



Flechten und Luftqualität im Kanton Zug: Wirkungskontrolle 2013

im Auftrag des Kantons Zug
Amt für Umweltschutz

18. März 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 | 5 |
| 1.1 Flechten als Bioindikatoren..... | 5 |
| 1.2 Bisherige Untersuchungen..... | 5 |
| 1.3 Untersuchung 2013 | 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 2013 | 10 |
| 3.2 Veränderung der Luftgüte | 11 |
| 3.2.1 Luftgütekarte 1993..... | 11 |
| 3.2.2 Luftgütekarte 2003..... | 12 |
| 3.2.3 Luftgütekarte 2013..... | 12 |
| 3.2.4 Flächenanteile der einzelnen Zonen | 12 |
| 3.3 Differenzkarten von 1993 bis 2013..... | 17 |
| 3.3.1 Differenzkarte 1993 - 2013 | 17 |
| 3.3.2 Differenzkarte 1993 - 2003 | 18 |
| 3.3.3 Differenzkarte 2003 - 2013 | 18 |
| 3.4 Veränderung des Luftgütwerts IAP18 | 22 |
| 3.4.1 Luftgüte 1993, 2003 und 2013 pro Georaum | 22 |
| 3.4.2 Luftgütwerte im Vergleich | 22 |
| 3.5 Acidoindex | 23 |
| 3.5.1 Acidoindex 1993 | 24 |
| 3.5.2 Acidoindex 2003 | 24 |
| 3.5.3 Acidoindex 2013 | 24 |
| 3.5.4 Veränderung des Acidoindexes von 1993 bis 2013 | 24 |
| 3.6 Nitroindex..... | 30 |
| 3.6.1 Nitroindex 1993 | 31 |
| 3.6.2 Nitroindex 2003 | 31 |
| 3.6.3 Nitroindex 2013 | 31 |
| 3.6.4 Veränderung des Nitroindexes 1993 bis 2013 | 31 |
| 3.7 Flechtendiversität..... | 38 |
| 3.8 Entropie | 39 |

| | |
|------------------------------------|-----------|
| 4. DISKUSSION | 40 |
| 4.1 Luftqualität | 40 |
| 4.1.1 Emissionsentwicklung | 40 |
| 4.1.2 Immissionsmessungen | 41 |
| 5. SCHLUSSFOLGERUNGEN | 53 |
| LITERATUR | 56 |
| ANHANG | 58 |

Impressum

Auftraggeber: Amt für Umweltschutz Kanton Zug,
Aabachstrasse 5, 6300 Zug,
begleitet durch Astrid Furrer, Abteilung Luft

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

in Zusammenarbeit mit:

Kathrin Peter, Evaluationen, 3011 Bern

Kartierung: Martin Urech, Nora Rychen, Kathrin Peter

Zitievorschlag:

puls 2014: Flechten und Luftqualität im Kanton Zug: Wirkungskontrolle 2013.
Amt für Umweltschutz Kanton Zug. 64 S.

Zusammenfassung

Mit Hilfe der Flechtenindikationsmethode wurde im Kanton Zug 1993, 2003 und 2013 die Luftqualität analysiert. Die vorliegende Untersuchung hat die Erhebungen von 1993 und 2003 wiederholt. Sie erfasst die Veränderung der letzten 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 Luftschaadstoffe. Je stärker die Gesamtbelaastung der Luft ist, desto weniger Flechten können überleben.

Flechten zeigen ein Gesamtbild der Luftbelastung, welches auf Pflanzen, Tiere und den Menschen wirkt. Die Erhebung des Flechtenbewuchses gibt daher nicht über Konzentrationen einzelner Schadstoffe, sondern über die Gesamtwirkung von Luftschaadstoffen 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 etwa die Stickstoffversorgung oder die Belastung durch Säuren und Basen zu.

Luftgüte 1993

1993 sind einige Gebiete nur gering oder sogar sehr gering belastet. Diese finden sich besonders im Raum Unterägeri, auf dem Zugerberg sowie im weiteren Umland von Baar, Steinhausen und Hünenberg.

Gebiete mit kritischer Luftbelastung weisen die Flechten in den Siedlungszentren Rotkreuz und Zug und einigen isolierten Kleinflächen aus. Stark ist die Luft in einem zusammenhängenden Band von Rotkreuz über Hünenberg-Zollhus-Chamau nach Cham-Steinhausen, kleinflächig im Siedlungsgebiet von Baar und ausgedehnt im Siedlungsgebiet von Zug belastet. Die Zone der mittleren Gesamtbelaastung besitzt 1993 den grössten Flächenanteil im Untersuchungsgebiet.

Luftgüte 2003

Gebiete mit kritischer Luftbelastung sind 2003 verschwunden. Sehr geringe Belastungen finden sich nur noch in Unterägeri, geringe Belastungen ebenfalls dort sowie kleinflächig im übrigen Untersuchungsgebiet. Gebiete mit starker Luftbelastung erstrecken sich von Rotkreuz nach Zollhus, Hünenberg und Cham bis ins Industriegebiet Steinhausen sowie über die Kernzonen von Zug und Baar. Die Zone der mittleren Gesamtbelaastung besitzt 2003 wie schon 1993 den grössten Flächenanteil.

Luftgüte 2013

2013 ist das Untersuchungsgebiet geprägt von starker und mittlerer Gesamtluftbelastung. Die Zone der starken Belastung besitzt nun den deutlich grössten Flächenanteil und findet sich flächendeckend von Rotkreuz

bis Zollhus, südlich von Hünenberg nach Cham und von Steinhausen nach Baar und Zug. In dieser östlichen Zone der starken Belastung finden sich Inseln mit mittlerer Belastung. Geringe Belastungen sind noch in St. Wolfgang, Hochwacht-Juchenegg und in der Siedlungsperipherie von Unterägeri auszumachen. Sehr geringe Belastungen treten immer noch westlich von Unterägeri und neuerdings wieder auf dem Zugerberg auf.

Veränderung der Luftgüte 1993 bis 2013

Im Untersuchungszeitraum haben sich lokal zwar Verbesserungen ergeben, die Gesamtbelastung hat sich jedoch nicht verringert, sondern tendenziell verstärkt. Vorher wenig belastete Gebiete haben zumeist eine Verschlechterung erfahren und vormals mittel bis stark belastete Gebiete weisen heute eine noch grösere Belastung auf.

Acidoindex (Säure- und Basenverträglichkeit)

1993 zeigen sich noch einige Georäume mit saurer Prägung, 2003 ist das gesamte Untersuchungsgebiet jedoch bereits basisch geprägt. 2013 haben die sauren Immissionen weiter abgenommen, die basische Prägung hat sich im Untersuchungsgebiet nochmals verstärkt.

Nitroindex (Stickstoff-Empfindlichkeit resp. -Verträglichkeit)

Das Untersuchungsgebiet weist bereits 1993 eine gesamthaft stickstoffreiche Immission auf. 2003 hat sich die Stickstoffbelastung weiter verstärkt. Die Verhältnisse von 2003 liegen auch 2013 noch als Gesamtbild vor. Lokal ist die Stickstoffbelastung etwas zurückgegangen. Nach wie vor sind aber sämtliche Gebiete stickstoffreich.

Flechtendiversität

In den Jahren 1993, 2003 und 2013 konnten jeweils ähnlich viele Flechtenarten festgestellt werden. Während der letzten zwanzig Jahren hat die Häufigkeit, mit der die einzelnen Arten auftreten, jedoch überwiegend abgenommen. Davon sind sowohl säureliebende Arten als auch stickstofftolerante Arten betroffen.

Entropie

Die Entropie ist ein weiteres Mass für die Flechtendiversität, das aus der Biodiversitätstheorie stammt (Shannon-Index). Berechnet wurde die mittlere Entropie für die Jahre 1993, 2003 und 2013. Als ökologisches Potenzial (Referenzwert) im Kanton Zug wurde der maximale Wert des Jahres 1993 herangezogen (100 %). Die Flechtendiversität ist von 1993 (63.5 % des Maximalwerts) über 2003 (60.5 %) zu 2013 (56.9 %) kontinuierlich gesunken.

Diskussion

Die Flechtenkartierung zeigt eine gesamthafte Verschlechterung der Luftqualität von 1993 bis 2013. Die Flächen von Zonen mit hohen Belastungen (stark-mittel) haben auf Kosten der geringen und sehr geringen Belastung zugenommen. Die Luftgütwerte scheinen sich in einer starken Gesamtbelastung zu nivellieren. Der Nitroindex zeigt, dass die Eutrophierung der Luft seit 2003 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 technischen Immissionsmessungen und der Nitroindex weisen auf eine Nivellierung respektive auf eine weiterhin leichte Zunahme der Eutrophierung hin.

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, Feinstaub und Ozon treten schweizweit wie auch im Kanton Zug auf.

Die Schadstoffkarte des BAFU zeigt für 2007 in den Grossräumen Zentralschweiz 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 festgelegten Grenzwerten von $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Ammoniak für höhere Pflanzen und massiv über dem Grenzwert für Flechten von $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ Ammoniak.

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 verschiedenen Massnahmen zur Senkung der Luftbelastung zeigt die Flechten-Luftgütekarte 2013 keine Verbesserung, sondern eine gesamthafte Verschlechterung der Verhältnisse von 1993 und 2003. 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.

Ein Faktor für die anhaltend hohe flächige Gesamtluftbelastung ist möglicherweise die überdurchschnittliche Zunahme der Siedlungsfläche im Kanton Zug während der letzten Jahrzehnte.

Der hohe Nitroindex der Flechtenauswertungen bestätigt die nach wie vor starke Eutrophierung im Kanton Zug. 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. Besonders betroffen davon sind ökologisch wertvolle Gebiete wie zum Beispiel Moore im Kanton Zug.

1. Einleitung

1.1 Flechten als Bioindikatoren

Baumbewohnende Flechten sind Zeiger der Luftverschmutzung, denn sie sind empfindlich gegenüber Luftschatdstoffen. 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 häufige 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 Flechten-indikationsmethode (siehe Kap. 3.1.2) bietet die Möglichkeit, die Gesamt-Luftbelastung flächendeckend abzubilden.

1.2 Bisherige Untersuchungen

Der Kanton Zug hat eine langjährige Erfahrung mit Flechten als Bioindikatoren zur Beurteilung der Luftbelastung im Kanton. Mit den zwei bisherigen Untersuchungen 1993 und 2003 konnten 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 nach zehn Jahren erneut anhand einer weiteren Erhebung erfasst werden.

Ein verstärktes Augenmerk gilt heute der Ammoniakbelastung. Die Bioindikation mit Flechten bietet hier 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 Acidointdex, welche seit einigen Jahren routinemässig in den Flechtenuntersuchungen erhoben werden. Von Interesse ist insbesondere der Nitroindex, welcher Hinweise auf die Ammoniakbelastung und damit auf die Stickstoffeinträge liefert.

1.3 Untersuchung 2013

Die vorliegende Untersuchung wiederholt die Flechtenerhebungen im Kanton Zug, so dass die Entwicklung seit 1993 räumlich und zeitlich aufgezeigt werden kann. Die Erhebung 2013 und die Analyse sind nach derselben Methode wie die Untersuchung von 2003 erfolgt, wodurch die Resultate direkt vergleichbar werden.

1.4 Wirkungskontrolle

Wiederholungsuntersuchungen 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 1993 und 2003 soll eine erneute Untersuchung der Flechtenvegetation im Kanton Zug die aktuelle Luftqualität und deren Veränderung in den letzten zwanzig Jahren ermitteln. Folgende Teilziele sollen die Wirkungsweise der durchgeführten lufthygienischen Massnahmen im Kanton Zug aufzeigen:

- Die Flechtenkartierungen von 1993 und 2003 sollen wiederholt werden. Die Daten werden analog zu den früheren Untersuchungen erhoben und ausgewertet.
- Der jetzige Zustand der Luftqualität soll analysiert und interpretiert werden. Die Luftbelastung 2013 wird mit Flechten als Bioindikatoren räumlich differenziert erfasst und in Form einer Luftgütekarte dargestellt.
- Die Entwicklung der Luftqualität seit 1993 soll erfasst und interpretiert werden. Die Veränderung der Immissionssituation wird in Form von Differenzkarten abgebildet.
- Der Vergleich zwischen Flechtenkarten und technischen Emissions- und Immissionsdaten soll zur Interpretation der biologischen Ergebnisse beitragen.
- Durch die Auswertung der vorkommenden Flechtenarten sollen zusätzliche Aussagen wie beispielsweise über den Säuregrad der Immissionen (Acidoindex), über die Nährstoffversorgung (Nitroindex) und über die Biodiversität gewonnen werden.
- Die Untersuchungsergebnisse sollen so dokumentiert sein, dass weitere Wiederholungsuntersuchungen in späteren Jahren möglich sind.
- Die Flechtenerhebung soll die Luftbelastung sichtbar und erfahrbar machen. Sie dient als Grundlage für die Information von Behörden und Öffentlichkeit über den Fortschritt der Luftreinhaltung im Kanton Zug.

3. Gesamtbelastung

3.1 Methode

3.1.1 Lebewesen Flechte

Flechten sind so unscheinbar, dass wir sie kaum wahrnehmen oder einfach als zur Unterlage gehörend 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 umfliekt die Alge und bildet das Stützgewebe, das für die jeweilige Flechtenart formgebend ist. Die Alge baut sich mit Hilfe von Sonnenenergie aus Wasser und Kohlendioxid CO_2 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, dem Nebel und dem Schnee. Schädliche sowie 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 Flechtenindexes IAP18 (Index of Atmospheric Purity)¹ 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). 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

¹ Der IAP18 wird im Schweizer Mittelland angewendet. Im benachbarten 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.

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 Stammfläche angebracht, dass 10 gleich grosse Felder entstehen.



3.1.3 Flechtenuntersuchung 2013

Die Flechtenerhebung 2013 wurde analog zur Untersuchung 2003 durchgeführt. In den Gebieten von Rotkreuz, Hünenberg, Cham, Steinhausen, Baar und Zug sowie in Unterägeri wurden die Flechtendaten auf einer Fläche von rund 49 km^2 erhoben. Die Luftgüte 2013 wurde ausserdem nördlich von Menzingen und auf dem Raten als Referenzpunkte ermittelt.

Der Flechten-Luftgütwert IAP18 wurde nach Möglichkeit an den selben Bäumen wie 2003 mit der identischen Methode ermittelt. Von den 268 im Jahr 2003 kartierten Bäumen mussten 109 (40 %) 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 Georaum darf dort mit derselben Wirkung der Gesamtluftbelastung auf die Flechten gerechnet werden. Für das untersuchte Gebiet ergaben sich 59 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 erfreulicherweise 2013 in keinem Teil des Untersuchungsgebiets, während sie 1993 noch im Kerngebiet der Stadt Zug und in kleinen Gebieten zwischen Hünenberg und Rotkreuz festgestellt worden war. 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 | 18.7 bis 31.7 | orange |
| äußere Kampfzone | mittel | 31.8 bis 44.8 | gelb |
| Übergangszone | gering | 44.9 bis 57.8 | grün |
| Normalzone | sehr gering | grösser als 57.8 | 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 2013 entspricht der Grenze von 2003, ergänzt mit Teilen des Zugerbergs.

3.2.1 Luftgütekarte 1993

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

In der Umgebung von Unterägeri, Richtung Höf, ist die Gesamtluftbelastung sehr gering. Unterägeri selbst ist hauptsächlich gering belastet, im Siedlungskern tritt kleinflächig eine Zone der mittleren Belastung auf. Weitere Gebiete mit sehr geringer Luftbelastung finden sich auf dem Zugerberg und im Bereich Geissbüel (Baar). Gering belastet sind neben Unterägeri die Gebiete Walishof (Obergrüt), St. Michael-St. Verena-Lüssirain-Steren, das Umland von Baar bis Inwil und Letzi (Lorzen), die Gebiete Markstein (Steinhausen) sowie St. Wolfgang und Meisterswil (Hünenberg).

Gebiete mit kritischer Luftbelastung weisen die Flechten in den Siedlungszentren Rotkreuz und Zug sowie isoliert bei Sonneguet-ARA (Hünenberg) und nördlich von Berchtwil aus. Stark ist die Luft im Umfeld der kritischen Zonen belastet: in einem zusammenhängenden Band von Rotkreuz über Hünenberg-Zollhus-Chamau nach Cham-Steinhausen, kleinflächig im Siedlungsgebiet von Baar und ausgedehnt im Siedlungsgebiet von Zug. In den übrigen Gebieten besteht grossflächig eine mitt-

lere Gesamtbelastung der Luft. Diese Zone besitzt 1993 den grössten Flächenanteil im Untersuchungsgebiet (35 %).

3.2.2 Luftgütekarte 2003

Die Karte weist für das Untersuchungsgebiet vier Flechtenzonen aus (Abb. 4), die Gesamtbelastung reicht von sehr gering bis stark.

Gebiete mit kritischer Luftbelastung sind 2003 verschwunden. Sehr geringe Belastungen finden sich nur noch in Unterägeri, geringe Belastungen ebenfalls dort sowie kleinflächig zwischen Urihof und Steren, Schochenmühl-Letzi und Rainmatt-Wart. Gebiete mit starker Luftbelastung erstrecken sich von Rotkreuz der Reuss entlang nach Zollhus, über Hünenberg nach Cham-Lindenham bis ins Industriegebiet Steinhausen, in Nord-Süd-Richtung über die Kernzonen von Zug und Baar sowie im separat betrachteten Raum Frauental. In den übrigen Gebieten besteht grossflächig eine mittlere Gesamtbelastung der Luft. Diese Zone besitzt 2003 wie schon 1993 den grössten Flächenanteil im Untersuchungsgebiet, der Anteil ist jedoch nochmals gestiegen (auf 55 %).

