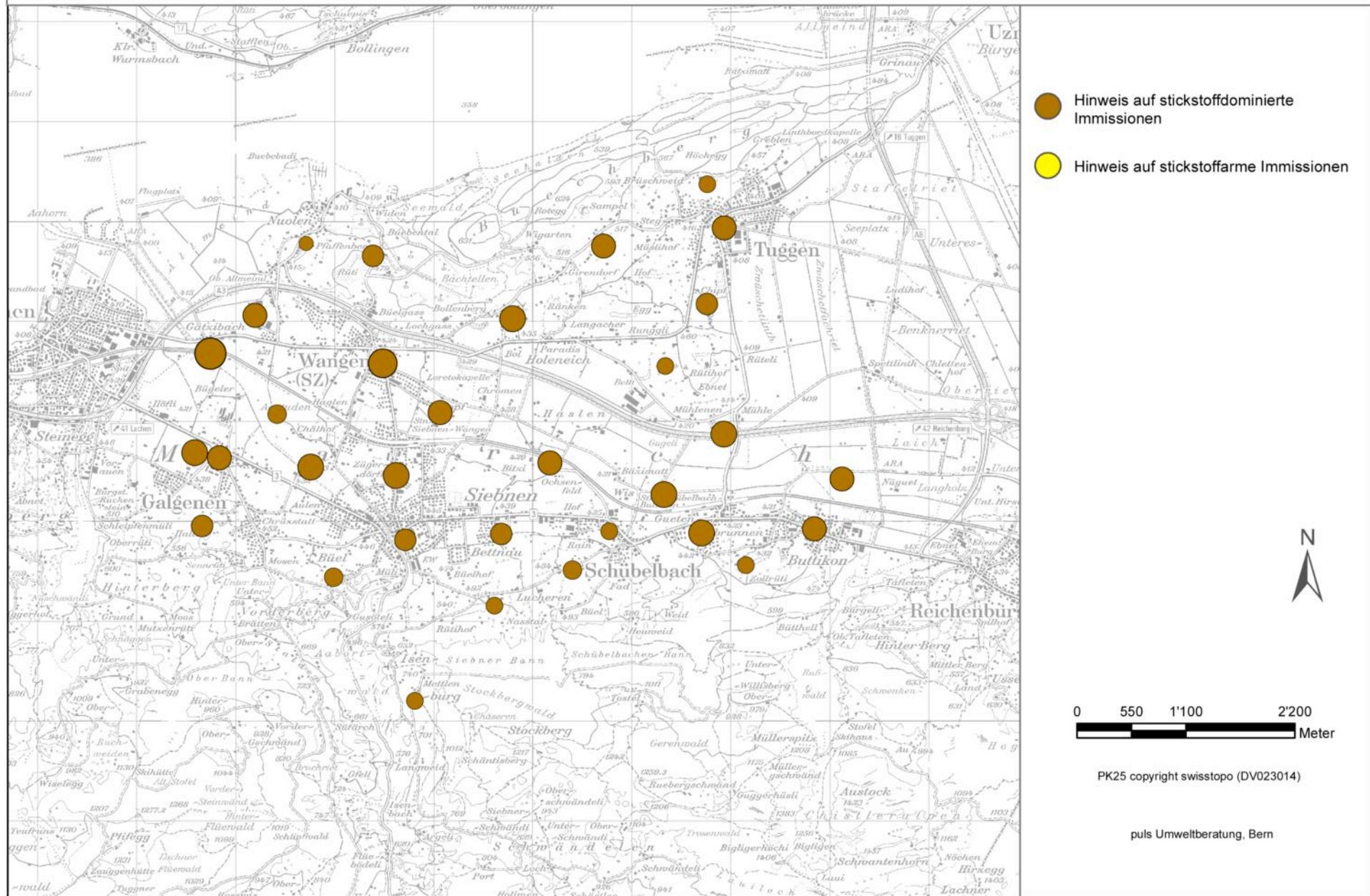


Abb. 13

Nitroindex-Differenz Ausserschwyz Ost 2004 - 2013

Bioindikation mit Flechten



- Immissionen sind stickstoffdominierter
- Immissionen sind stickstoffärmer



PK25 copyright swisstopo (DV023014)