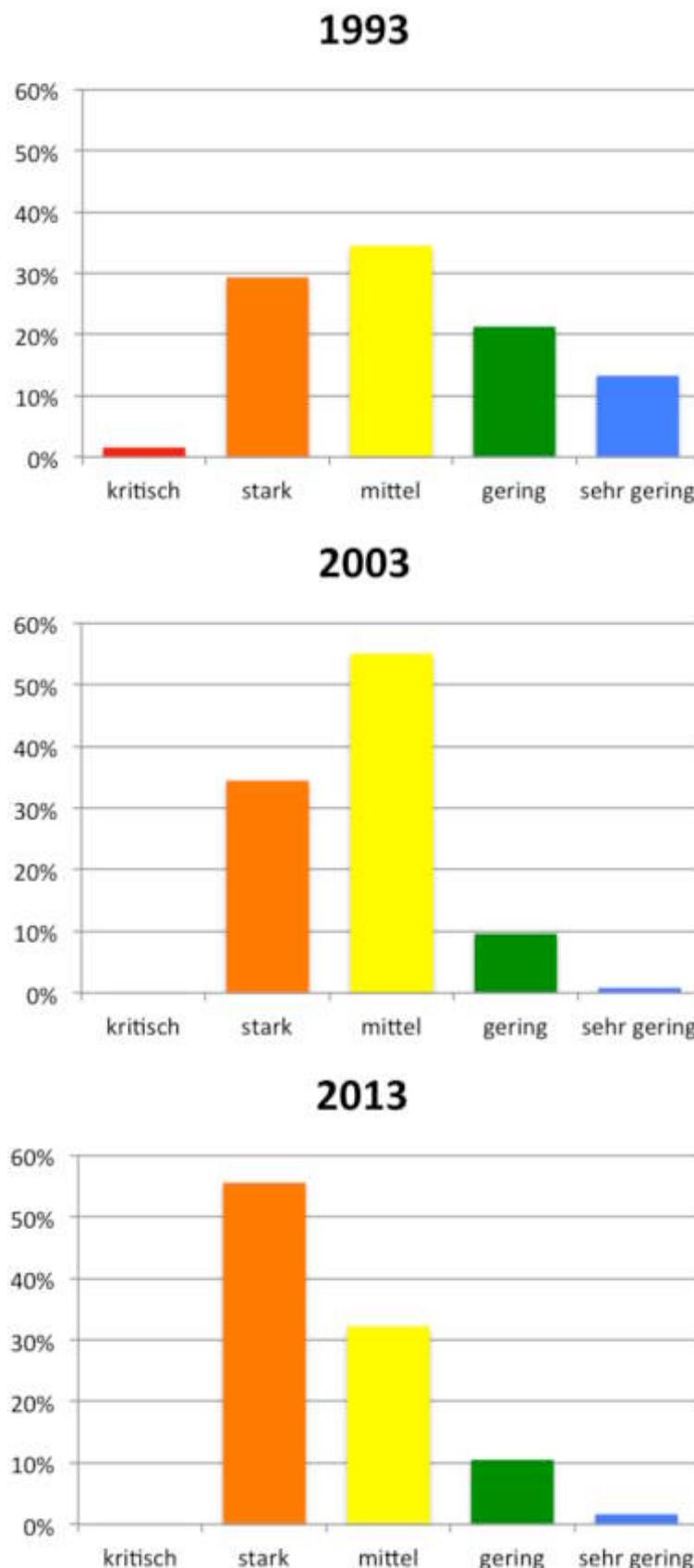
3.2.3 Luftgütekarte 2013

2013 ist das Untersuchungsgebiet geprägt von starker und mittlerer Gesamtluftbelastung (Abb. 5). Die Zone der starken Belastung besitzt nun den deutlich grössten Flächenanteil (56 %) und findet sich flächendeckend von Rotkreuz entlang der Reuss bis Zollhus, am südlichen Rand von Hünenberg und entlang des Zugersees nach Cham sowie von Steinhausen nach Baar und nach Zug. In dieser östlichen Zone der starken Belastung finden sich Inseln mit mittlerer Belastung von Inwil bis Urihof-Sennhütte, über dem Stadion von Zug und am nordöstlichen Rand von Steinhausen. Geringe Belastungen sind noch in St. Wolfgang, Hochwacht-Juchenegg und in der Siedlungsperipherie von Unterägeri auszumachen. Sehr geringe Belastungen treten immer noch westlich von Unterägeri und neuerdings wieder auf dem Zugerberg auf. Die übrigen Gebiete liegen heute in der Zone mittlerer Belastung, ebenfalls das separat betrachtete Gebiet Frauental.

3.2.4 Flächenanteile der einzelnen Zonen

Abbildung 2 stellt die Flächenanteile der verschiedenen Belastungszonen für die Jahre 1993, 2003 und 2013 in Prozent zur Gesamtfläche dar: Die Flächen von Zonen mit hohen Belastungen (mittel-stark) haben auf Kosten der geringen und sehr geringen Belastung zugenommen. Die Luftgütwerte scheinen sich in einer starken Gesamtbelastung zu nivellieren.

Abb. 2:
Verteilung der Flächenanteile einzelner Belastungszonen in Prozent



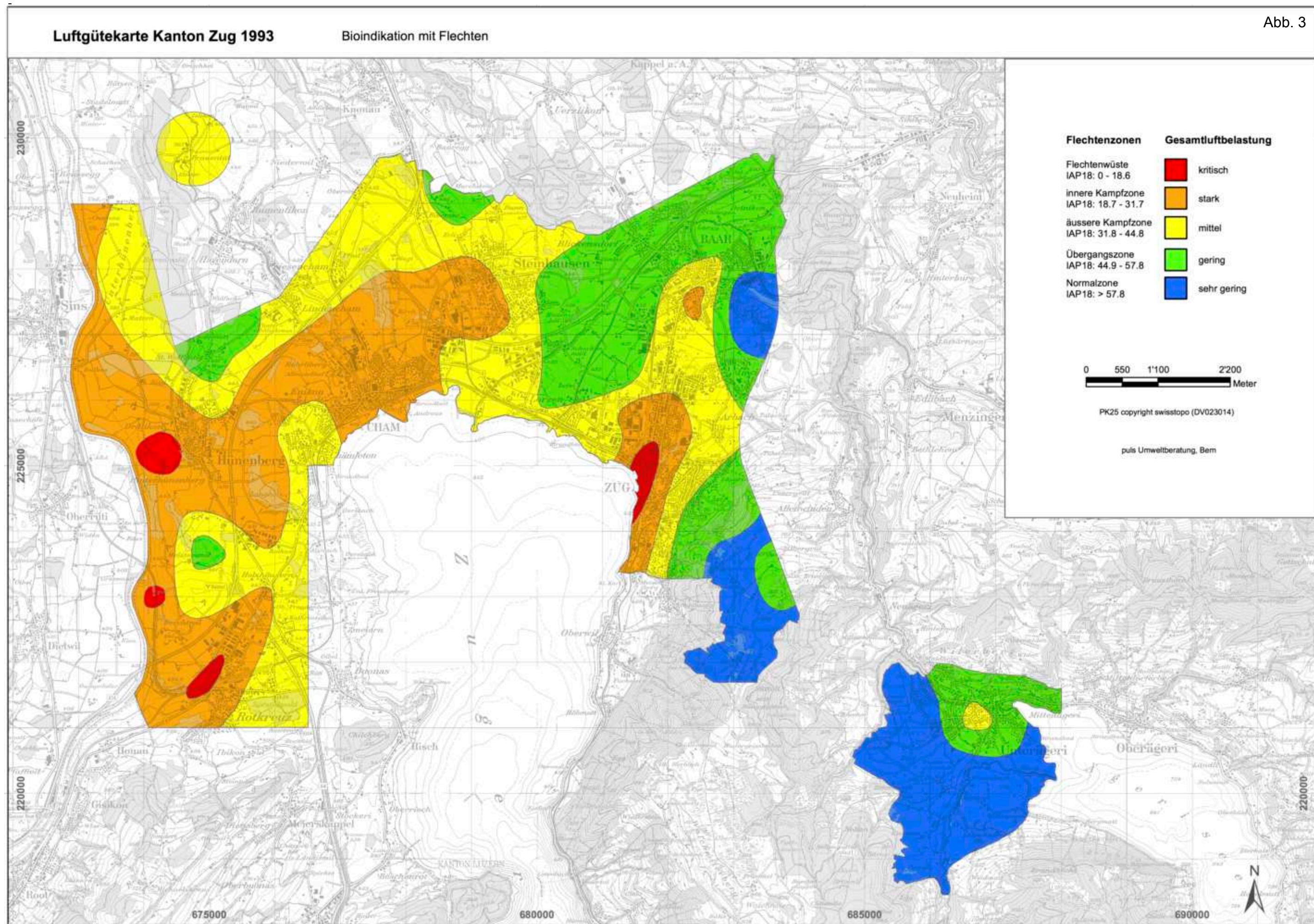


Abb. 3

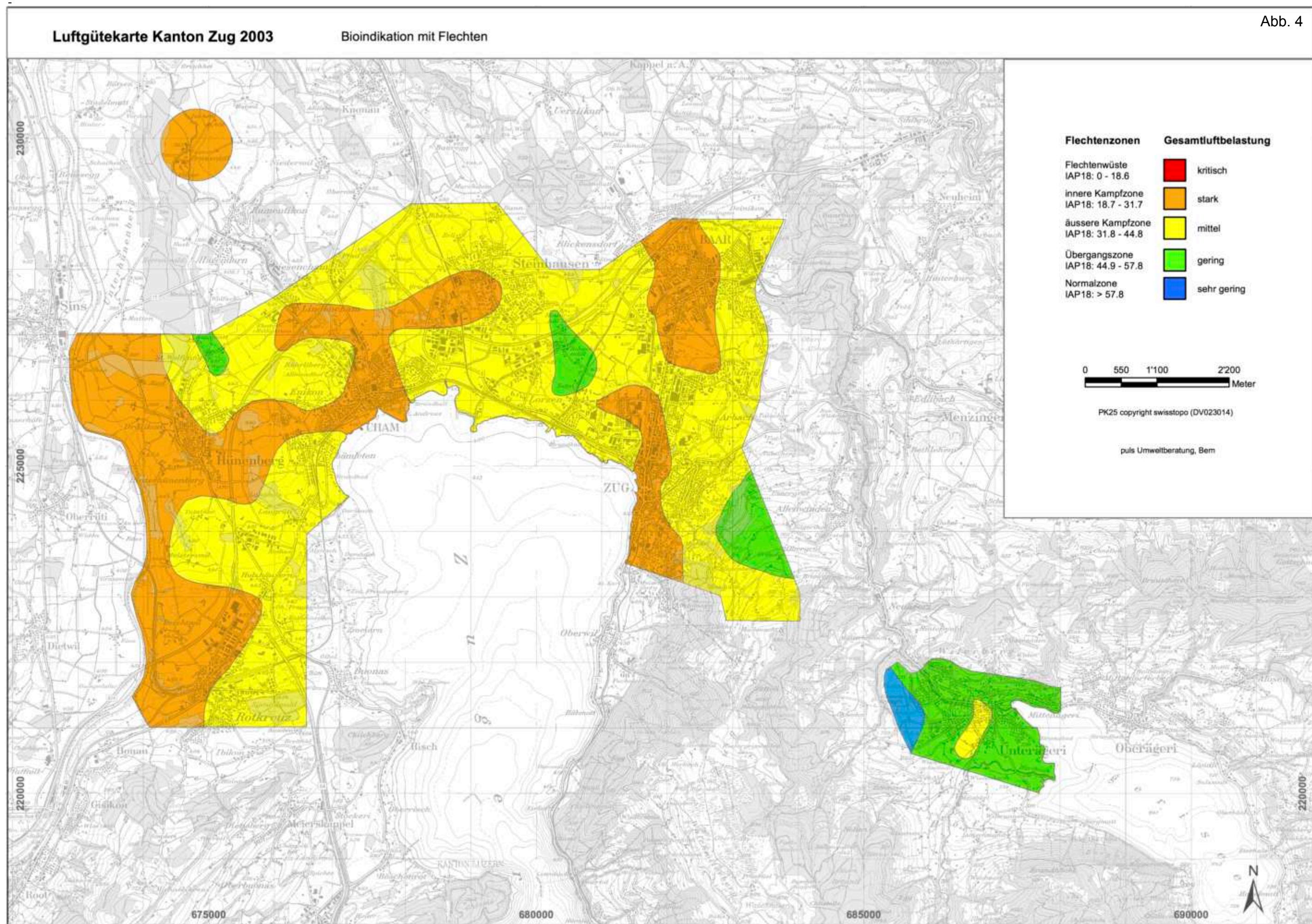
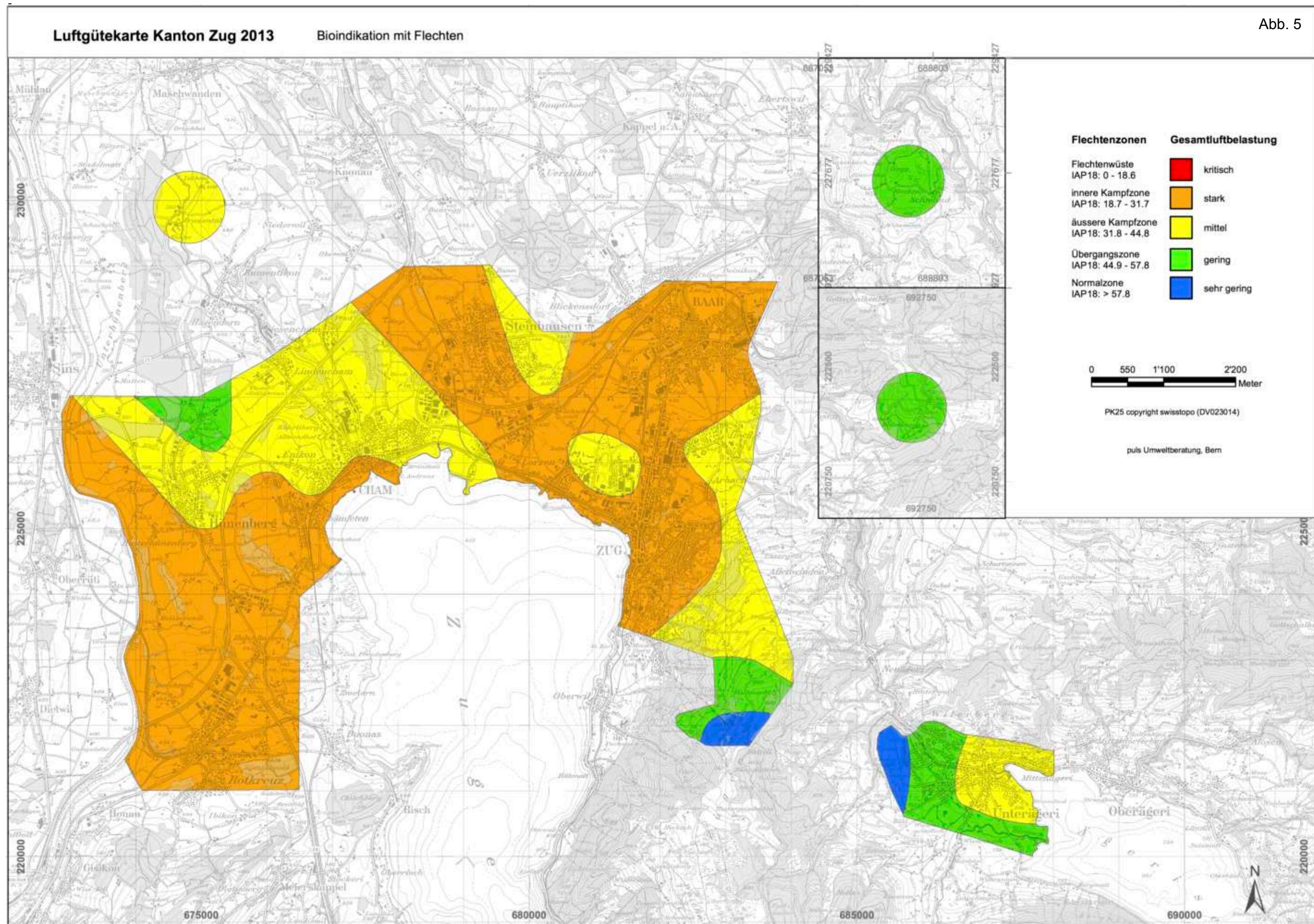


Abb. 4



3.3 Differenzkarten von 1993 bis 2013

Die folgenden Karten stellen die Differenz zwischen den Luftgütewerten von 1993 bis 2013 (Abb. 6) sowie den beiden Teilperioden 1993 bis 2003 (Abb. 7a) und 2003 bis 2013 (Abb. 7b). Sie visualisieren 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 Luftgütezonen und umfasst rund 6.6 IAP18-Punkte. Folgende Differenzzonen werden gebildet:

Tab. 2:
Zoneneinteilung
der Belastungs-
veränderung

| Veränderung | IAP18-Differenz | Farbe |
|-------------------------------|-------------------|---------------|
| sehr starke Verbesserung | grösser als 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 |
| sehr starke Verschlechterung | kleiner als -16.3 | dunkelviolett |

3.3.1 Differenzkarte 1993 - 2013

In den letzten zwanzig Jahren haben sich im Untersuchungsgebiet Verbesserungen, aber auch sehr starke Verschlechterungen ergeben.

Verbessert hat sich die Situation im Grossraum Cham und Hünenberg, westlich von Hünenberg sogar stark. Weitere Verbesserungen sind im Gebiet Berchtwil Richtung Honau und im Kerngebiet von Zug festzustellen. Verschlechtert haben sich die Verhältnisse hingegen im Raum Talaucher-Meisterswil, von Rotkreuz östlich von Holzhäusern nach Chämleten, von Bibersee über Steinhausen südlich zum Zugerseeufer, in einem schmalen Band um das Siedlungsgebiet Zug sowie von Schönwart über das südöstliche Unterägeri nach Rain-Zimmel. Von einer starken Verschlechterung betroffen sind Mittenägeri und das Gebiet um den Wissenbach-Hüribach in Unterägeri, ein mäandrierendes Band vom Gebiet Hochwacht über Urihof-Lüssirain und das östliche Zuger Siedlungsgebiet nach Arbach, über Inwil, Feld, Lorzen nach Steinhausen-Bann sowie vom Sijentalwald Rotkreuz nach Ober Freudenberg. Im Grossraum Baar-Schochenmühl-Iwil und im Gebiet St. Verena-Sennhütte sind die Verschlechterungen sogar sehr stark. In den übrigen Gebieten hat keine wesentliche Veränderung stattgefunden.

Die starken Verschlechterungen ergeben sich damit fast ausschliesslich in Gebieten, welche 1993 noch gering belastet waren.

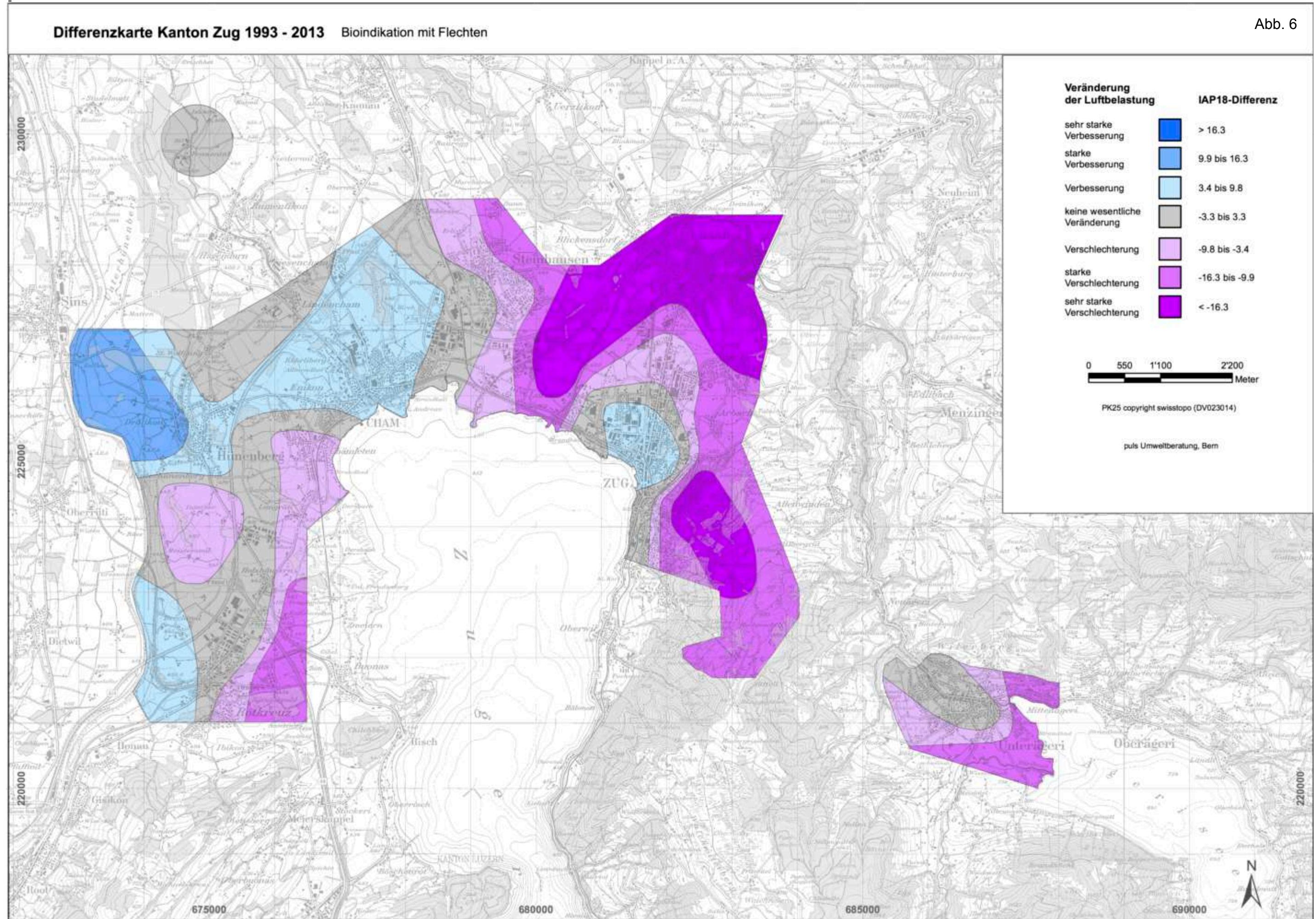
3.3.2 Differenzkarte 1993 - 2003

Zwischen 1993 und 2003 ergibt sich ein ähnliches Bild wie über die gesamte Periode von 1993 bis 2013: Starke Verschlechterungen sind in Gebieten mit ehemals geringer Belastung festzustellen, Verbesserungen in Gebieten, welche 1993 bereits stark belastet waren. Augenfällig sind die starke Verbesserung im Zentrum von Zug und die starken Verschlechterungen in den (ehemaligen) Gunstzonen von Baar, oberhalb von Zug und in Unterägeri.

3.3.3 Differenzkarte 2003 - 2013

Zwischen 2003 und 2013 hat sich die Gesamtluftbelastung im Raum Frauental und nördlich von Cham Richtung Wiesencham sowie im Raum Hünenberg-Drälikon verbessert. Die Gebiete mit Verbesserungen sind umgeben von Zonen ohne wesentliche Veränderung; diese erstrecken sich von Cham nord- und südwestlich von Hünenberg nach Zollhus und im Süden Richtung Berchtwil, über das Siedlungsgebiet von Zug nach Inwil, südlich im Gebiet Blasenberg-Sennhütte und im Umland von Unterägeri.

Verschlechterungen finden sich im südwestlichen Zipfel von Cham südlich von Hünenberg nach Holzhäusern und Rotkreuz, von Baar übers südliche Steinhausen nach Blegi und Lorzen sowie nördlich von Zug, von Arbach südwestlich Richtung Zugersee und anschliessend südöstlich Richtung Obere Brunegg sowie von Mittenägeri dem Seeufer entlang zur Mündung des Hüribachs. Stark verschlechtert hat sich die Situation im Raum Lüssirain-Steren-St. Verena-Urihof, vom südlichen Siedlungsgebiet in Baar nach Schochenmüli-Hinterhöf, im nördlichen Teil von Steinhausen nach Bibersee und von Rotkreuz am östlichen Rand des Untersuchungsgebiets bis unterhalb des Strandbads Chämleten. Insgesamt hat sich die Luftbelastung primär in vorher wenig belastete Gebieten weiter verschlechtert, in bereits vorher stark belasteten Gebieten stagniert die Immissionsbelastung auf hohem Niveau.



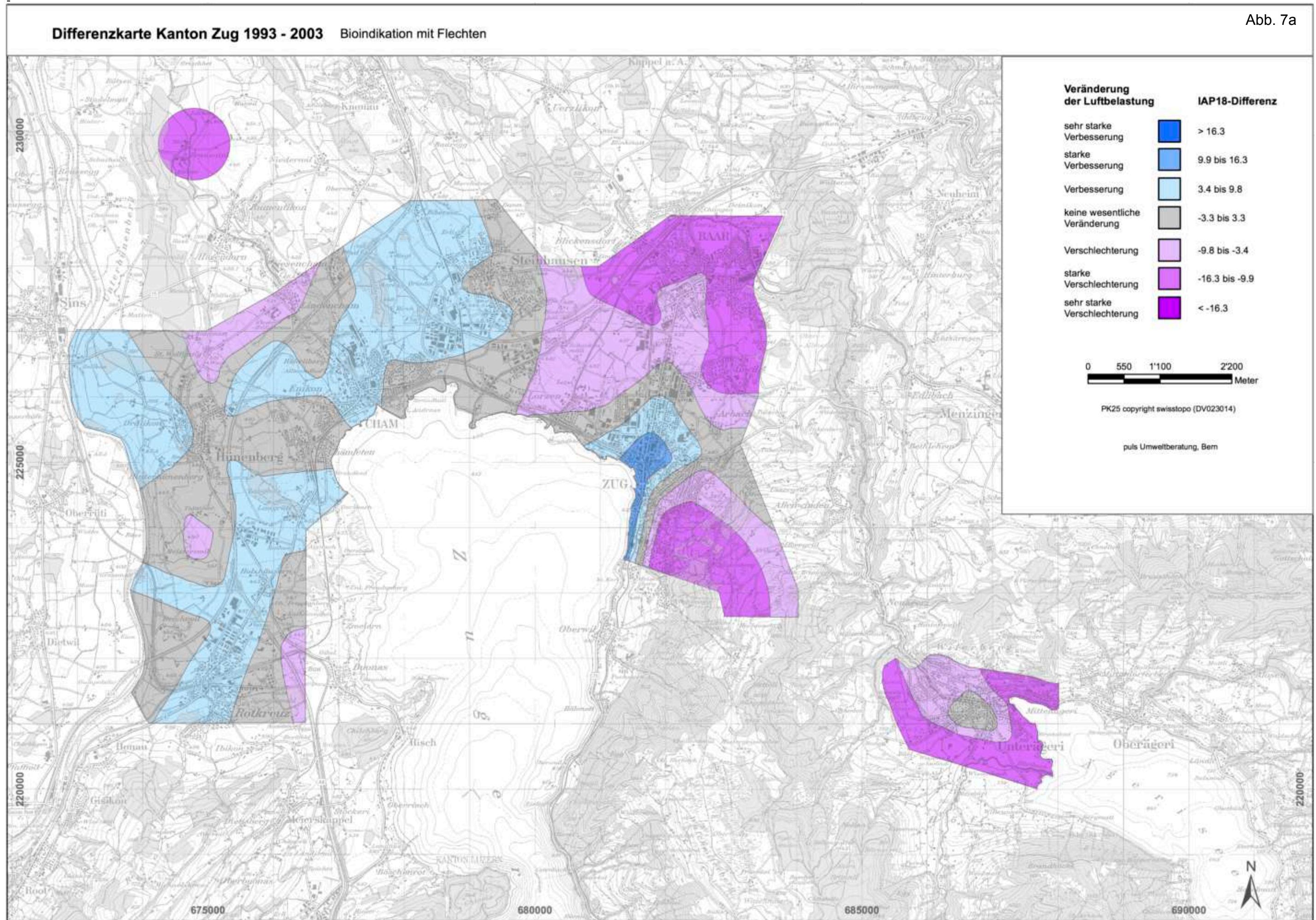


Abb. 7a

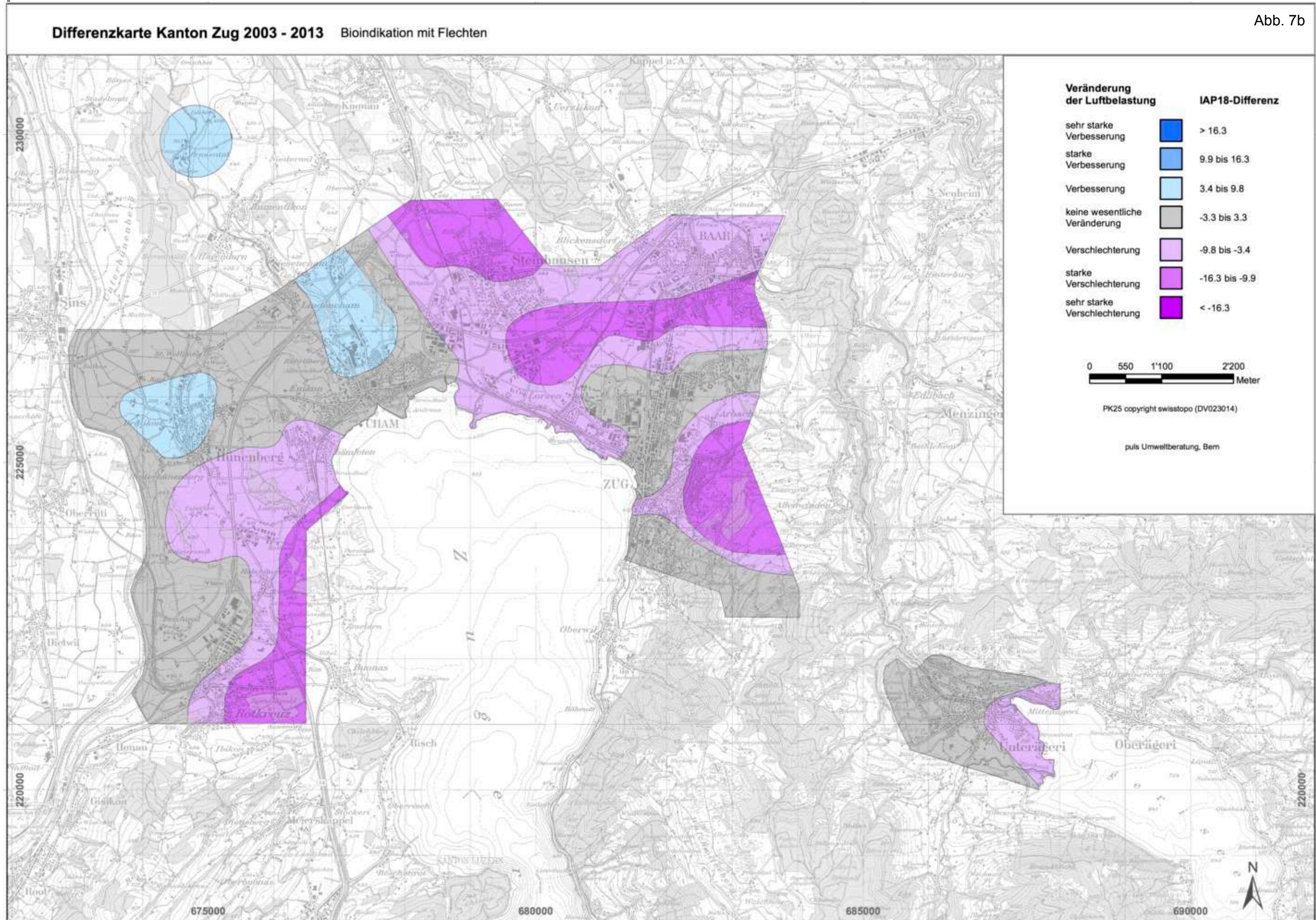


Abb. 7b

3.4 Veränderung des Luftgütewerts IAP18

3.4.1 Luftgüte 1993, 2003 und 2013 pro Georaum

Abb. 8:
IAP-Werte pro Georaum
(nur identische Georäume 1993, 2003 und 2013)

Im Boxplot sind folgende Perzentile dargestellt:

- 50er P.: Mittellinie (= Median)
- 25er und 75er P.: Box
- 10er und 90er P.: Linie
- Ausreißer: Punkte

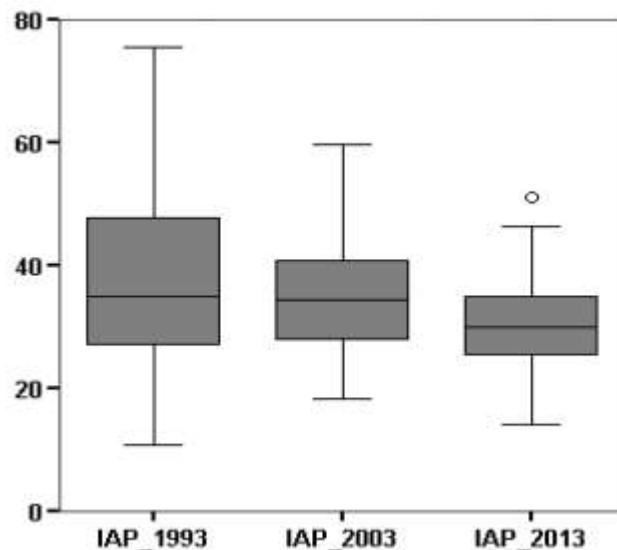


Abbildung 8 stellt für 1993, 2003 und 2013 die IAP-Werte der identischen Georäume dar. Das breiteste Wertespektrum findet sich 1993. Im Jahr 2003 ist der IAP-Median (Mittellinie) ungefähr gleich hoch wie 1993, die Bandbreite (Box und Linien) hingegen deutlich kleiner. 2013 hat die Bandbreite noch einmal abgenommen. 2013 ist der IAP-Median tiefer als in den vorangehenden Untersuchungen.

3.4.2 Luftgütwerte im Vergleich

Abb. 9:
Vergleich der IAP-Werte von 1993 mit der Veränderung zwischen 1993 und 2013

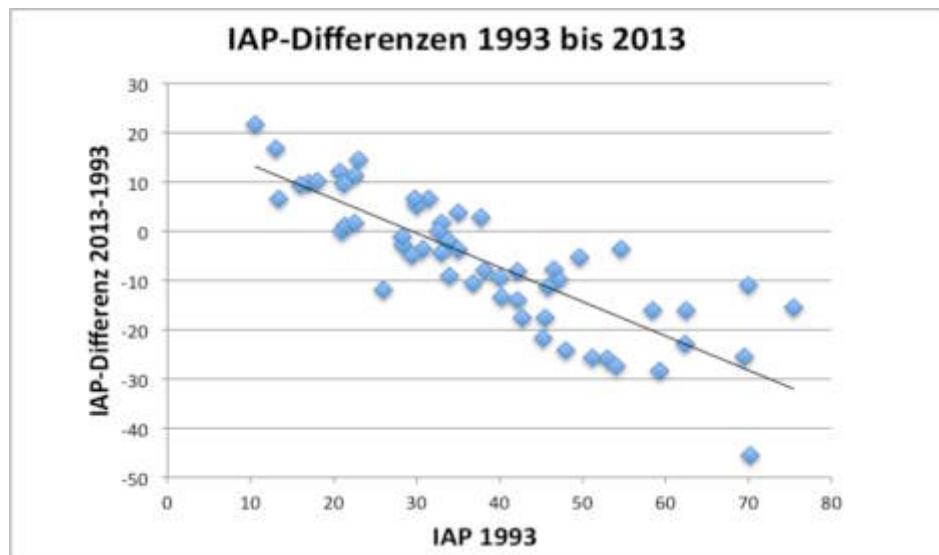


Abbildung 9 stellt für alle Georäume die Differenz der IAP18-Werte von 1993 und 2013 den IAP-Werten von 1993 gegenüber. Dieser Vergleich zeigt, dass die 1993 tiefen Luftgütwerte bis 2013 etwas zugenommen haben. Die hohen Werte von damals haben sich hingegen verschlechtert. Diese Veränderungen weisen 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. 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 Stickoxiden NO_x und Schwefeldioxid SO_2 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 wählt das Auftreten der beiden Flechtengruppen gegeneinander ab. Berechnet wird der Acidoindex entsprechend aus den Frequenzsummen der fünf acidophilen Flechtenarten *Hyopogymnia physodes*, *Hypogymnia tubulosa*, *Pseudevernia furfuracea*, *Evernia prunastri* und des halben Summenwerts der Artengruppe *Parmelia glabratula* sowie den Frequenzsummen der fünf basiphilen Arten *Xantoria parietina*, *Physconia distorta*, *Parmelia subargentifera*, *Phaeophyscia orbicularis*-Gr. und des halben Summenwerts der Artengruppe *Physcia adscendens*.