puls Umweltberatung, Bern

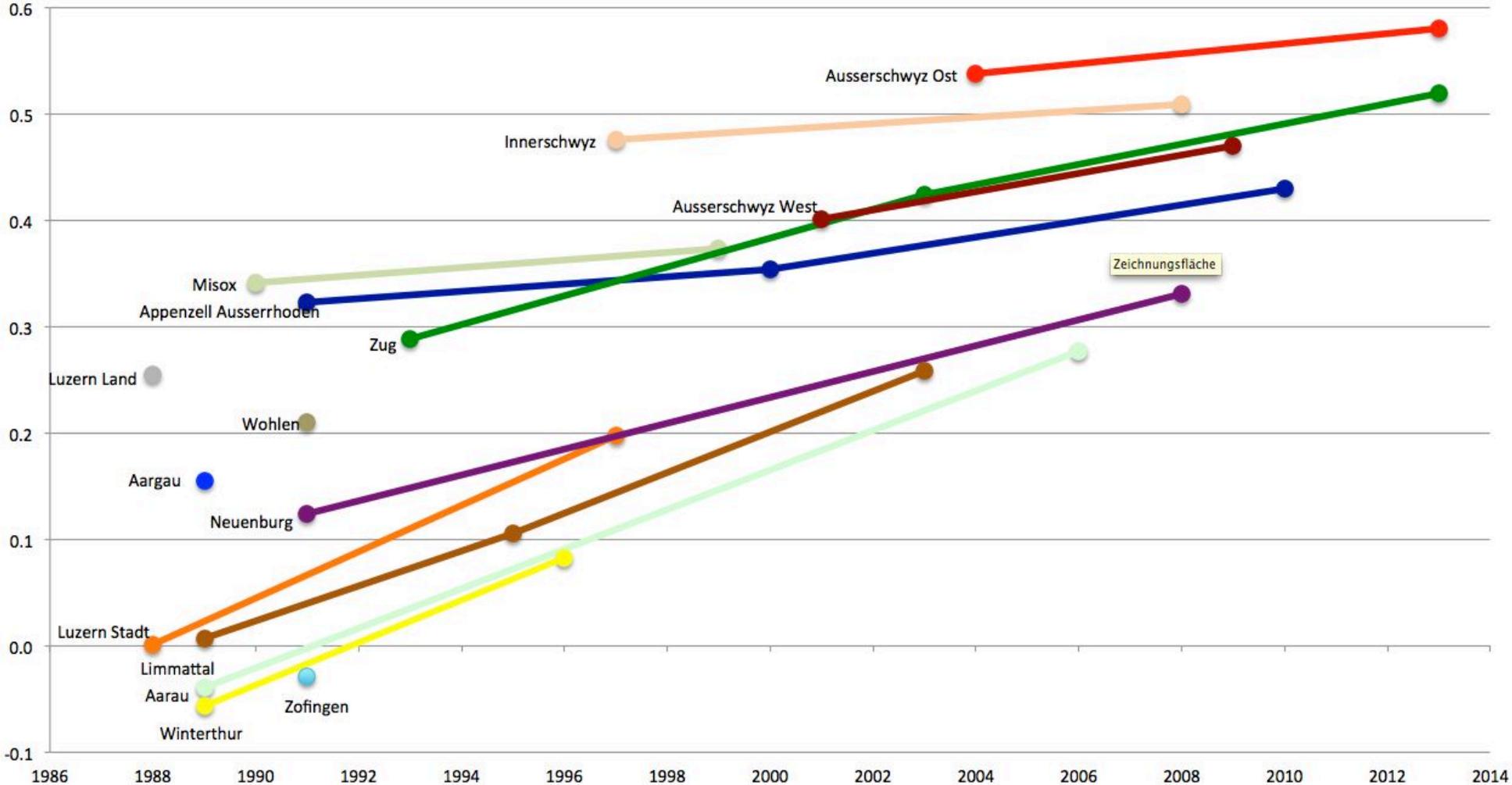


Abb. 14
Der Nitroindex in verschiedenen Gebieten der Schweiz. Ausserschwyz Ost: Rote Linie

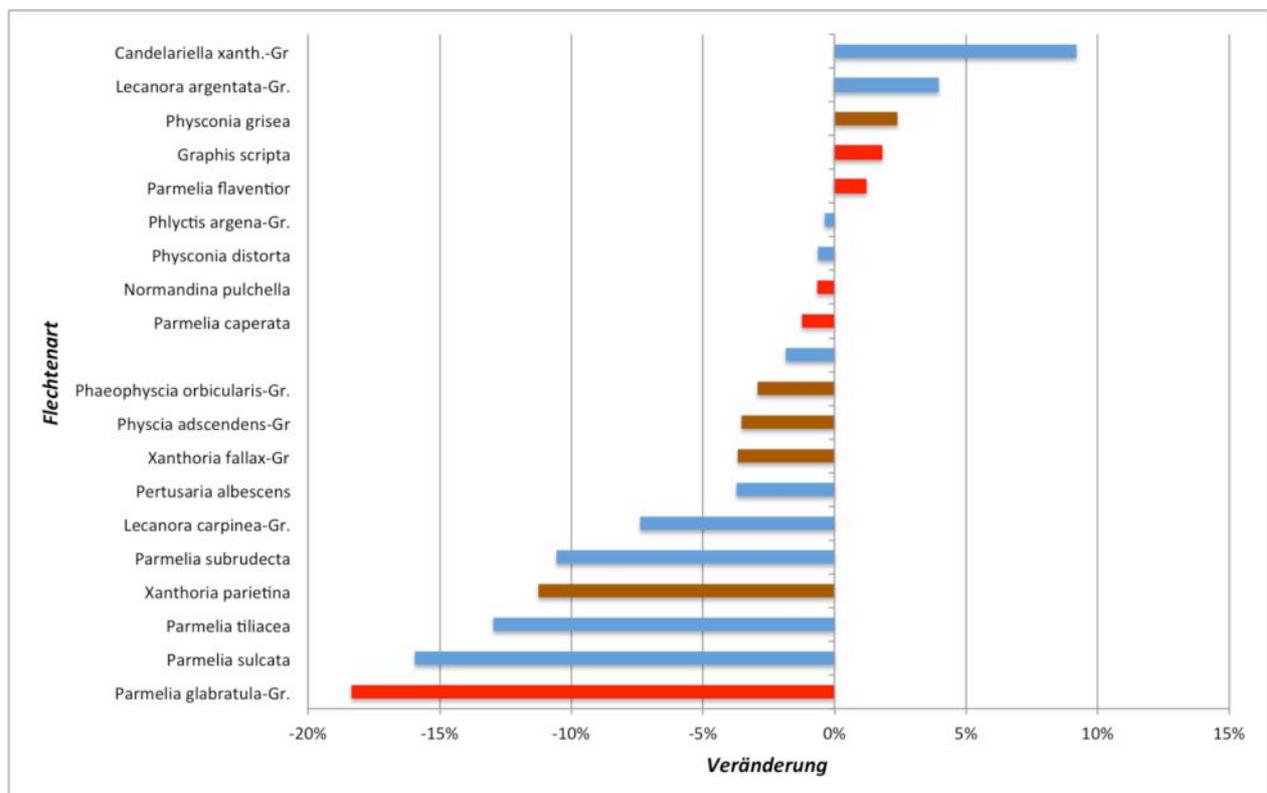
3.7 Flechten-Diversität

In den Jahren 2004 und 2013 konnten jeweils ähnlich viele Flechtenarten festgestellt werden: 2004 wurden 34 Arten und Artengruppen, 2013 noch 28 Arten und Artengruppen gefunden. Ein grösserer Teil davon fand sich nur an wenigen Bäumen. 2004 waren 27 Arten und Artengruppen an mehr als einem Prozent der Bäume vorhanden, 2013 noch 25 Arten- und Artengruppen.

Während der 9 Jahre hat die Häufigkeit, mit der die einzelnen Arten auftreten, überwiegend abgenommen (Abb. 15). Von einer solchen Abnahme sind sowohl säureliebende Arten (rote Balken) als auch stickstofftolerante Arten (braune Balken) betroffen. Am stärksten abgenommen haben säure- oder basenindifferente Arten. Insgesamt sind die stickstofftoleranten Arten stärker von einer Abnahme betroffen als die säureliebenden, unter letzteren ist jedoch die Art mit dem grössten Häufigkeitsverlust vertreten.

Abb. 15:

Veränderung der Häufigkeit von Flechtenarten zwischen 2004 und 2013. Berücksichtigt sind nur Flechtenarten, welche an mehr als 3% der Bäume auftraten



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).

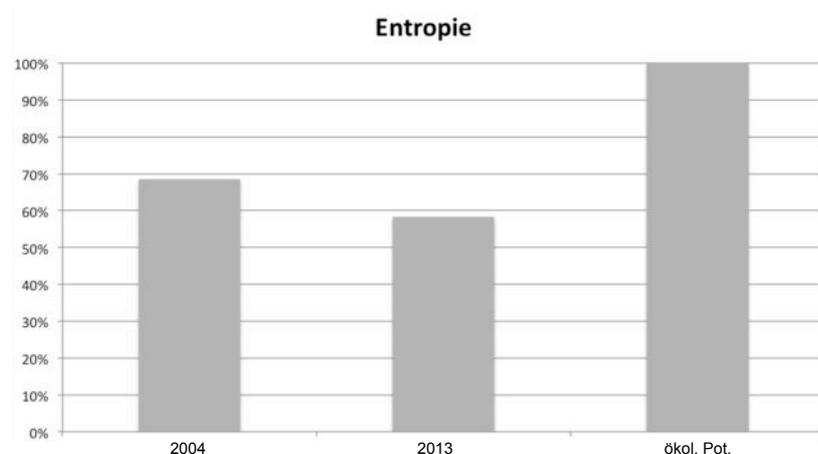
Entropie ist das Mass für die Ungewissheit, ob eine bestimmte Flechtenart an einem Trägerbaum zu finden ist. Die Ungewissheit sinkt mit zunehmender Diversität und höherem Entropiewert. Wenn in einem Untersuchungsgebiet nur eine Art vorkommt, ist der Entropiewert gleich Null.

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 Ausserschwyz Ost zu beschreiben, wurde die mittlere Entropie für die Jahre 2004 und 2013 berechnet. Als Referenzwert wurde der maximale Wert des Jahres 2004 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 2004 (68.5% des Maximalwerts) zu 2013 (58.4% des Maximalwerts) gesunken (Abb. 16).

Abb. 16:
Entropiewerte von 2004 und 2013 als Prozente des maximalen Werts (des ökologischen Potentials)



4. Diskussion

Die Flechtenkartierung zeigt eine Verschlechterung der Luftqualität von 2004 bis 2013. Die Zone der mittleren Belastung hat sich auf Kosten der geringen Gesamtbelastung ausgedehnt. Die starke Gesamtbelastung dominiert heute, sie besitzt nun mit Abstand den grössten Flächenanteil. Die Zone mit kritischer Gesamtbelastung ist neu aufgetreten. Der Nitroindex zeigt, dass die Eutrophierung der Luft seit 2004 weiter, jedoch etwas abgeschwächt zugenommen hat.

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

4.1 Luftqualität

4.1.1 Emissionsentwicklung

Seit Inkraftsetzung des Umweltschutzgesetzes und der Luftreinhalteverordnung 1992 haben verschiedene Schadstoffemissionen in der 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 kritischen Substanzen sowie der Einbau von Abluftreinigungsanlagen bei kritischen Prozessen, wie z.B. bei den Kehrlichtverbrennungsanlagen (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. Die Erfolge durch die Katalysortechnik im Strassenverkehr werden zurzeit durch die laufende Verkehrszunahme und vor allem auch durch die überproportionale Zunahme der Dieselfahrzeuge gefährdet.

1999 hat die Zentralschweizer Umweltschutzdirektoren-Konferenz (ZUDK) den gemeinsamen Massnahmenplan Luftreinhaltung I verabschiedet. Die aktuellen Luftschadstoff-Messwerte zeigen jedoch, dass in der Zentralschweiz auch mit der Umsetzung des Massnahmenplans I die Grenzwerte von Stickstoffdioxid, Feinstaub und Ozon immer noch grossräumig überschritten werden. Die Luftqualität der Zentralschweiz entspricht damit nicht den gesetzlichen Anforderungen. Handlungsbedarf für die Weiterführung der bisherigen Luftreinhalte-Massnahmen sowie für zusätzliche Massnahmen ist gegeben. Am 21. Mai 2007 hat die ZUDK daher den Massnahmenplan Luftreinhaltung II verabschiedet. Mit

den darin enthaltenen Massnahmen sollen insbesondere die Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), Stickoxid und Feinstaub weiter reduziert werden.

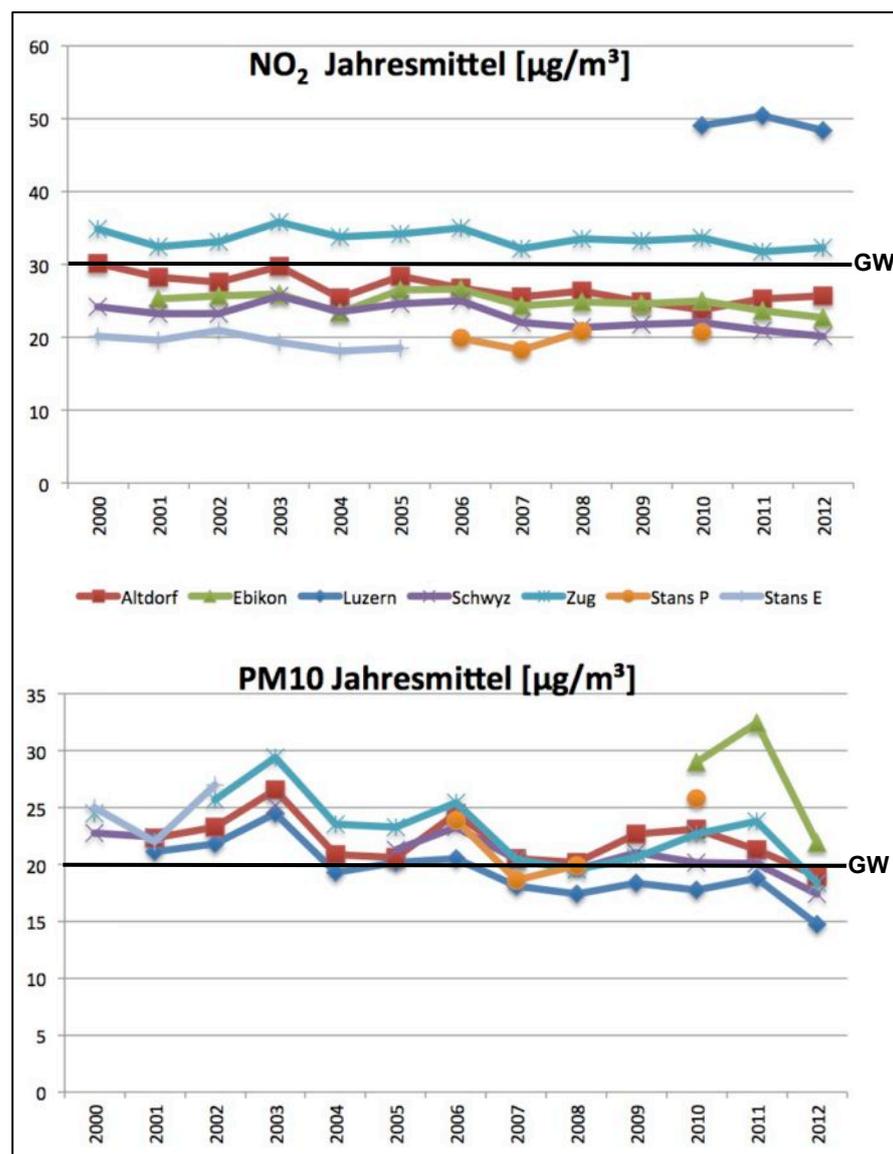
4.1.2 Immissionsmessungen

Die Entwicklung der Luftqualität (Immissionen) wird von der ZUDK für die Region Zentralschweiz regelmässig mit gezielten Untersuchungen und Messungen überprüft. Sie betreibt das interkantonale Luftmessnetz in-Luft und überwacht die Leitsubstanzen für die Beurteilung der Luftqualität gemäss der Luftreinhalte-Verordnung Stickstoffdioxid (NO₂), Feinstaub PM10 und Ozon (O₃). Das automatische Messnetz wird mit zusätzlichen NO₂-Passivsammlern verdichtet.