Die Frequenzsumme der basiphilen Arten wird von der Frequenzsumme der 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.

3.5.1 Acidoindex 1993

Bereits 1993 ist das Untersuchungsgebiet basisch geprägt (Abb. 10). Lokal finden sich in den verkehrsreichen Industrie- und Siedlungsgebieten Cham, Baar und Zug Hinweise auf saure Verhältnisse. Stark basisch zeigt sich die Situation hingegen im Reusstal.

3.5.2 Acidoindex 2003

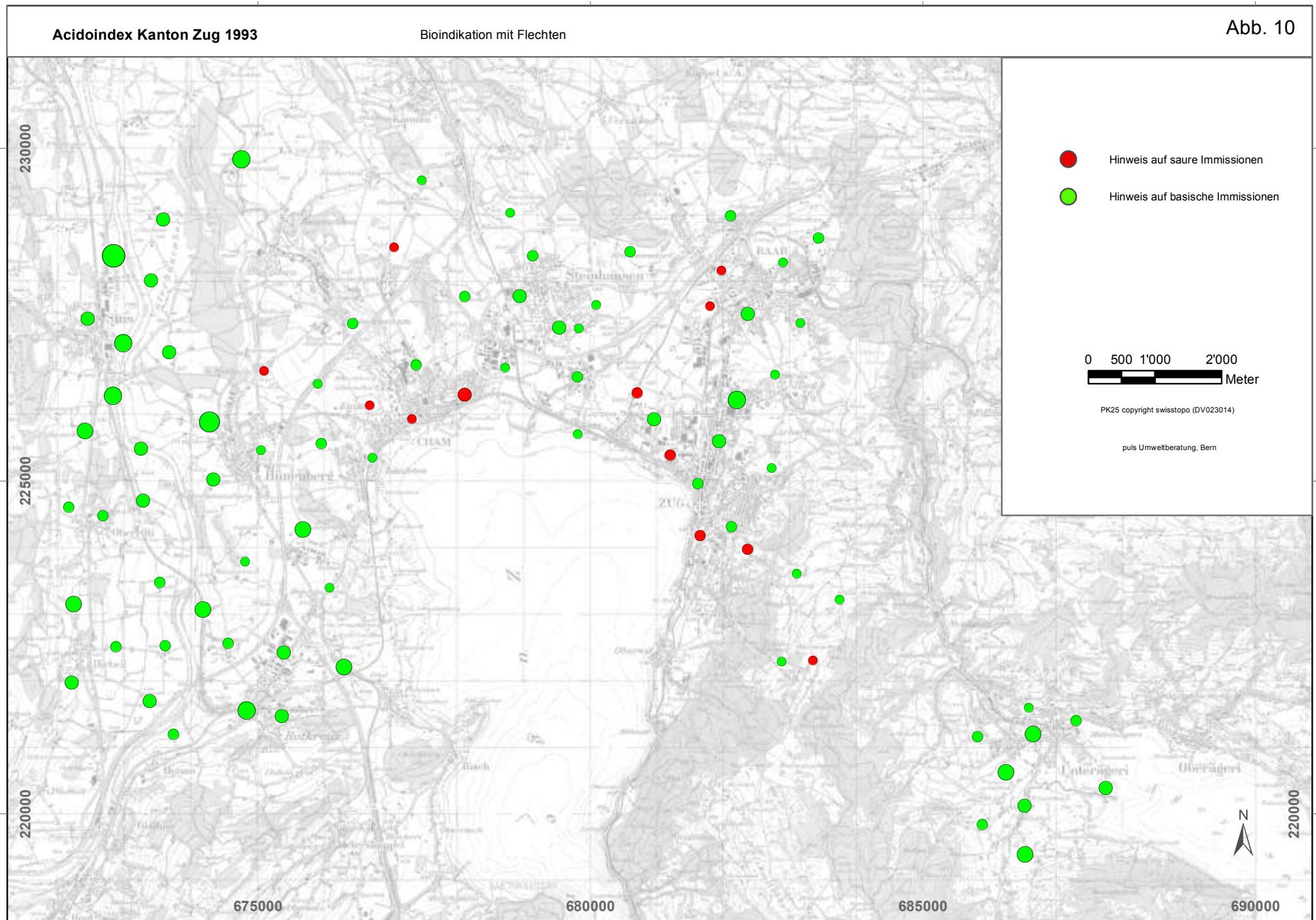
2003 sind sämtliche Georäume im Untersuchungsgebiet basisch (Abb. 11). Die am stärksten basischen Verhältnisse bestehen nach wie vor im Reusstal.

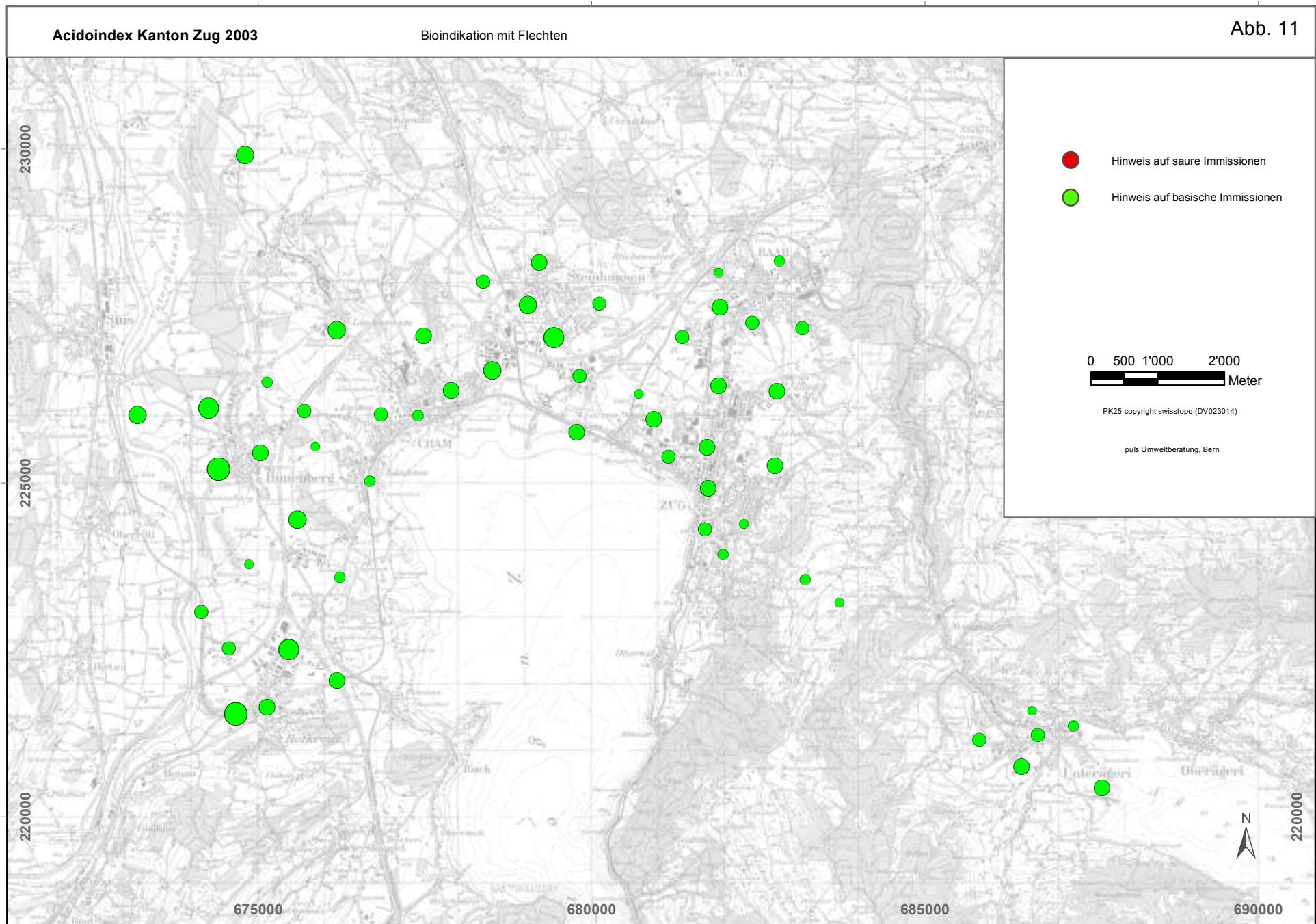
3.5.3 Acidoindex 2013

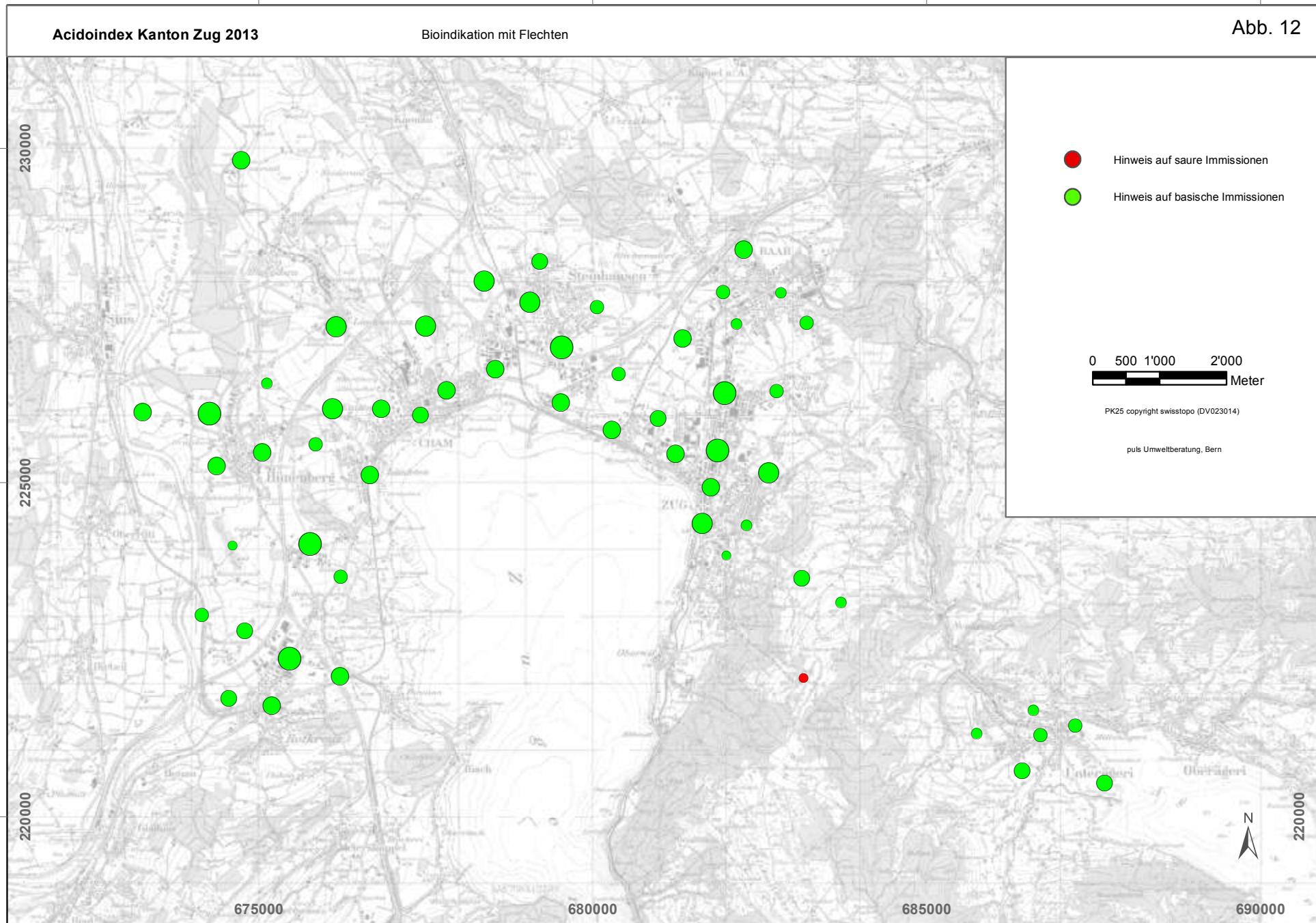
2013 hat sich die basische Prägung im Kanton Zug nochmals verstärkt und scheint heute auf hohem Niveau in kleinen Amplituden zu fluktuieren (Abb. 12). Basische Belastungen dominieren im Untersuchungsgebiet, nur ein Georaum auf dem Zugerberg zeigt eine leicht saure Prägung.

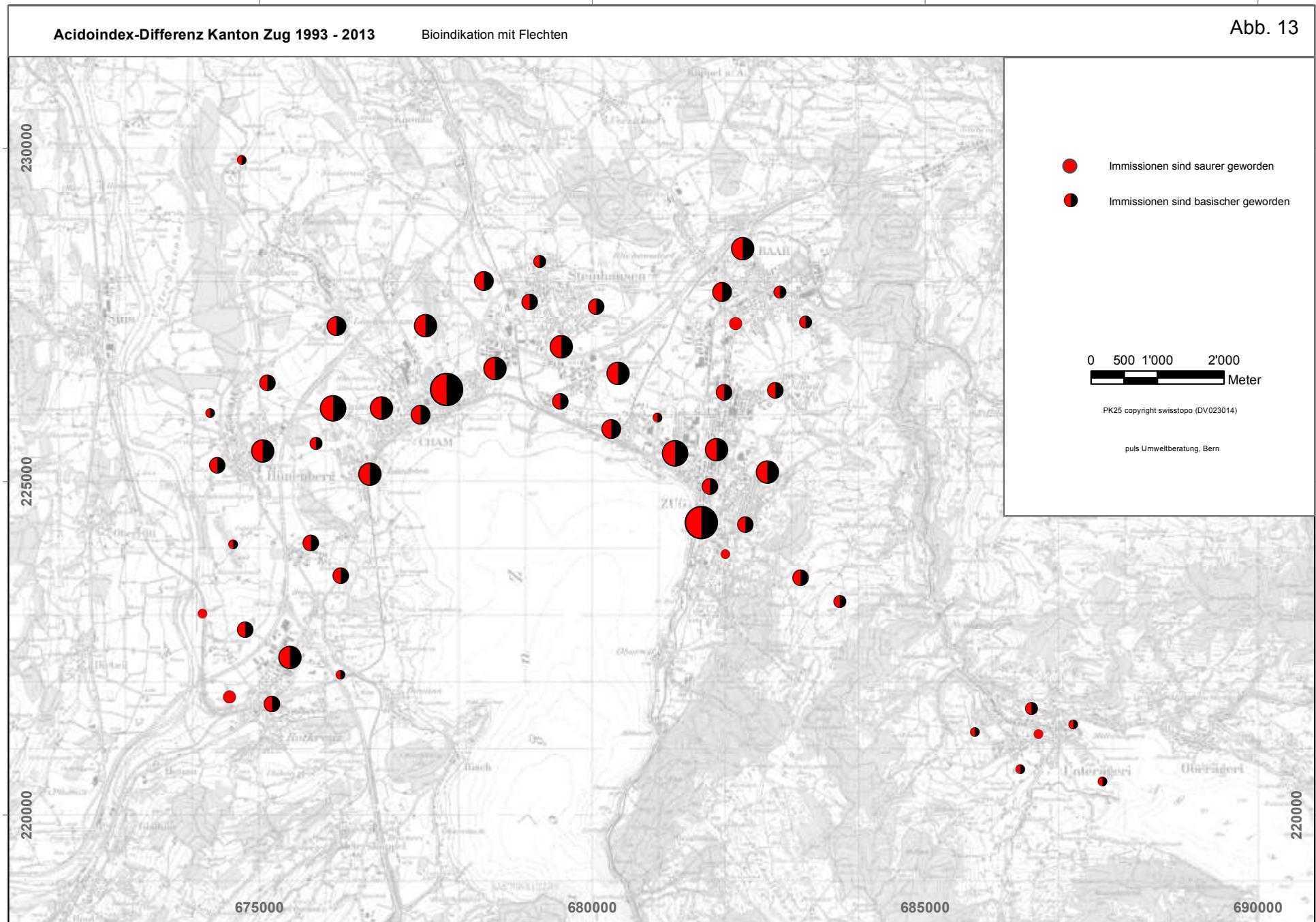
3.5.4 Veränderung des Acidoindexes von 1993 bis 2013