Ergebnisse der Stickstoffdioxid- und Feinstaub-Messungen

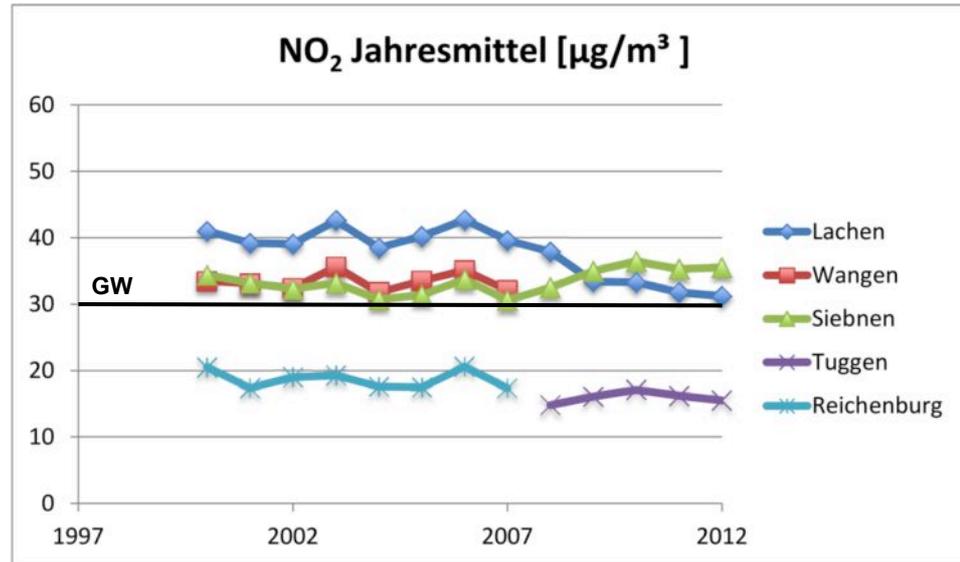
Die einzelnen Messstationen des in-Luft-Netzes zeigen mehrheitlich stagnierende NO₂-Immissionen. Der Grenzwert wird in den meisten Regionalzentren ab 10'000 Einwohnern sowie an stark befahrenen Strassen in der ganzen Zentralschweiz überschritten. Von den 770 Jahresmittelwerten der Messperiode 2000 bis 2006 liegen 153 über dem Grenzwert.

Abb. 17:
Jahresmittelwerte interkantonales Luftmessnetz in-Luft;
GW = Grenzwert LRV



In der Region Ausserschwyz Ost (Abb. 18) fluktuieren die NO_2 -Werte auf relativ konstantem, teilweise hohem Niveau. Einzig die Station Lachen zeigt einen leichten abnehmenden Trend in den letzten fünf Jahren.

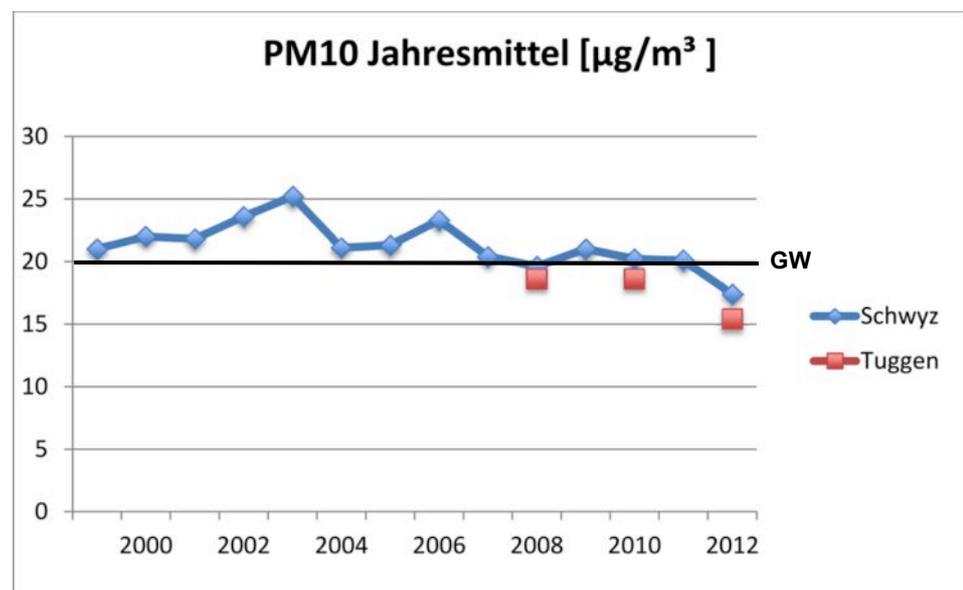
Abb. 18:
Jahresmittel NO_2 in der
Region Ausserschwyz
Ost;
GW = Grenzwert LRV



Auch für PM_{10} zeigen die Stationen (Abb. 17) entgegen den Erwartungen aufgrund der getroffenen Massnahmen stagnierende Immissionen. Grenzwerte wurden allen Zentralschweizer Zentren zwischen 2000 und 2006 mehrheitlich überschritten. Die Anzahl Tage mit mittlerer Immission über $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (erlaubt ist maximal ein Tag pro Kalenderjahr) wurde in den letzten Jahren sogar an sämtlichen Messstationen überschritten.

Die Stationen in Schwyz und Tuggen (Abb. 19) zeigen im Jahresmittel eine leichte Abnahme der Feinpartikel-Immissionen.

Abb. 19:
Jahresmittel PM_{10} :
Tuggen im Vergleich mit
Schwyz;
GW = Grenzwert LRV

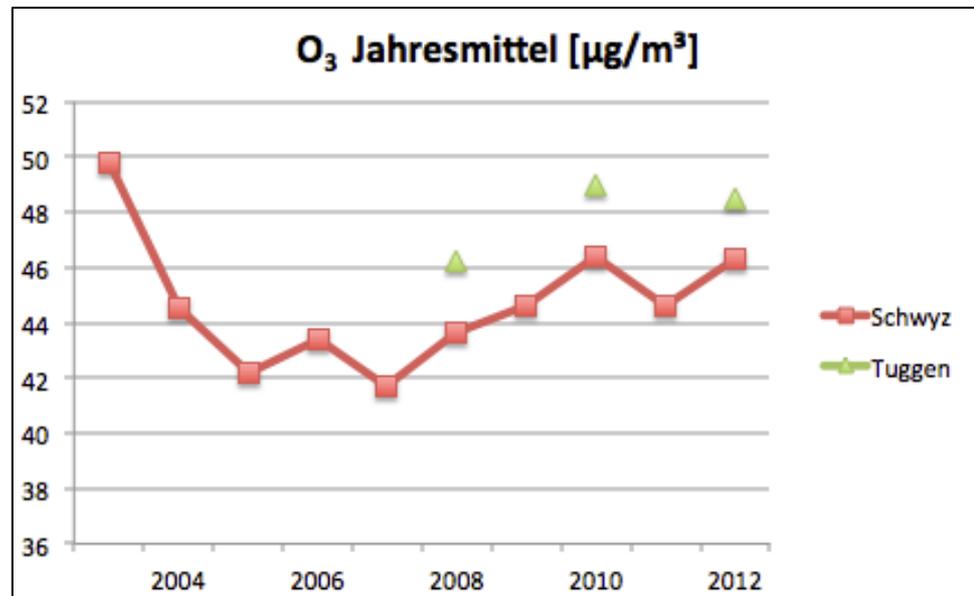


Ergebnisse der Ozonmessungen

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 (Ozonzehrung). Die vielfältigen Prozesse wirken sich auf die räumlichen Muster der Ozonbelastung aus. Die höchsten Ozonbelastungen treten häufig an den Randbereichen der grossen Siedlungsgebiete und am Nachmittag auf. Die Immissionsgrenzwerte (1-Stunden-Mittelwert und monatliche 98%-Werte) wurden an allen in-Luft-Messstationen während der Periode 2000 bis 2006 überschritten (Abb. 17). In ländlichen Gebieten wurde auch der Schwellenwert AOT 40 für Wald überschritten. Dieser Wert ist kein Grenzwert der LRV, aber ein Mass dafür, wie lange und in welchem Ausmass der Schädigungsschwellenwert für Vegetationen überschritten wird.