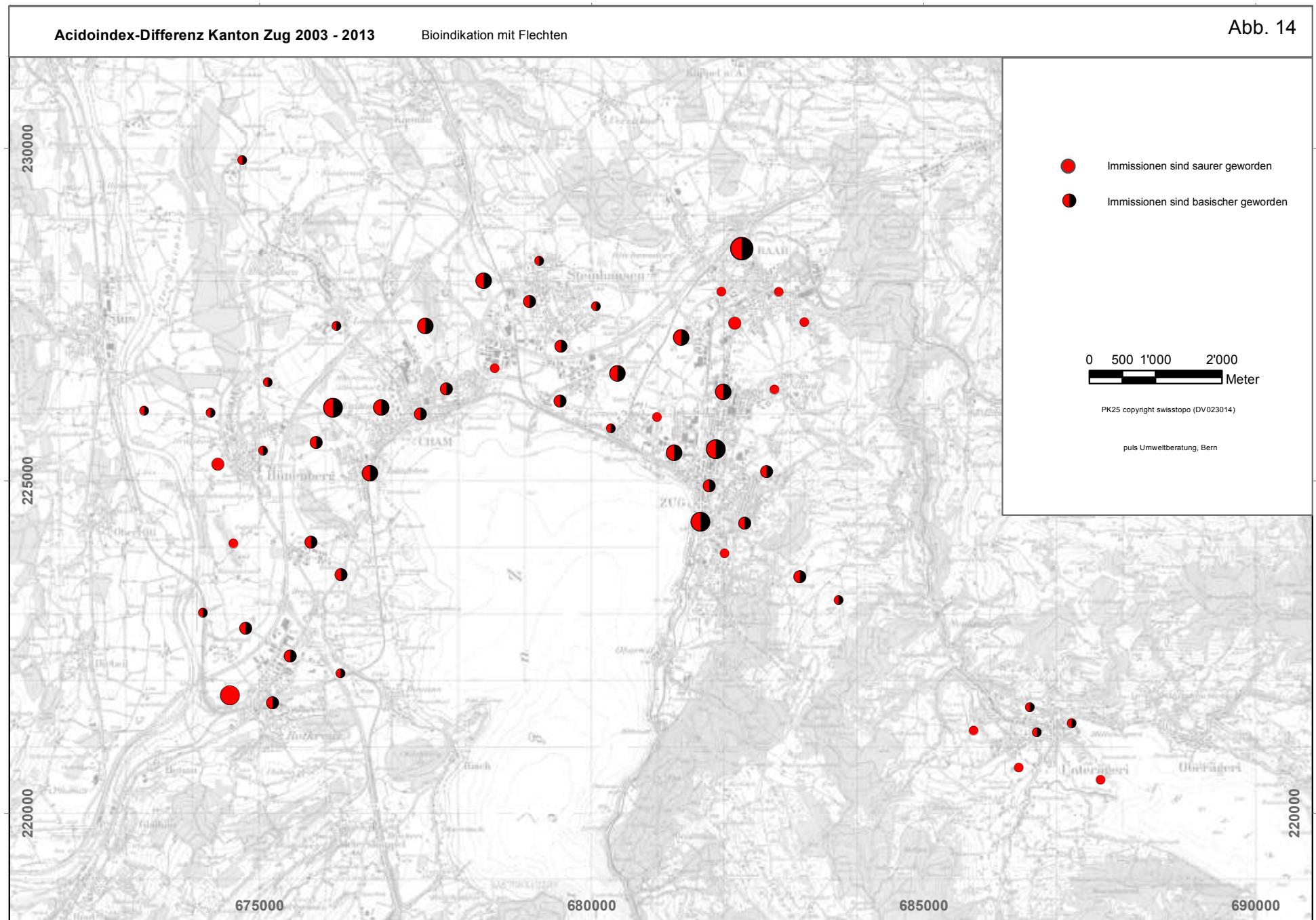
Von 1993 bis 2013 haben alle vormals sauer geprägten Georäume eine starke basische Prägung erfahren (Abb. 13). Veränderungen sind lokal: Einige ehemals weniger basisch geprägte Gebiete weisen nun stark basische Immissionen auf, nur an wenigen Orten haben die sauren Immissionen leicht zugenommen. In der Veränderung des Säuregrads von 2003 bis 2013 ist die Tendenz etwas weniger klar erkennbar (Abb. 14), die Prägung ist heute insgesamt nochmals basischer als 2003. Einige vormals stark basisch geprägte Räume zeigen eine leichte Abnahme der Belastung, einige Gebiete sind unverändert basisch.











3.6 Nitroindex

Stickstoffdepositionen führen zu einer Eutrophierung von Biotopen. Die Flechten zeigen den Nährstoffeintrag mit einer Verschiebung des Artenpektrums 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 (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 Nitroindexes 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 1993

Der Kanton Zug weist bereits 1993 eine gesamthaft stickstoffreiche Immission auf (Abb. 15). Nur lokal in Cham und Zug sind stickstoffmeidende Flechten anzutreffen. Besonders stark stickstoffreich sind die Immisionen im Reusstal zwischen Sins und Rotkreuz sowie im Göbli-Quartier Zug.

3.6.2 Nitroindex 2003

2003 sind keine stickstoffarmen Immissionen mehr ausgewiesen, im gesamten Untersuchungsgebiet sind die Belastungsverhältnisse ausnahmslos stickstoffreich (Abb. 16). Verstärkt haben sich die Stickstoffbelastungen in den Siedlungsgebieten Steinhausen, Baar und Zug. Nach wie vor stark stickstoffreich sind das Reusstal und das Gebiet Unterägeri.

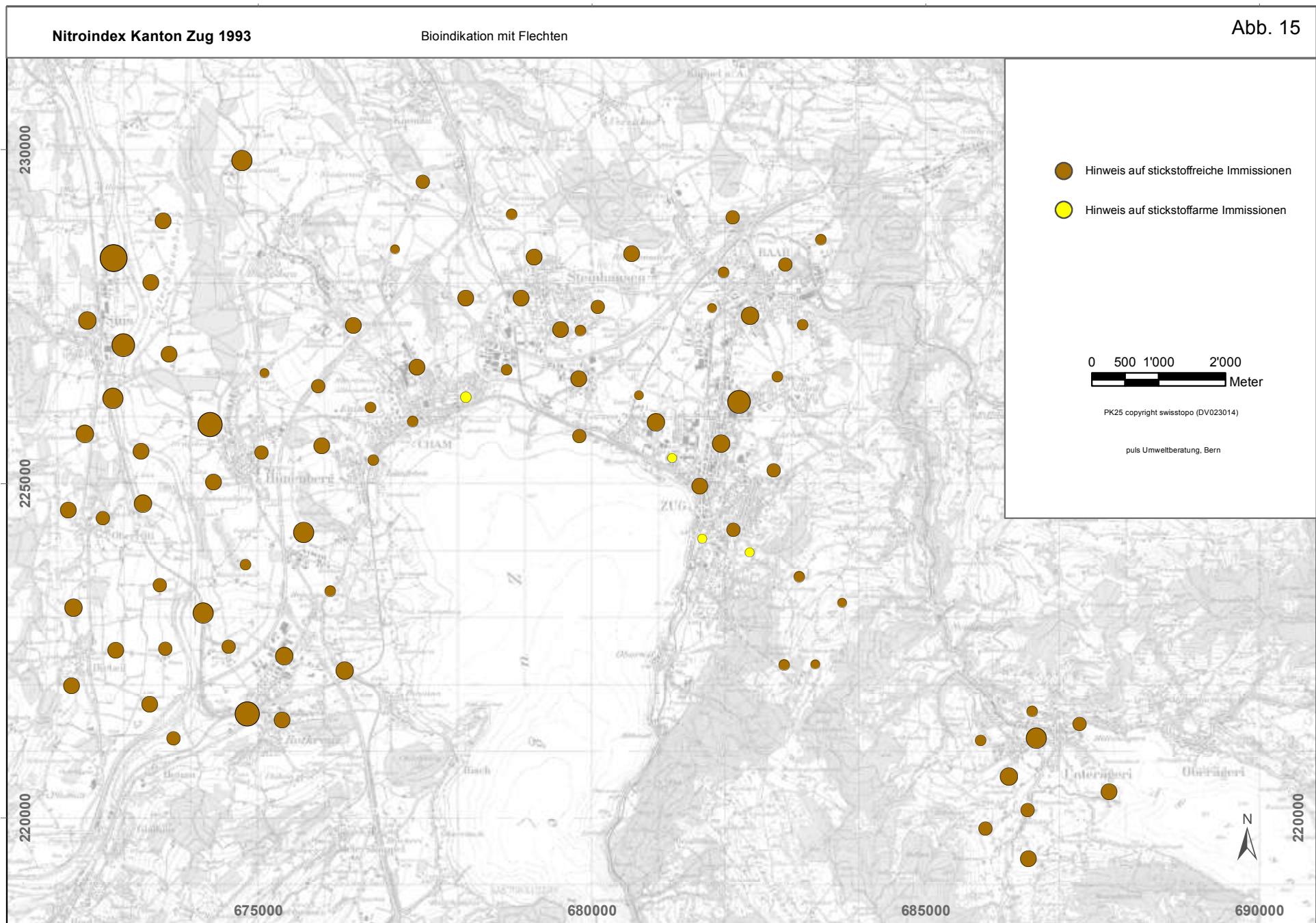
3.6.3 Nitroindex 2013

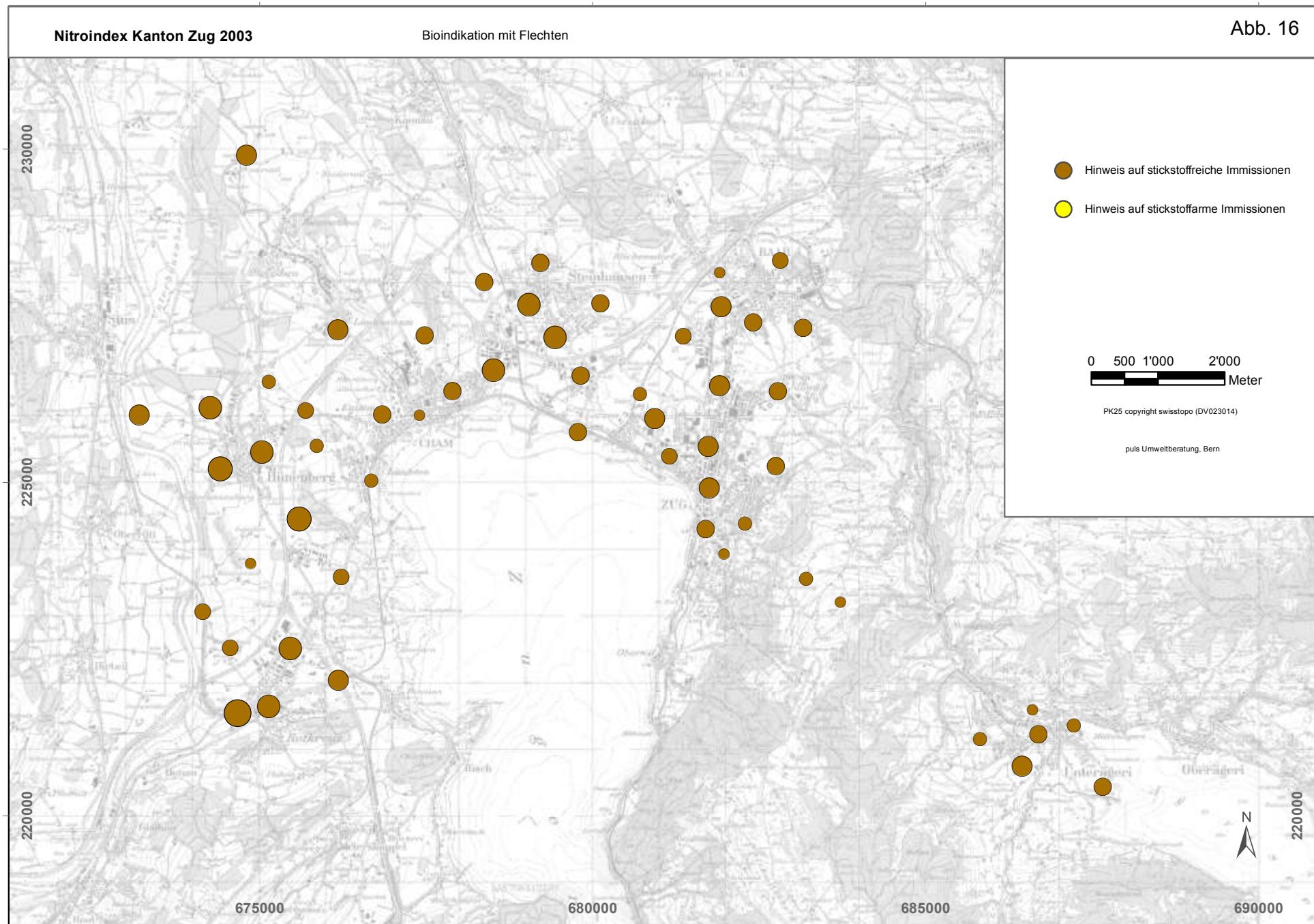
2013 ist die Stickstoffimmission nochmals angestiegen. Insbesondere sind alle grösseren Siedlungsgebiete heute stark stickstoffreich (Abb. 17). Im Reusstal sind die Belastungsverhältnisse unverändert hoch. Lokal sind die Stickstoffbelastungen leicht zurückgegangen, insgesamt jedoch hat sich die Situation im gesamten Untersuchungsgebiet weiter verschärft.

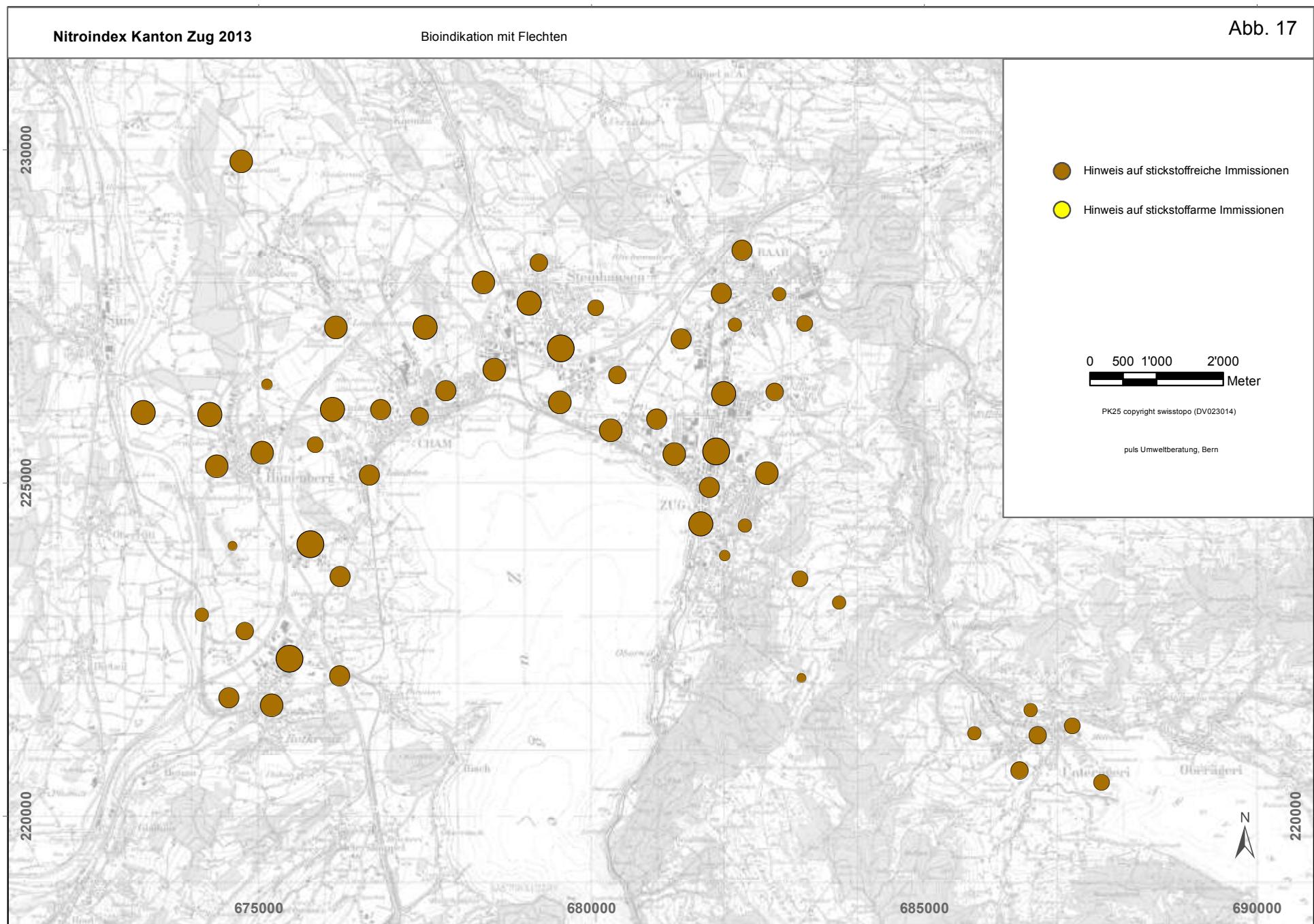
3.6.4 Veränderung des Nitroindexes 1993 bis 2013

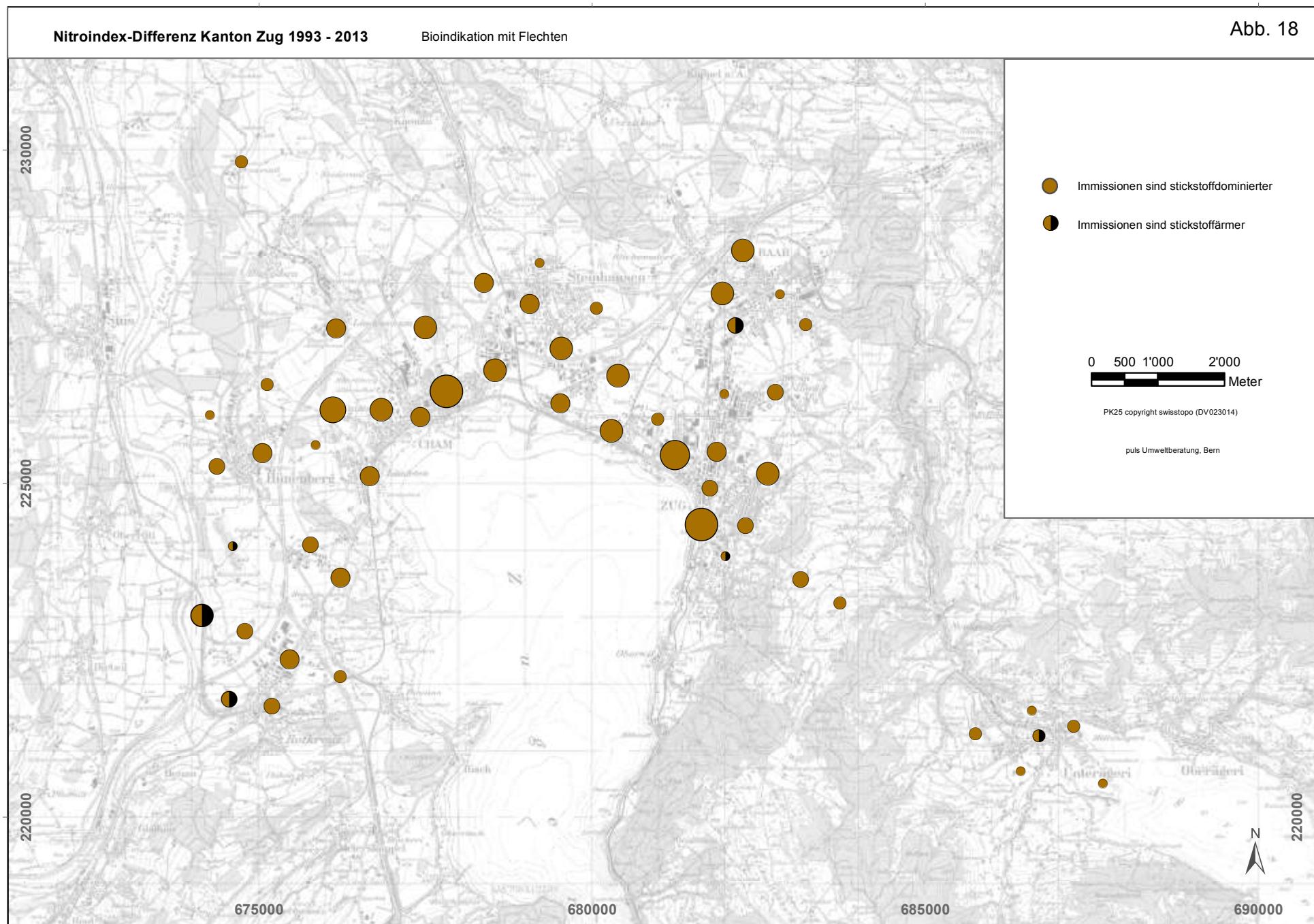
Von 1993 bis 2013 hat die Stickstoffbelastung im Kanton Zug stark zugenommen. (Abb. 18). Von 2003 bis 2013 haben die Stickstoffimmissionen in einigen Teilen des Untersuchungsgebiets zugenommen, in wenigen Teilen abgenommen (Abb. 19). Im Jahr 2003 stark stickstoffreiche Gebiete sind heute unverändert belastet oder leicht weniger stickstoffreich, während Regionen mit früher weniger ausgeprägten Stickstoffimmissionen heute ebenfalls stark stickstoffreich sind.