Die Messstationen Schwyz und Tuggen zeigen seit 2007 wieder eine zunehmende Tendenz der Ozonbelastung in der Region Ausserschwyz Ost.

Abb. 20:
Jahresmittel Ozon: Tuggen im Vergleich mit Schwyz



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.

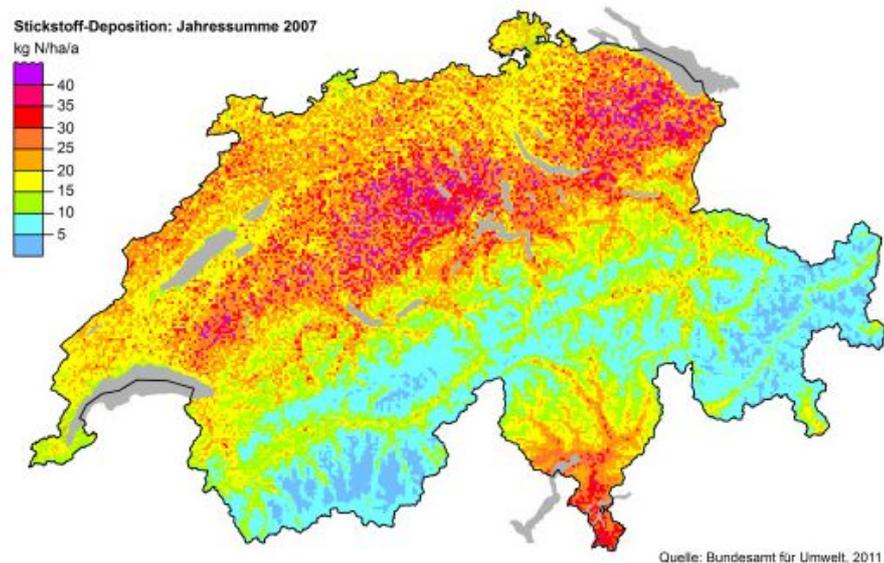
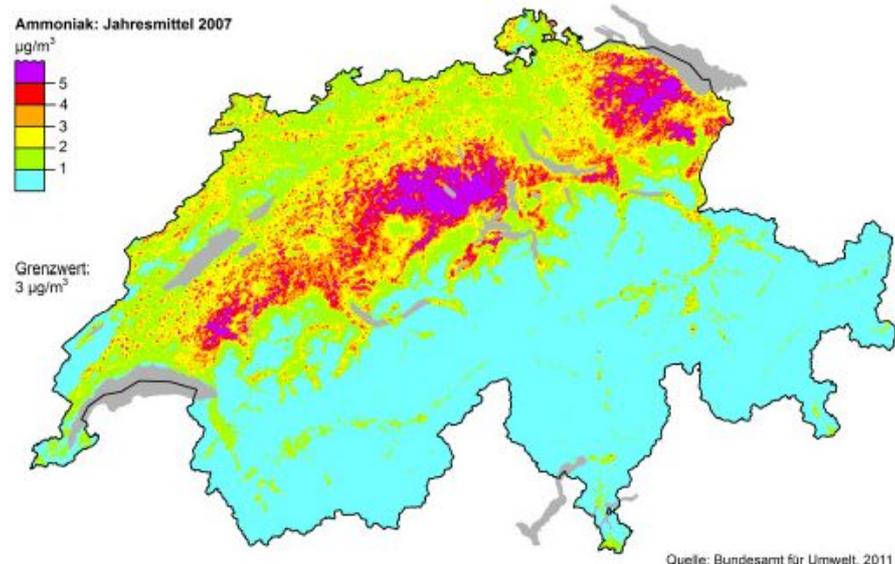
Ammoniak und Ammonium

Die Schadstoffkarte des BAFU zeigt für 2007 in der Zentralschweiz die schweizweit höchsten Belastungen durch Ammoniak (Abb. 21). 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 seinem Emissionsmuster entsprechend (Abb. 21 oben).

Ammonium (NH_4^+) hingegen wird weiträumig transportiert und mit dem Niederschlag deponiert. Auch beachtliche Teile des reduzierten Stickstoffes werden weiträumig verfrachtet und als Nitrat (NO_3^-) nass deponiert (Uwe 2007). So erfolgen die Stickstoff-Gesamtdeposition und damit die Eutrophierung insgesamt viel weiträumiger als die Ammoniakbelastung (Abb. 21 unten).

Abb. 21:
Ammoniakemissionen
(oben) und -immissionen
(unten) in der Schweiz
Schadstoffkarten
(BAFU 2011)



Im Kanton Luzern ist der landwirtschaftliche Anteil an der Gesamtemission Ammoniak mit 97 % grösser als in der übrigen Schweiz, wo der Anteil bei 90 % liegt. Ebenfalls ist eine überdurchschnittliche Belastung mit Stickstoff im Kanton Schwyz festzustellen. In grossen Teilen der Zentralschweiz werden die Critical Loads (kritische Eintragswerte) für Stickstoff um 20 bis 30 kg Stickstoff pro Hektar und pro Jahr überschritten. Die Kantone sind deshalb nach dem Bundesrecht (Umweltschutzgesetz, Luftreinhalte-Verordnung) verpflichtet, einen Massnahmenplan zu erstellen. Damit sollen Massnahmen, die zur Einhaltung der Immissionsgrenzwerte führen, ergriffen werden. Die ZUDK hat aus diesem Grund die Erarbeitung eines Teilplans Ammoniak zum Massnahmenplan II Luftreinhalte in Auftrag gegeben.

Die nachfolgende Tabelle 3 gibt eine Übersicht der NH₃-Emissionen und der Depositionen in den sechs Kantonen der Zentralschweiz. Als Vergleich sind jeweils auch die Fläche des Kantons sowie der prozentuale Anteil an der gesamtschweizerischen Emission bzw. Deposition angegeben.

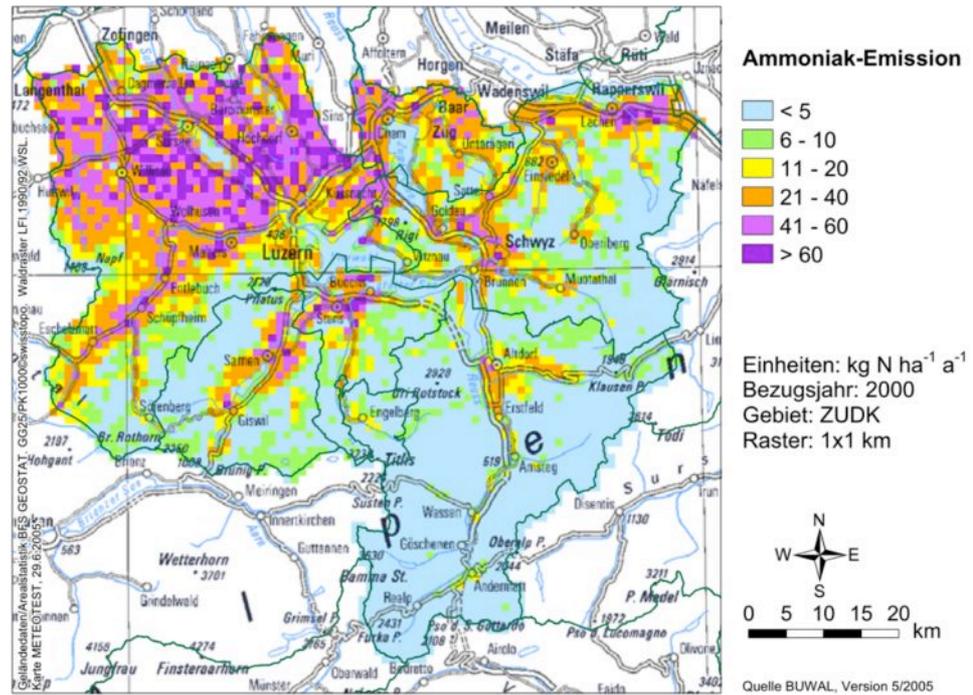
Tab. 3:
Ammoniakemission und -deposition in der Zentralschweiz (Kanton Luzern 2007)

| Parameter | CH | LU | UR | SZ | OW | NW | ZG | | | | | | |
|---------------------------------|-------|------|-------|------|------|------|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| Fläche (km ²) | 41200 | 1493 | 3.6% | 1077 | 2.6% | 891 | 2.2% | 491 | 1.2% | 276 | 0.7% | 239 | 0.6% |
| <i>Emissionen:</i> | | | | | | | | | | | | | |
| NH ₃ Landwirtschaft | 48000 | 5190 | 10.8% | 384 | 0.8% | 1296 | 2.7% | 480 | 1.0% | 384 | 0.8% | 576 | 1.2% |
| NH ₃ Verkehr | 1100 | 49 | 4.5% | 9 | 0.8% | 25 | 2.3% | 5 | 0.5% | 8 | 0.7% | 16 | 1.5% |
| NH ₃ Haushalte | 800 | 36 | 4.5% | 4 | 0.5% | 13 | 1.6% | 4 | 0.5% | 4 | 0.5% | 9 | 1.1% |
| NH ₃ Industr.&Gew. | 800 | 37 | 4.6% | 7 | 0.9% | 16 | 2.0% | 5 | 0.6% | 4 | 0.5% | 9 | 1.1% |
| NH ₃ natürl. Quellen | 700 | 19 | 2.7% | 18 | 2.6% | 17 | 2.4% | 12 | 1.7% | 5 | 0.7% | 2 | 0.3% |
| NH ₃ Total | 51400 | 5321 | 10.4% | 404 | 0.8% | 1367 | 2.7% | 494 | 1.0% | 405 | 0.8% | 612 | 1.2% |
| <i>Depositionen:</i> | | | | | | | | | | | | | |
| NH ₃ gasförmig | 25410 | 2400 | 9.4% | 229 | 0.9% | 711 | 2.8% | 305 | 1.2% | 203 | 0.8% | 280 | 1.1% |
| NH ₄ nass | 25300 | 1063 | 4.2% | 683 | 2.7% | 860 | 3.4% | 380 | 1.5% | 202 | 0.8% | 177 | 0.7% |
| NH ₄ staubförmig | 3160 | 145 | 4.6% | 60 | 1.9% | 79 | 2.5% | 44 | 1.4% | 22 | 0.7% | 20 | 0.6% |
| NH _y total | 53870 | 3608 | 6.7% | 1133 | 1.8% | 1650 | 3.1% | 729 | 1.3% | 427 | 0.8% | 477 | 0.9% |

Die prozentualen Angaben zeigen, dass im Kanton Luzern die Intensität der Tierhaltung und somit auch der landwirtschaftlichen NH₃-Emissionen mit 10.8 % weit über dem Durchschnitt der Schweiz liegt, wenn man sie auf die Grösse des Kantonsgebietes von 3.6 % bezieht. Auch Zug und in geringerem Mass Schwyz haben diesbezüglich überdurchschnittlich hohe landwirtschaftliche Emissionen.

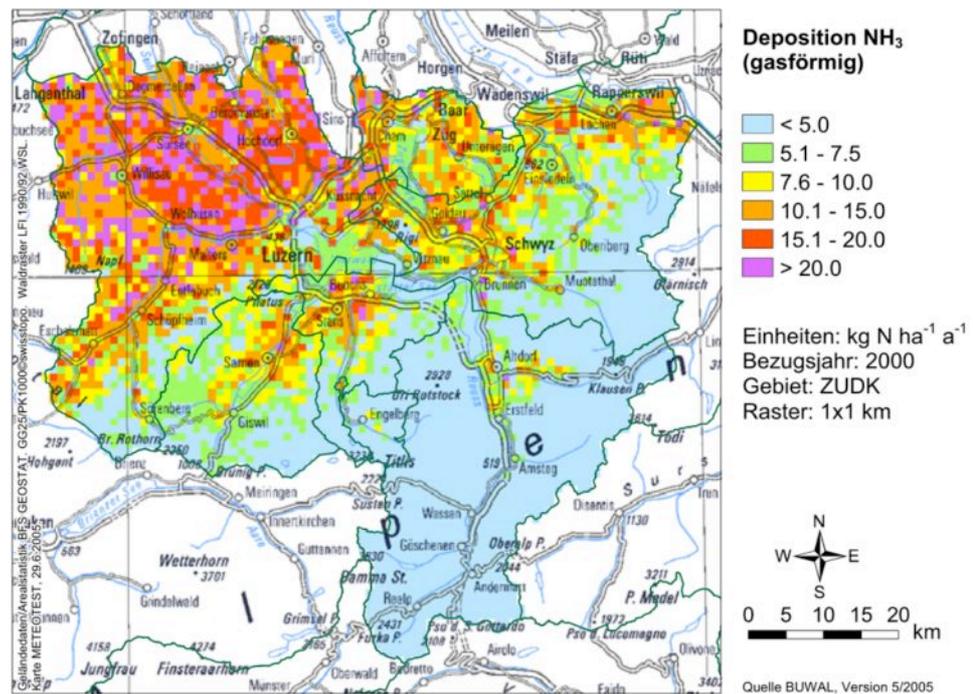
Die Emissionskarte Ammoniak für die Zentralschweiz zeigt für das Luzerner Unterland, für Buochs, Stans und Sarnen, Küsnacht, Zug, Baar, Schwyz sowie für die Region Ausserschwyz Ost einen sehr hohen Ausstoss von NH₃ (Abb. 22).