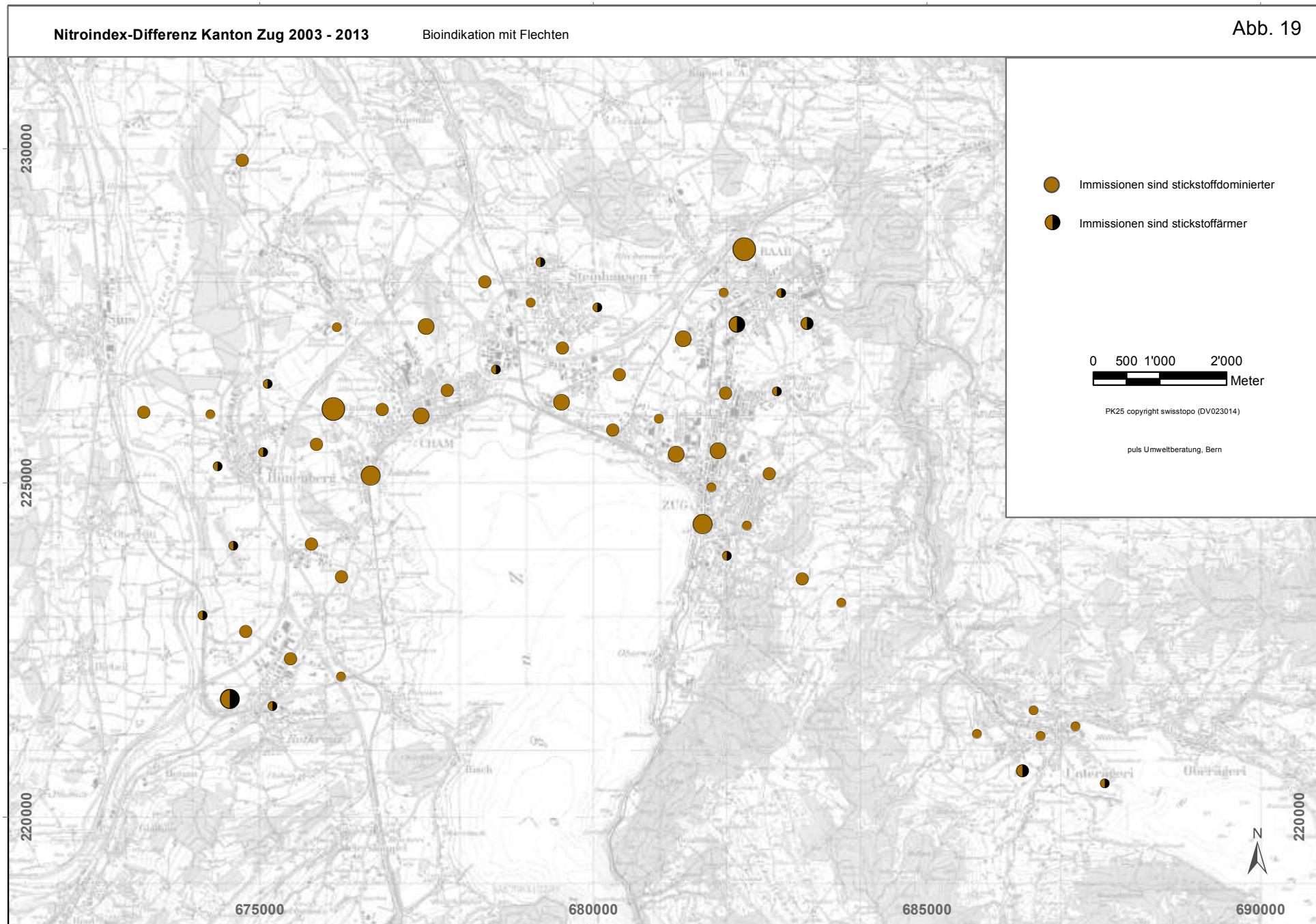
Wie in anderen untersuchten Gebieten der Schweiz (Abb. 20) scheint sich der Grad der Stickstoffbelastung im Untersuchungsgebiet von 1993 bis 2013 einem Maximalwert anzunähern.

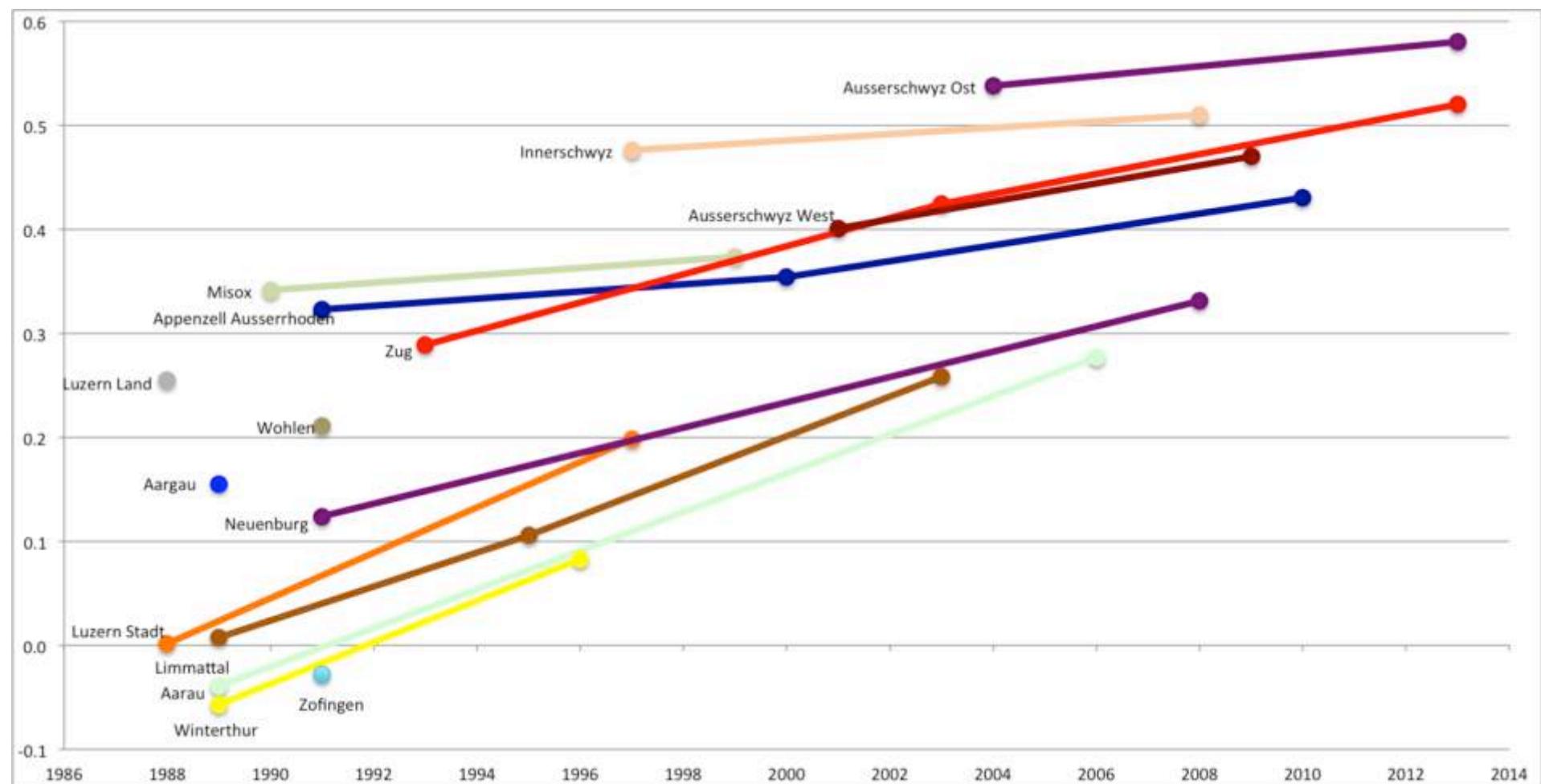










**Abb. 20**

Der Nitroindex in verschiedenen Gebieten der Schweiz; Zug: Rote Linie

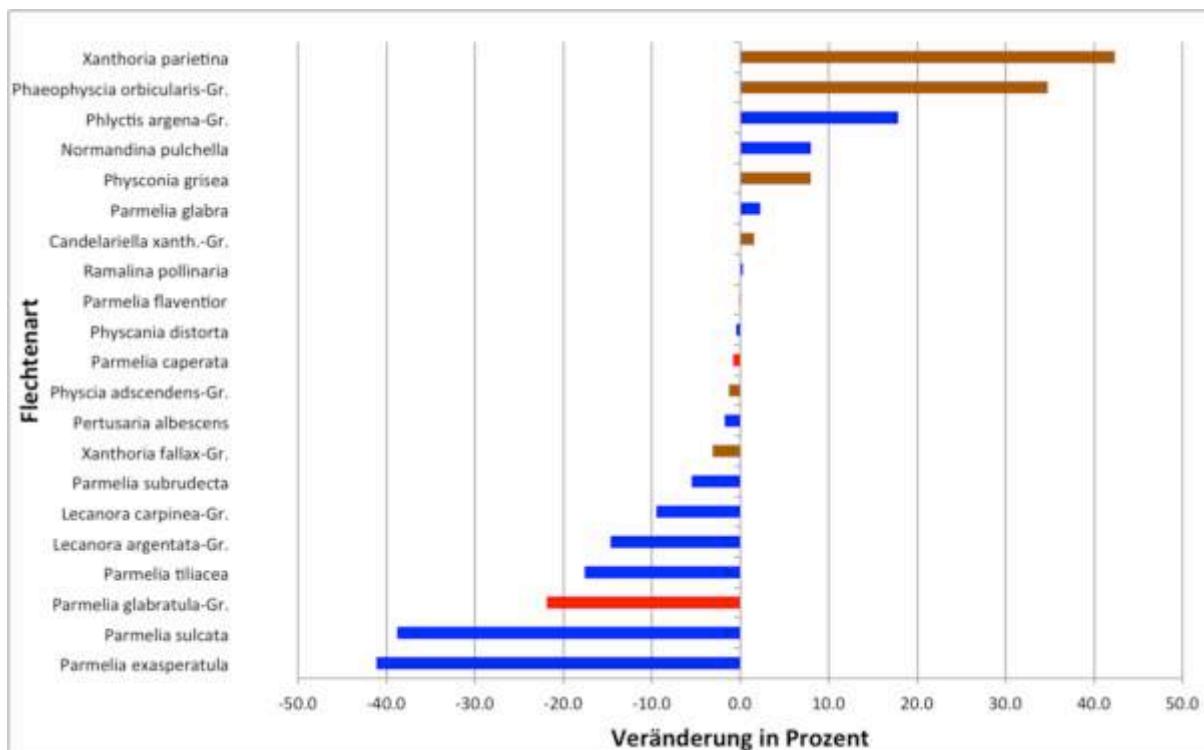
3.7 Flechtendiversität

Die Flechtenartenzahl hat von 1993 bis 2013 abgenommen. 1993 wurden 40 Arten und Artengruppen, 2013 noch 36 Arten und Artengruppen gefunden. Ein grösserer Teil davon fand sich nur an wenigen Bäumen. 1993 waren 34 Arten und Artengruppen an mehr als einem Prozent der Bäume vorhanden, 2013 waren es nur 27 Arten- und Artengruppen.

Während der letzten 20 Jahre hat sich die Häufigkeit der einzelnen Flechtenarten unterschiedlich entwickelt (Abb. 21). Während die säure- oder basenindifferenten Arten (blaue Balken) und die säureliebende Arten (rote Balken) mehrheitlich und teilweise stark abgenommen haben, so haben einige stickstofftolerante Arten (braune Balken) stark zugenommen. Diese Tendenzen schlagen sich auch in der Entwicklung des Acido- und des Nitroindexes nieder (Kap. 3.5 und 3.6).

Abb. 21:

Veränderung der Häufigkeit von Flechtenarten zwischen 1993 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:

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

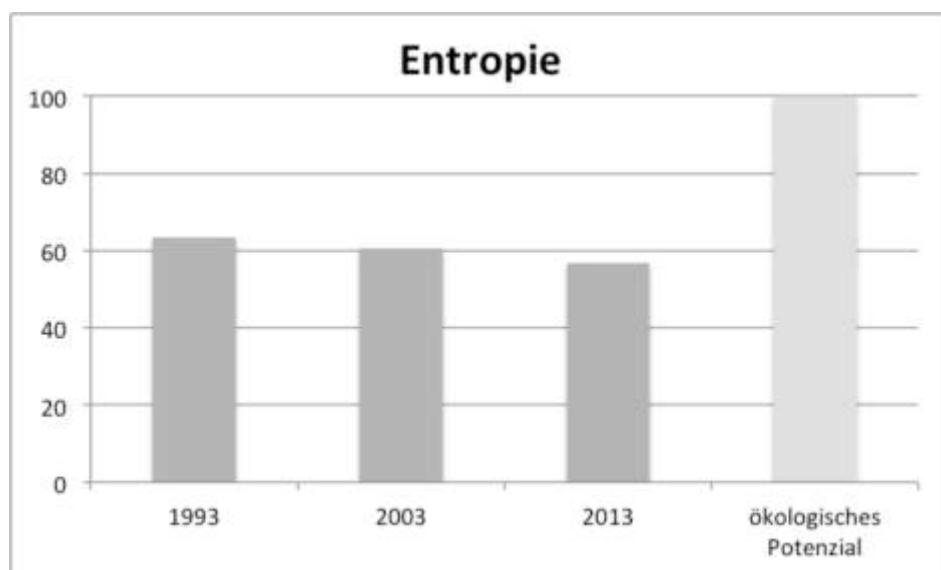
H entspricht dem Entropiewert, s ist die Artenzahl im Untersuchungsgebiet, i steht für die einzelne Art und p_i entspricht der relativen Häufigkeit der Art (Jenssen 2006).

Entropie ist das Mass für die Ungewissheit, ob eine bestimmte Flechtenart an einem Trägerbaum zu finden ist. Die Ungewissheit 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 Potenzial der Diversität eines Ökosystems bezeichnet.

Um das ökologische Potenzial im Kanton Zug zu beschreiben, wurde die mittlere Entropie für die Jahre 1993, 2003 und 2013 berechnet. Als Referenzwert wurde der maximale Wert des Jahres 1993 herangezogen: Dieser beschreibt die maximale Diversität (das ökologische Potenzial des Gebiets) von 100 %. Die Werte der Untersuchungsjahre werden dazu in Beziehung gesetzt.

Die Flechtendiversität ist von 1993 (63.5 % des Maximalwerts) über 2003 (60.5 %) zu 2013 (56.9 %) gesunken (Abb. 22).

Abb. 22:
Entropiewerte von 1993, 2003 und 2013 als Prozente des maximalen Werts (des ökologischen Potenzials)



4. Diskussion

Die Flechtenkartierung zeigt mehrheitlich einen Rückgang der Flechtenvegetation von 1993 bis 2013, nur lokal sind Verbesserungen feststellbar. 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. Der Nitroindex zeigt, dass die Eutrophierung (Nährstoffeintrag) der Luft seit 1993 stark und seit 2003 weiter, jedoch etwas abgeschwächt zugenommen hat. Als Eutrophierung wird allgemein die Anreicherung von Nährstoffen in einem Ökosystem bezeichnet.

Im Folgenden sollen die Luftgütewerte, 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 USG im Jahr 1983 und der Luftreinhalte-Verordnung LRV im Jahr 1985 haben verschiedene Schadstoffemissionen in der Luft deutlich abgenommen. Dazu beigetragen haben technische Verbesserungen in Industrie und Gewerbe, bei Produktion und Energiegewinnung, Optimierungen des Material- und Energieeinsatzes, Verzicht und Minimierung von umweltbelastenden Substanzen sowie der Einbau von Abluftreinigungsanlagen bei kritischen Prozessen, wie z. B. bei Kehrichtverbrennungsanlagen. 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 hatten die Ausrüstung der Benzinmotoren mit Katalysatoren und die Umstellung auf bleifreies Benzin bei 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 zur Entlastung der Luft beigetragen. Die Erfolge durch die Katalysatortechnik im Strassenverkehr werden zurzeit durch die laufende Verkehrszunahme und vor allem auch durch die überproportionale Zunahme der Dieselfahrzeuge gefährdet.

1999 verabschiedete die Zentralschweizer Umweltschutzdirektoren-Konferenz ZUDK den ersten gemeinsamen Massnahmenplan Luftreinhaltung. Im Laufe der Zeit zeigte sich aber, dass in der Zentralschweiz mit der Umsetzung dieser beschlossenen Massnahmen die Grenzwerte der LRV immer noch grossräumig überschritten wurden. Die gesetzlichen Anforderungen für Stickstoffdioxid NO₂, Feinstaub PM10 und Ozon O₃ konnten nicht erfüllt werden. Handlungsbedarf für die Weiterführung und die Neulancierung von zusätzlichen Luftreinhalte-Massnahmen wa-

ren gegeben. Am 21. Mai 2007 hat die ZUDK daher den Massnahmenplan Luftreinhaltung II verabschiedet. Mit den darin enthaltenen Massnahmen sollen insbesondere die Emissionen von Feinstaub, Stickoxid NO_x sowie flüchtigen organischen Verbindungen VOC weiter reduziert werden.

4.1.2 Immissionsmessungen

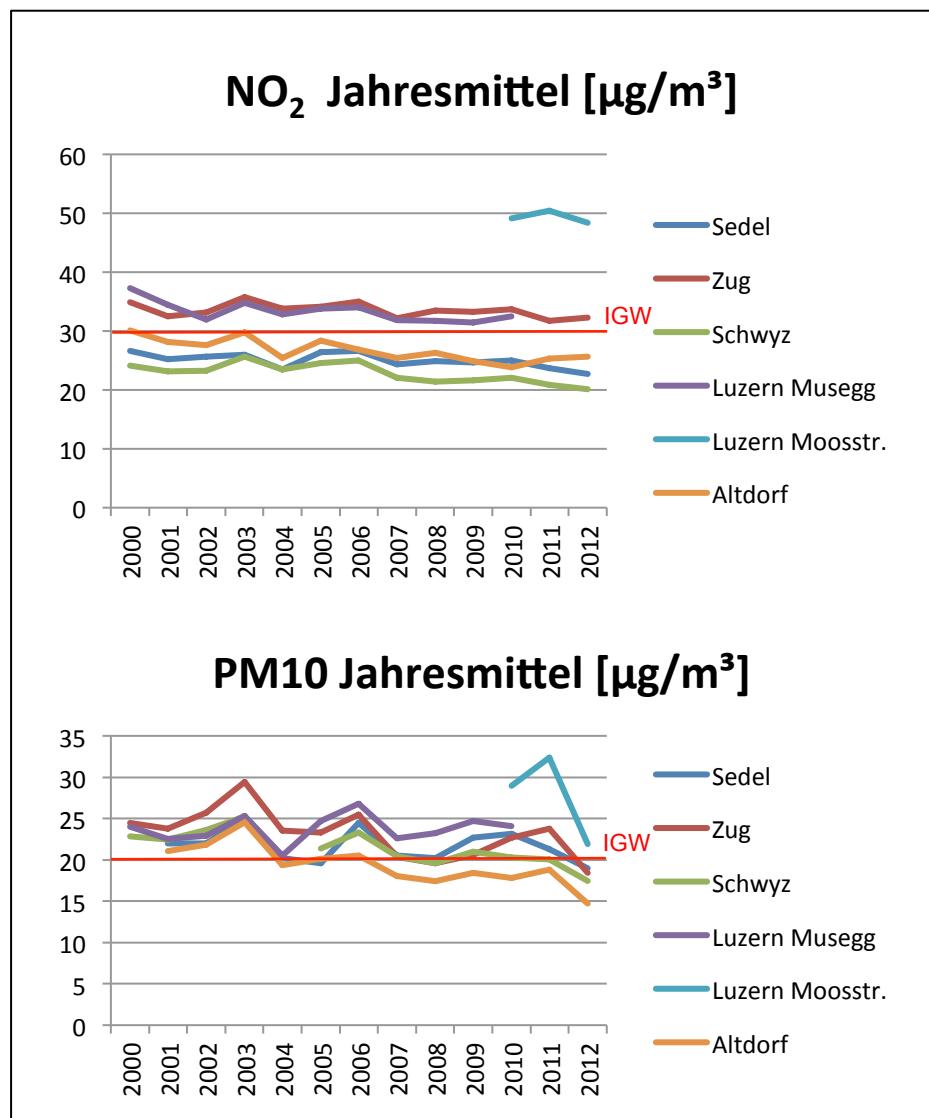
Die Luftqualität wird von der ZUDK für die Region Zentralschweiz mit dem interkantonalen Luftmessnetz "in-luft" überwacht. Es werden vor allem die Leitsubstanzen Stickstoffdioxid, Feinstaub PM10 und Ozon zur Beurteilung der Luftqualität gemessen. Das Messnetz, bestehend aus acht Online-Messstationen, wird zusätzlich mit einem flächendeckenden NO₂-Passivsampler-Netz verdichtet.

a) *Ergebnisse der Stickstoffdioxid- und Feinstaub-Messungen der Zentralschweiz*

An der Luzerner Station Sedel in Ebikon wird bereits seit Anfang der 90er-Jahre Stickstoffdioxid NO₂ gemessen. Dadurch konnte die Entwicklung der NO₂-Konzentration in der Zentralschweiz verfolgt werden. Die Messreihe verhielt sich analog zum schweizerischen Messnetz NABEL mit einer deutlichen und kontinuierlichen Schadstoffabnahme bis etwa ins Jahr 2000. Seitdem stagniert die NO₂-Konzentration vor allem an verkehrsbelasteten Standorten, da durch die Zunahme an Dieselfahrzeugen der Ausstoss von NO₂ zugenommen hat. Der Grenzwert von Stickstoffdioxid wird in den meisten Regionalzentren ab 10'000 Einwohnern sowie an stark befahrenen Strassen in der ganzen Zentralschweiz überschritten (Abb. 23).

Die Feinstaubbelastung in der Zentralschweiz hat seit Messbeginn der 90er-Jahre zwar abgenommen, im Winter wird jedoch der Tagesmittelgrenzwert von 50 µg/m³ deutlich und häufig an allen Messstationen überschritten. Erlaubt wäre gemäss LRV eine einmalige Überschreitung pro Jahr. Auch der Jahresmittelgrenzwert von 20 µg/m³ wird immer noch überschritten (Abb. 23).

Abb. 23:
Jahresmittelwerte
interkantonales
Luftmessnetz in-luft;
IGW: Grenzwert LRV



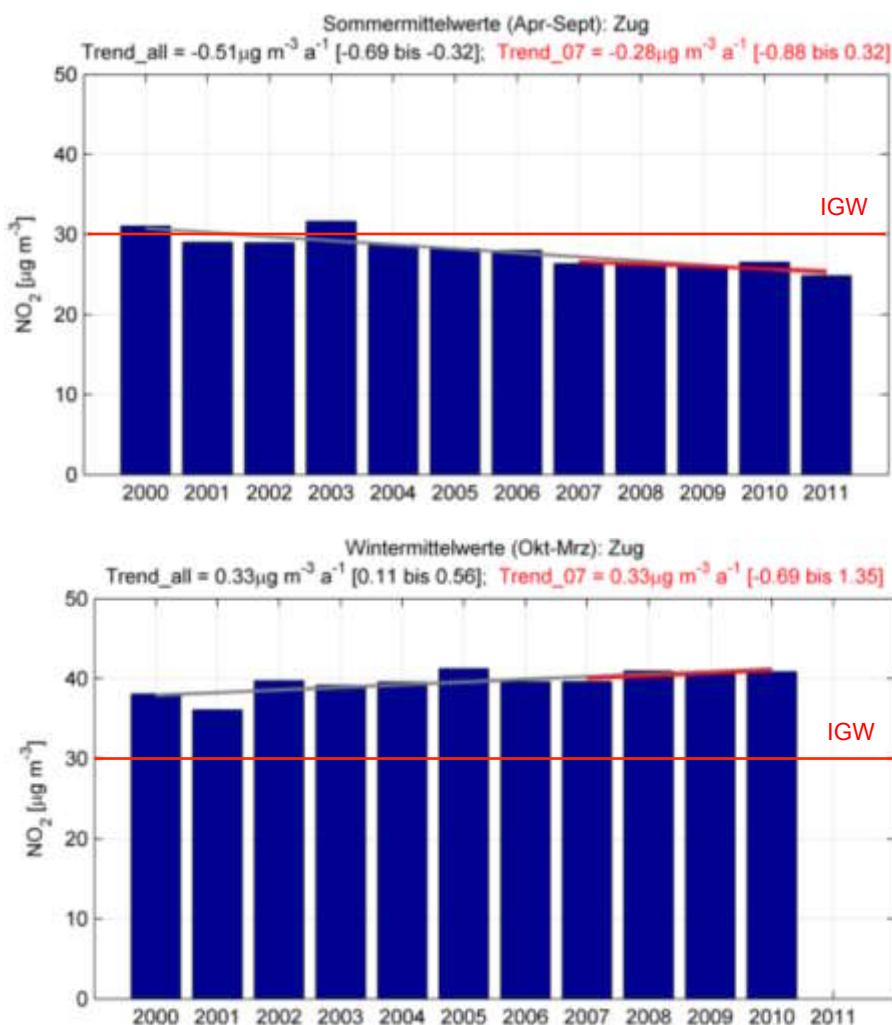
b) Ergebnisse der Stickstoffdioxid- und Feinstaub-Messungen im Kanton Zug

NO₂-Online-Messungen am Postplatz Zug

Die Messstation am Postplatz Zug repräsentiert einen verkehrsbelasteten, städtischen Standort. Die gemessenen Stickstoffdioxid-Werte befinden sich auf relativ konstantem, teilweise hohem Niveau.

Die NO₂-Konzentrationen der Postplatz-Messstation nehmen in den Sommermonaten seit 2000 tendenziell ab, hingegen steigen sie in den Wintermonaten in Folge von Inversionslagen und ihren komplexen Mechanismen an (Abb. 24). Da Flechten im Winter und bei Feuchtigkeit ebenso stoffwechselaktiv sind wie im Sommer, ist die hohe Schadstoffbelastung im Winter für sie relevant, z. B. in Nebelrandzonen.

Abb. 24:
 Jahresmittel NO₂ im Sommer (oben) und im Winter (unten) an der Messstation Postplatz Zug (inNet 2013); IGW: Grenzwert LRV



NO₂-Messungen mit Passivsammlern PS

Der Kanton Zug betreibt neben der Online-Station am Postplatz Zug ein flächendeckendes Passivsampler-Netz zur Messung von NO₂. Die Hintergrundbelastung mit NO₂ hat seit den 90er-Jahren abgenommen, hingegen stagnieren bzw. steigen seit 2000 die NO₂-Werte an verkehrsbelasteten Standorten (Abb. 25 und 26).

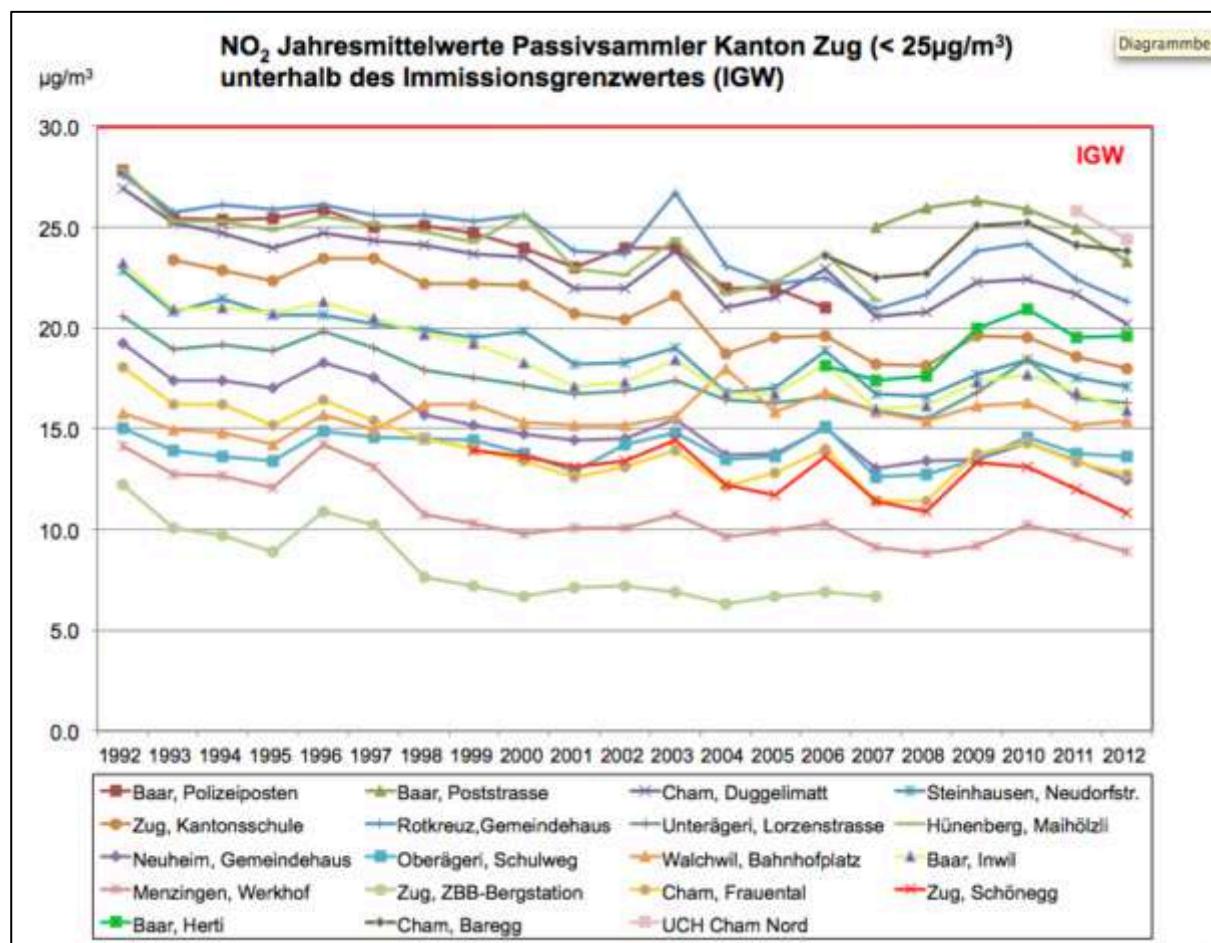


Abb. 25:
Jahresmittel NO₂-PS, Hintergrundbelastung, Kanton Zug; IGW: Grenzwert LRV

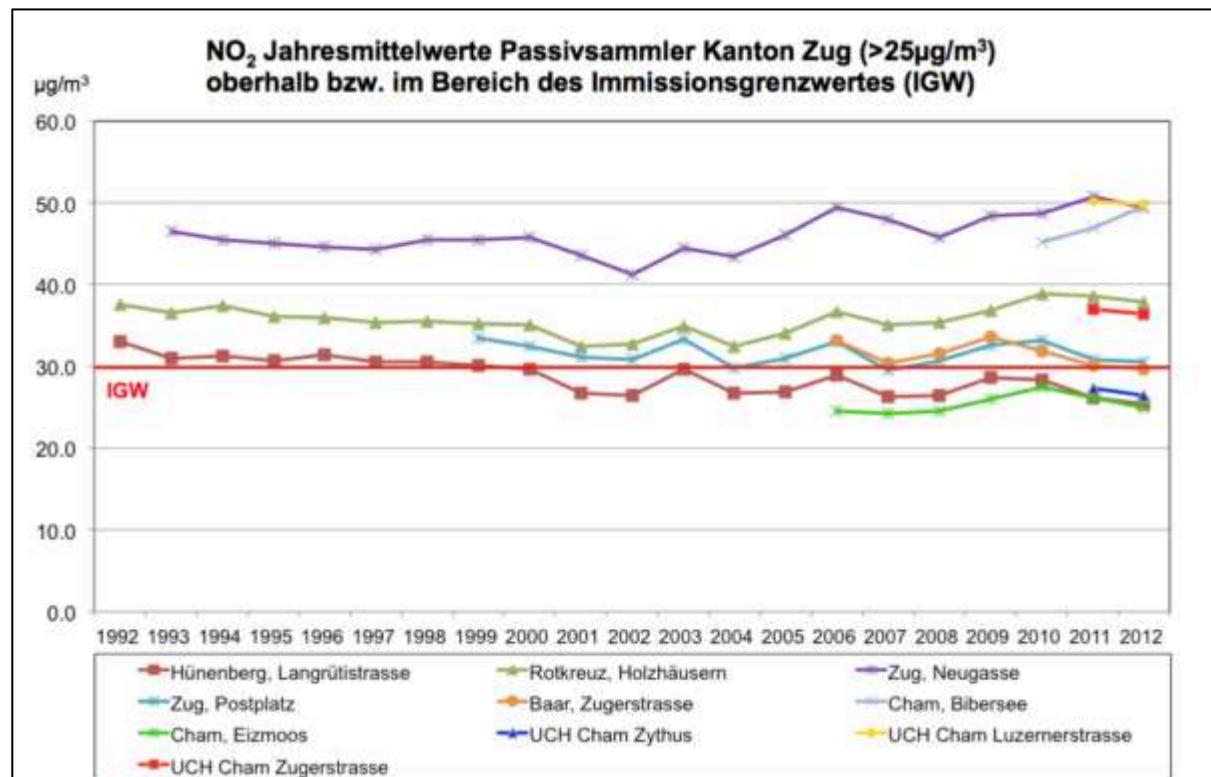
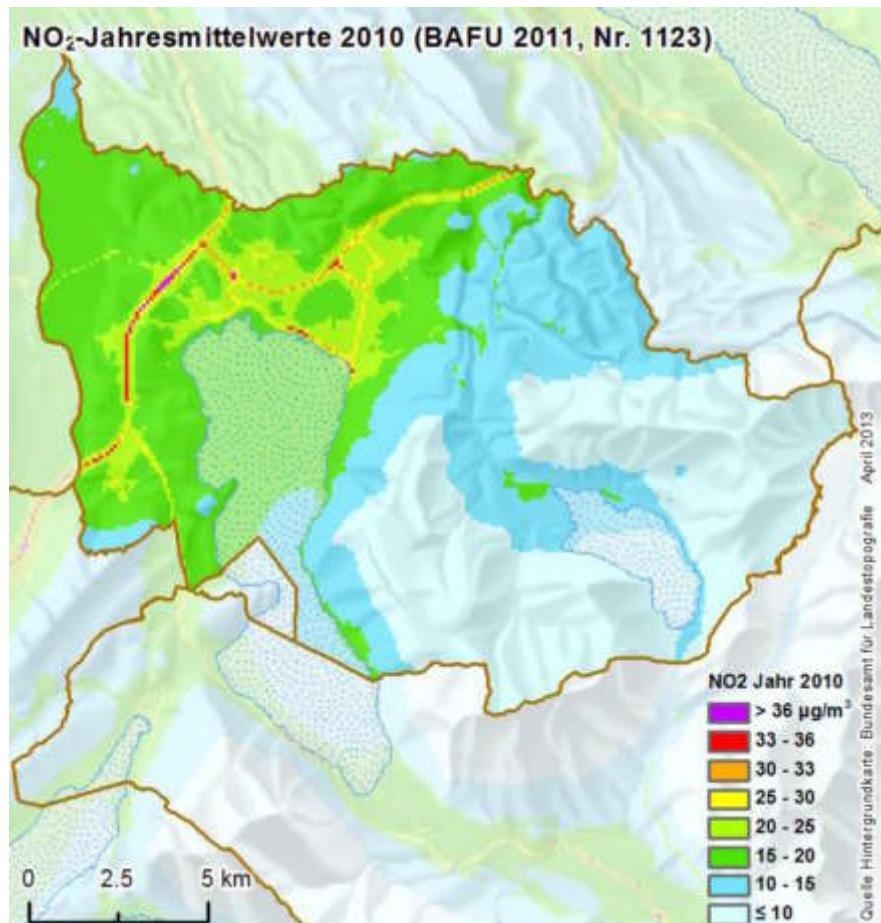