Abb. 22:
Ammoniakemission in der Zentralschweiz



Entsprechend gestaltet sich das Depositionsmuster für NH₃ im Bereich Zentralschweiz:

Abb. 23:
Ammoniak-Deposition in der Zentralschweiz

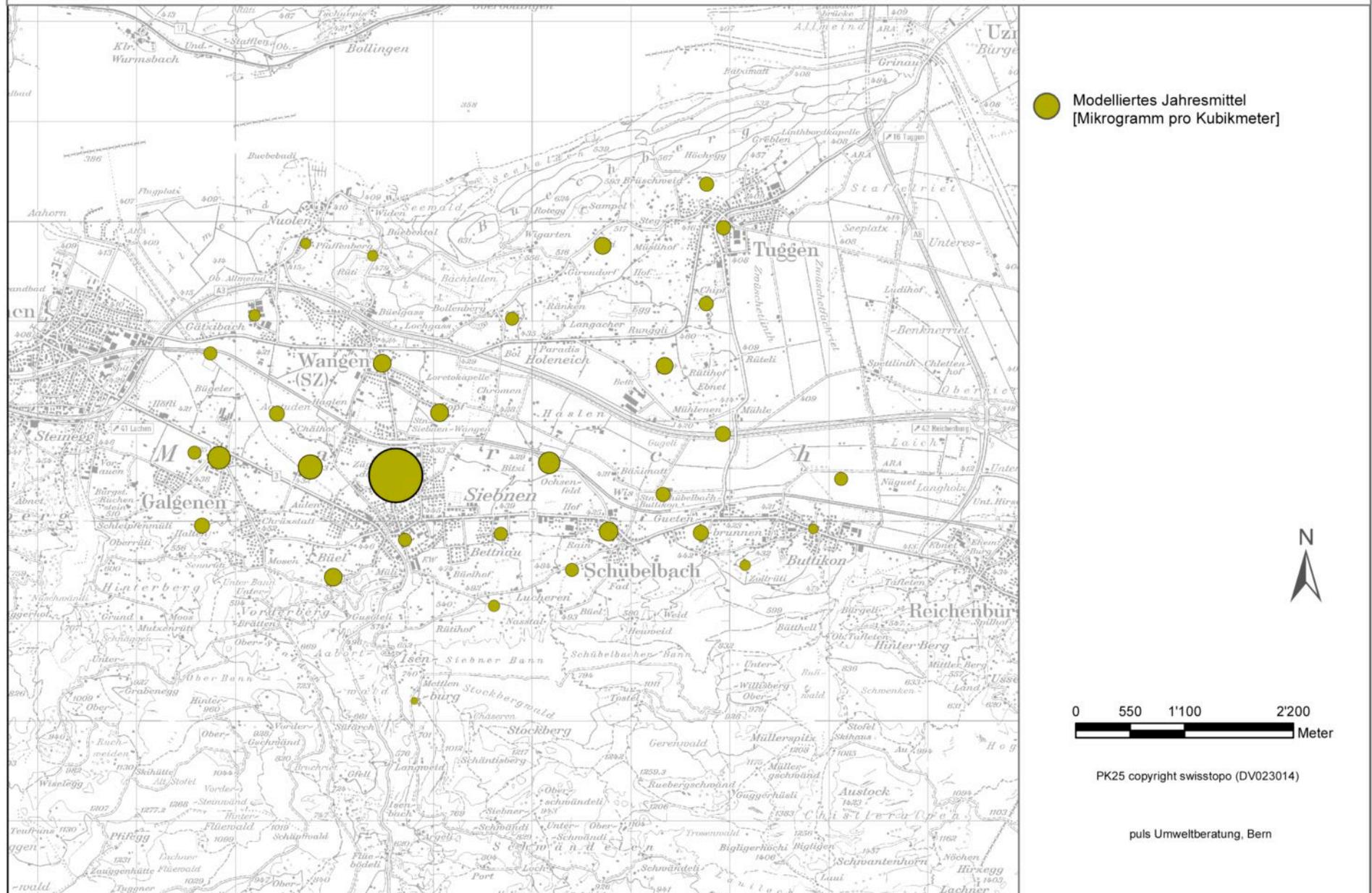


Die Berechnungen der Stickstoffbelastungen pro Baumstandort (gemittelt pro Georaum) von Meteotest Bern (Abb. 24) für das Jahr 2004 macht den Zusammenhang zwischen der Emission und Deposition von Ammoniak und der Luftgütekarten 2004 (Abb. 2) und insbesondere 2013 (Abb. 3) in der Region Ausserschwyz Ost deutlich: Die Detailberechnungen im Untersuchungsgebiet weisen für den Bereich Siebnen (kritische Gesamtbelastung in der Luftgütekarte 2013) die ebenfalls höchste Ammoniakbelastung im Untersuchungsgebiet aus (Abb. 24).

NH3-Konzentration Ausserschwyz Ost 2004

Bioindikation mit Flechten

Abb. 24



4.2 Weitere Einflüsse auf Luftgüte-Veränderungen

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

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.

Alle Erhebungen im Kanton Schwyz wurden von qualifizierten Flechtenfachleuten durchgeführt. Diese sind bereits an mehreren Flechtenuntersuchungen beteiligt gewesen und können auf eine fundierte Erfahrung zurückgreifen.

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.

4.2.2 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 Lebensbedin-

gungen 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 Ausserschwyz Ost 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 den Flechtenuntersuchungen im Fürstentum Liechtenstein 2009 beschriebene Zusammenhang zwischen Klimaänderungen (steigende Temperaturen, verminderte Niederschläge) und Flechtenrückgang konnte in Ausserschwyz Ost nicht festgestellt werden.

5. Schlussfolgerungen

Die Flechtenindikation erfasst die Gesamtbelastung der Luft in der Region Ausserschwyz Ost: 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 Schwyz ist in das Luftmessnetz in-Luft der Zentralschweizer Kantone eingebunden. In-Luft betreibt ein überregionales 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.

Trotz der getroffenen Massnahmen zur Senkung der Luftbelastung gemäss Massnahmenplan Luftreinhaltung II (ZUDK 2007) zeigt die Luftgütekarte jedoch nicht die erwartete Verbesserung der Verhältnisse gegenüber 2004 in den ehemaligen Belastungsgebieten. Vielmehr hat sich die Frequenzzahl der Flechtenarten (IAP18) auf starken Belastungswerten nivelliert, im Gebiet Siebnen findet sich heute eine kritische Gesamtbelastung.

Die Immissionen der Schadstoffe Stickstoffdioxid, Ozon und Feinstaub 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 in der Region Ausserschwyz Ost kurzfristig, d.h. im Tagesgang bzw. saisonal grossräumig überschritten (ZUDK 2007).

Die Tendenzen der Emissionen, Immissionen und der Gesamtbelastung in Ausserschwyz Ost sind in Tabelle 4 dargestellt.

Die Flechten weisen von 2004 bis 2013 eine leichte Verschlechterung der Verhältnisse aus. Die gleichbleibend hohen Belastungen durch Stickstoffoxide, Feinstaub und Ozon stellen für die Flechten eine chronische Belastung dar, welche sich offensichtlich negativ auf das Flechtenwachstum auswirkt.

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.

Tab. 4
Tendenzen von Emissionen, Immissionen und Gesamtbelastung

| Tendenz 2004 bis 2013 | |
|--------------------------|---|
| Emissionen: | |
| NO _x | ⇨ |
| PM10 | ⇨ |
| Ozon | ⇨ |
| Immissionen: | |
| NO _x | ⇨ |
| PM10 | ⇨ |
| Ozon | ⇨ |
| Ammoniak | ⇨ |
| Flechtendaten: | |
| Gesamtbelastung | ⇨ |
| Nitroindex | ⇨ |
| Acidoindex | ⇨ |

Als Grund für die Ammoniak-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 bzw. überdurchschnittliche Eutrophierung in der Zentralschweiz. Der Nitroindex scheint sich einem Maximalwert anzunähern und heute nur noch leicht zu steigen. Die kritische Gesamtbelastung in Siebnen, welche die Luftgütekarte 2013 ausweist, wird durch die Modellierungen der Stickstoffdeposition bestätigt.

Die Resultate der Flechtenauswertung in Ausserschwyz Ost zeigen ähnliche Tendenzen wie die Untersuchungen in anderen 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 Ausserschwyz Ost 2013 erweitert das biologische Messnetz von 2004 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 Luftreinhaltungs-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 kritischen Belastung zu eliminieren und die Zonen starker und mittlerer Gesamtbelastung reduziert werden sollten, die Zo-

nen der geringen Belastung sind wieder auszudehnen. Insbesondere müssen die Anstrengungen zur Reduktion der Ammoniakemissionen intensiviert werden, denn die Überdüngung der Luft und die daraus resultierende starke Eutrophierung in der ganzen Schweiz ist verantwortlich für den Rückgang vieler Arten, nicht nur von Flechten, sondern auch von Pflanzen und Tieren. Die Massnahmen, welche mit dem Teilplan Ammoniak beschlossen worden sind, müssen konsequent verfolgt und bei Bedarf erweitert werden.

Literatur

- AGB (1997): Luftqualitätsuntersuchungen mittels Bioindikation mit Flechten im Kanton Schwyz. Amt für Umweltschutz Kanton Schwyz. 35 S.
- BAFU (2009): Luftschadstoff- und Klimagas-Emissionen in der Schweiz 1990 – 2007.
- BAFU, Bundesamt für Umwelt (2009): Luftschadstoff- und Klimagas-Emissionen in der Schweiz 1990 – 2007.
- 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
- 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.
- 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.
- 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 Luzern (2007): Massnahmenplan Luftreinhaltung, Teilplan Ammoniak. Dienststelle Umwelt und Energie (uwe), Kanton Luzern, 37 S.
- LRV (1985): Luftreinhalte-Verordnung, vom 16. Dezember 1985. SR 814.318.142.1
- OSTUFT (2004): Stickstoff-Depositionen in der Ostschweiz 1994 bis 2003.
- puls (2001): Flechten als Bioindikatoren: Luftqualitätsuntersuchungen im Kantonsteil Ausserschwyz West. Amt für Umweltschutz des Kantons Schwyz.
- puls (2004): Flechten als Bioindikatoren: Luftqualitätsuntersuchungen im Kantonsteil Ausserschwyz Ost. Amt für Umweltschutz des Kantons Schwyz.
- puls (2008): Flechten und Luftqualität in der Region Innerschwyz: Wirkungskontrolle 2008. Amt für Umweltschutz des Kantons Schwyz.
- puls (2009): Flechten und Luftqualität in der Region Ausserschwyz West: Wirkungskontrolle 2009. Amt für Umweltschutz Kanton Schwyz. 41 S.
- 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.

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.

ZUDK (1999): Massnahmenplan Luftreinhaltung der Innerschweizer Kantone LU, UR, SZ, OW, NW, ZG. Hauptbericht und Kurzfassung, INFRAS/EWE. Bern.

ZUDK (2007): Zentralschweizer Massnahmenplan Luftreinhaltung II. Infraras, Zürich, 62 S.7

Anhang

Gesamtbelastung: Daten der IAP18-Bäume

In der folgenden Tabelle sind für sämtliche 165 Trägerbäume der Erhebungen 2013 untenstehende Angaben enthalten:

- Obj. 2013: Objektnummer = Nummer des Trägerbaums 2013
- Obj. 2004: Objektnummer = Nummer des Trägerbaums 2004
- K1_13: horizontale Koordinate der Schweizer Landeskarte
- K2_13: vertikale Koordinate der Schweizer Landeskarte
- Geo 2013: Nummer des Georaums 2013, dem der Trägerbaum angehört
- IAP 2013: IAP18-Wert des Trägerbaums im Jahr 2013
- IAP 2004: IAP18-Wert des Trägerbaums im Jahr 2004
- Art 2013: Baumart 2013
- 1: einheimische Linde
 - 2: ausländische Linde
 - 3: Esche
 - 4: Eiche
 - 5: Spitzahorn
 - 6: ausländ. Ahorn
 - 7: Bergahorn
 - 8: Feldahorn
 - 9: Silberahorn

Frequenzwerte der untersuchten und zum IAP18-Wert zählenden Flechtenarten:

- 1: *Bryoria fuscescens*
- 2: *Evernia prunastri*
- 3: *Pseudevernia furfuracea*
- 4: *Ramalina farinacea*
- 5: *Ramalina fastigiata*
- 6: *Ramalina fraxinea*
- 43: *Ramalina pollinaria*
- 7: *Usnea* sp.
- 8: *Anaptychia ciliaris*
- 9: *Cetrelia cetrarioides*-Gr.
- 10: *Cladonia* sp.
- 11: *Hypogymnia farinacea*
- 12: *Hypogymnia physodes*

- 13: *Hypogymnia tubulosa*
- 14: *Parmelia acetabulum*
- 15: *Parmelia caperata*
- 16: *Parmelia submontana*
- 17: *Parmelia exasperata*
- 18: *Parmelia exasperatula*
- 19: *Parmelia flaventior*
- 20: *Parmelia glabra*
- 21: *Parmelia glabratula*-Gr.
- 44: *Parmelia quercina*
- 47: *Parmelia revoluta*
- 22: *Parmelia saxatilis*
- 23: *Parmelia subargentifera*
- 24: *Parmelia subrudecta*
- 25: *Parmelia sulcata*
- 26: *Parmelia tiliacea*
- 46: *Parmeliopsis ambigua*
- 27: *Parmeliopsis hyperopta*
- 28: *Physcia aipolia*-Gr.
- 29: *Physcia adscendens*
- 48: *Physcia caesia*
- 30: *Phaeophyscia orbicularis*-Gr.
- 31: *Physconia perisidiosa*
- 49: *Physconia enteroxantha*
- 32: *Physconia grisea*
- 33: *Physconia distorta*
- 34: *Xanthoria fallax*-Gr.
- 35: *Xanthoria parietina*
- 36: *Xanthoria polycarpa*
- 37: *Graphis scripta*
- 38: *Lecanora carpinea*-Gr.
- 39: *Lecanora argentata*-Gr.
- 45: *Normandina pulchella*
- 40: *Pertusaria albescens*
- 41: *Pertusaria amara*
- 42: *Phlyctis argena*-Gr.