Abb. 26:
Jahresmittel NO₂-PS, verkehrsbelastete Standorte, Kanton Zug; IGW: Grenzwert LRV

Gesamtübersicht der NO₂-Immissionen im Kanton Zug

Werden die NO₂-Immissionen für den Kanton Zug mit Hilfe von Modellen kartografisch dargestellt, sind die hohen Belastungen vor allem in Strassennähe deutlich erkennbar (Abb. 27).

Abb. 27:
Karte der NO₂-
Immissionen 2010,
Kanton Zug

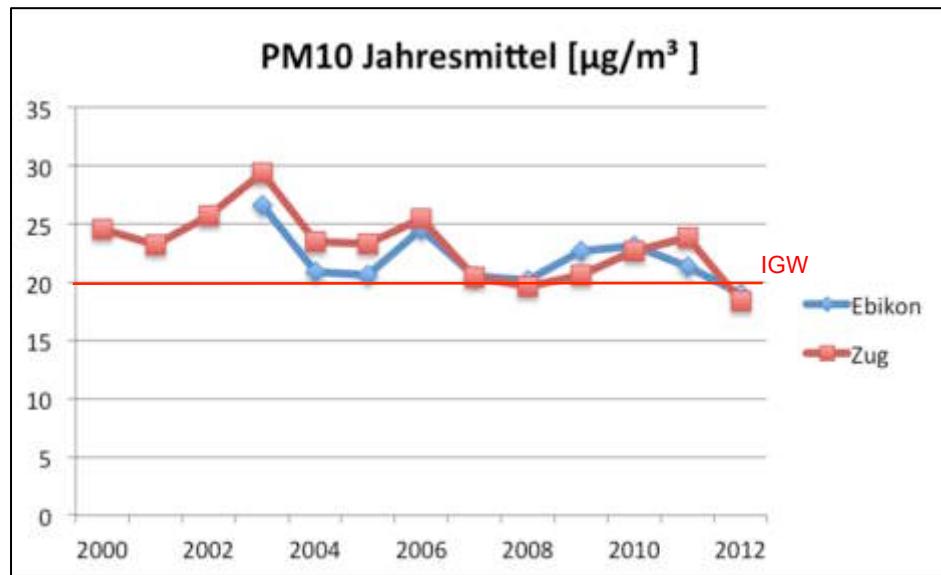


Feinstaub-Online-Messung am Postplatz Zug

Am Postplatz Zug wird auch der Feinstaub PM10 erfasst. Ähnlich wie in den anderen Zentralschweizer Kantonen werden die Feinstaub-Grenzwerte überschritten. Dies gilt sowohl für das Tagesmittel im Winter wie auch für das Jahresmittel.

Wird das Feinstaub-Jahresmittel der Messstation am Postplatz in Zug mit demjenigen der Luzerner Station Sedel in Ebikon (Abb. 28) verglichen, zeigt sich ein ähnliches Bild: Seit 2000 nehmen die Feinstaubpartikel-Immissionen zwar ab, bewegen sich aber immer noch über dem Grenzwert bzw. im Grenzwertbereich ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

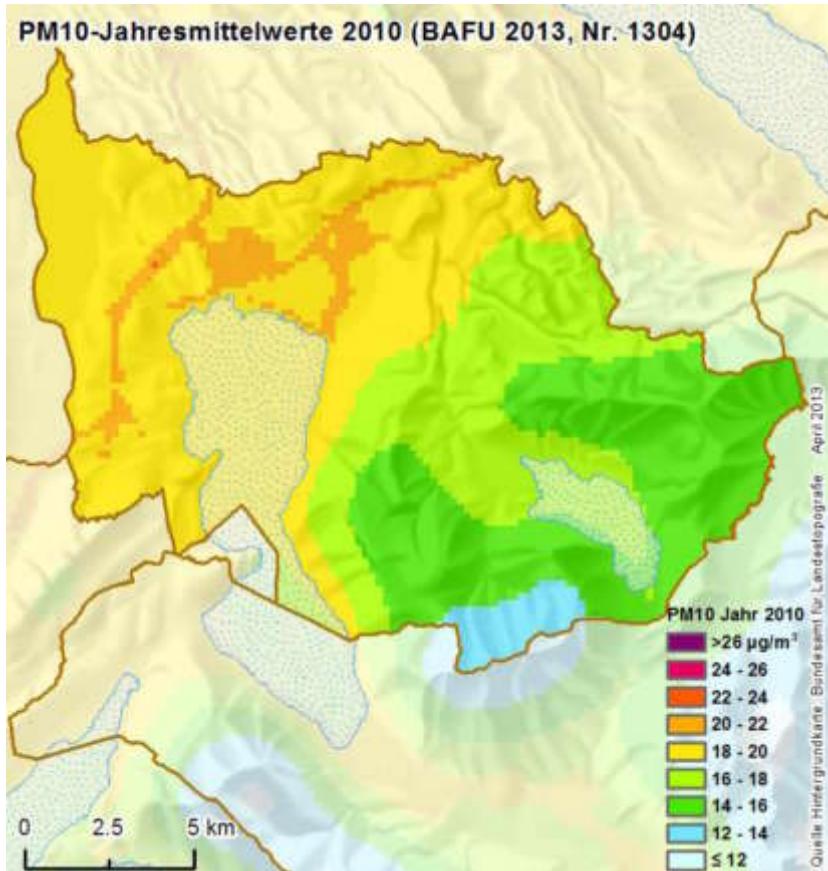
Abb. 28:
Vergleich Jahresmittel
PM10 von Zug und Ebikon;
IGW: Grenzwert LRV



Gesamtübersicht der Feinstaub-Immissionen im Kanton Zug

Werden die Feinstaub-Immissionen für den Kanton Zug mit Hilfe von Modellen kartografisch dargestellt, so sind die Belastungen vor allem in Strassennähe oder in bebautem Stadt- bzw. Gemeindegebiet deutlich erkennbar (Abb. 29).

Abb. 29:
Karte der PM10-
Immissionen 2010,
Kanton Zug



c) Ergebnisse der Ozon-Messungen der Zentralschweiz

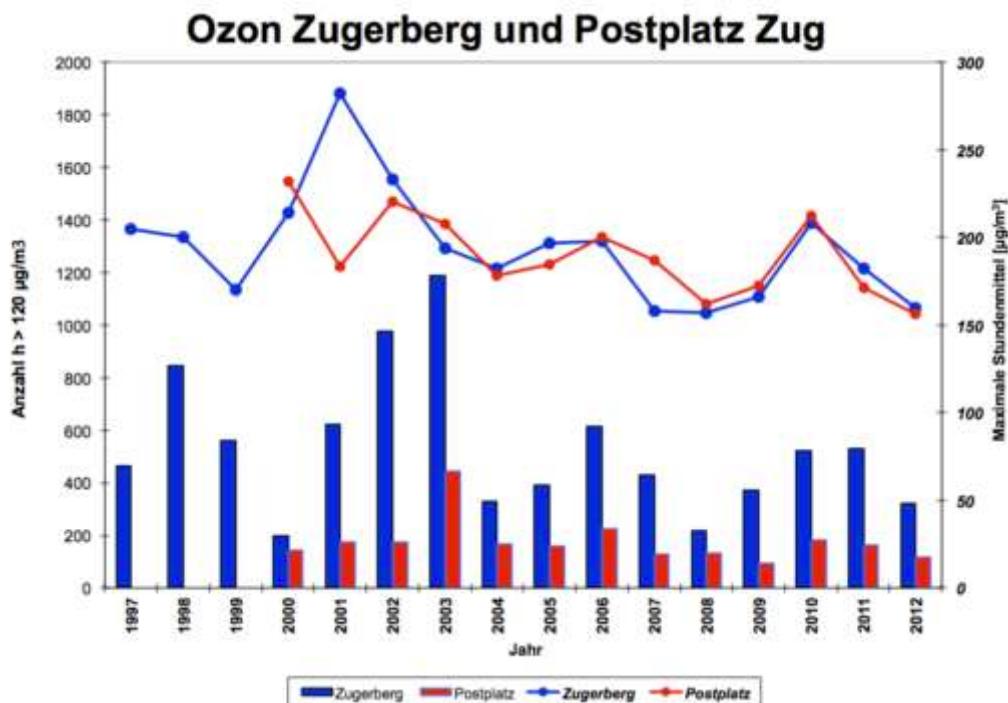
Ozon bildet sich in der Luft in Reaktion mit anderen Schadstoffen, insbesondere mit Stickoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen. Diese chemischen Prozesse werden durch intensive Sonneneinstrahlung gefördert. Ozon reagiert auch mit anderen Luftschadstoffen und wird dabei teilweise abgebaut (Ozonzehrung). 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.

Analog zu den Schweizerischen Immissionsmessungen des NABEL sind auch in der Zentralschweiz die sehr hohen Ozonwerte leicht rückläufig, hingegen nehmen die Ozonmittelwerte (Hintergrund) zu. Die Immissionsgrenzwerte wurden an allen Messstationen überschritten. In ländlichen Gebieten wurde auch der Schwellenwert AOT 40 für Wald überschritten. Dieser Wert ist zwar kein Grenzwert der LRV, aber ein Mass dafür, wie lange und in welchem Ausmass der Schädigungsschwellenwert für Vegetationen überschritten wird.

d) Ergebnisse der Ozon-Messungen im Kanton Zug

Die maximalen Ozonkonzentrationen bei den Messstationen Zugerberg und Postplatz haben in den vergangenen Jahren abgenommen, jedoch wird der Ozon-Stundengrenzwert von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an den beiden Messstationen nach wie vor häufig überschritten (Abb. 30). Erlaubt wäre jedoch nur eine Grenzwert-Überschreitung pro Jahr.

Abb. 30:
Maximale Stundenmittel und Anzahl Stunden mit Grenzwertüberschreitung des Ozons, Kanton Zug



e) *Luftbelastung und Witterungseinflüsse*

Die Unterschiede in der Luftbelastung zwischen den einzelnen Jahren werden nicht nur von zu hohem Schadstoffausstoss, sondern auch durch die Witterung beeinflusst. Anhaltende Inversionslagen führen im Winter zu überdurchschnittlichen Stickoxid- und Feinstaubbelastungen unter der Inversionsschicht 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 z. B. im Hitzesommer 2003.

f) *Ammoniak und Stickstoffeinträge in der Schweiz*

Der stickstoffhaltige Luftschadstoff Ammoniak NH₃ wird zu mehr als 90 % aus der Landwirtschaft emittiert (Tierhaltung, Gülleablagerung und -ausbringung). Die Schadstoffkarte 2011 mit Daten aus dem Jahr 2007 des BAFU zeigt für die Zentral- und die Ostschweiz die schweizweit höchsten Belastungen durch Ammoniak (Abb. 31). Im Untersuchungsgebiet liegen die modellierten Werte teilweise deutlich über den international festgelegten Grenzwerten von 3 µg/m³ für höhere Pflanzen und 1 µg/m³ für Flechten und Moose (Sutton et al. 2009).

Der hohe Ammoniak-Ausstoss aus der Landwirtschaft ist verantwortlich für übermässige Einträge von Stickstoff N in die Umwelt. Ammoniak lagert sich innerhalb von wenigen Stunden in der Umgebung seiner Quellen ab; der für Ökosysteme schädliche Stoff konzentriert sich daher besonders auf die landwirtschaftlich stark genutzten Gebiete. Ein grosser Teil des Ammoniaks aus der Landwirtschaft wird in der Luft zu verschiedenen reduzierten Stickstoff-Verbindungen umgewandelt. Dazu gehören z. B. Ammonium NH₄⁺ und Nitrat NO₃⁻. Diese werden weiträumig verfrachtet und mit dem Niederschlag deponiert.

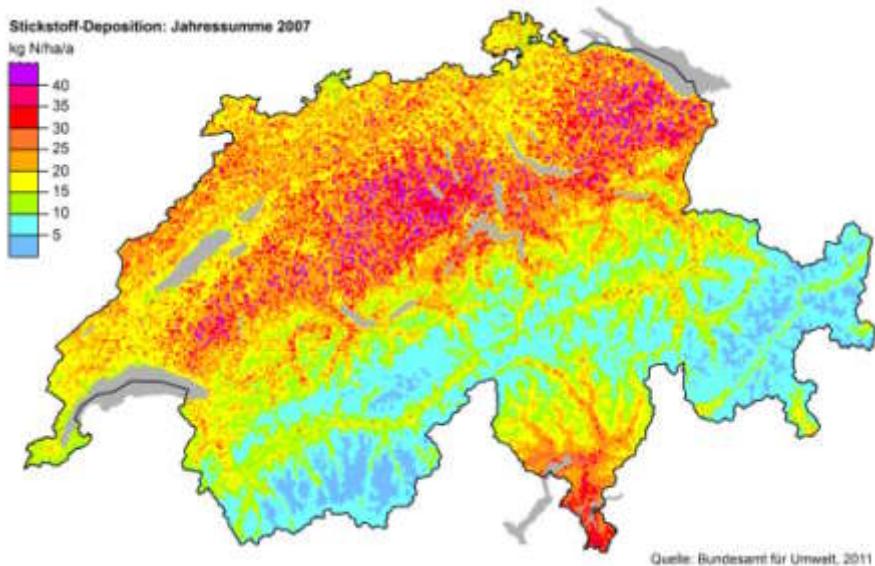
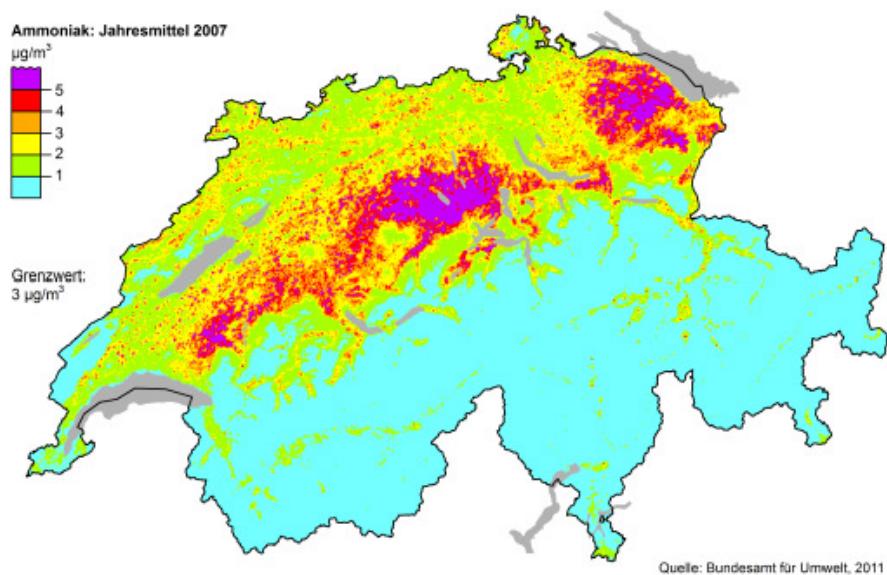
Dadurch ist die Eutrophierung durch die reduzierten Stickstoffverbindungen viel ausgedehnter als die Ammoniakbelastung (Abb. 31 unten).

g) *Ammoniakbelastung im Kanton Zug*

Der Kanton Zug weist neben dem Kanton Luzern eine überdurchschnittliche Belastung mit Ammoniak und damit auch hohe Stickstoffeinträge pro Fläche auf. So zeigen Berechnungen, dass im Kanton Zug durchschnittlich etwa 48 kg Ammoniak pro ha und Jahr emittiert werden, was im Vergleich zum schweizerischen Mittel von 38 kg Ammoniak pro ha und Jahr deutlich höher liegt.

Meteotest hat im Jahre 2013 mithilfe von Berechnungsmodellen die Ammoniak-Emissionen (Abb. 32) und -Immissionen (Abb. 33) sowie die Stickstoffeinträge (Abb. 35) für den Kanton Zug kartografisch im Hektarraster dargestellt.

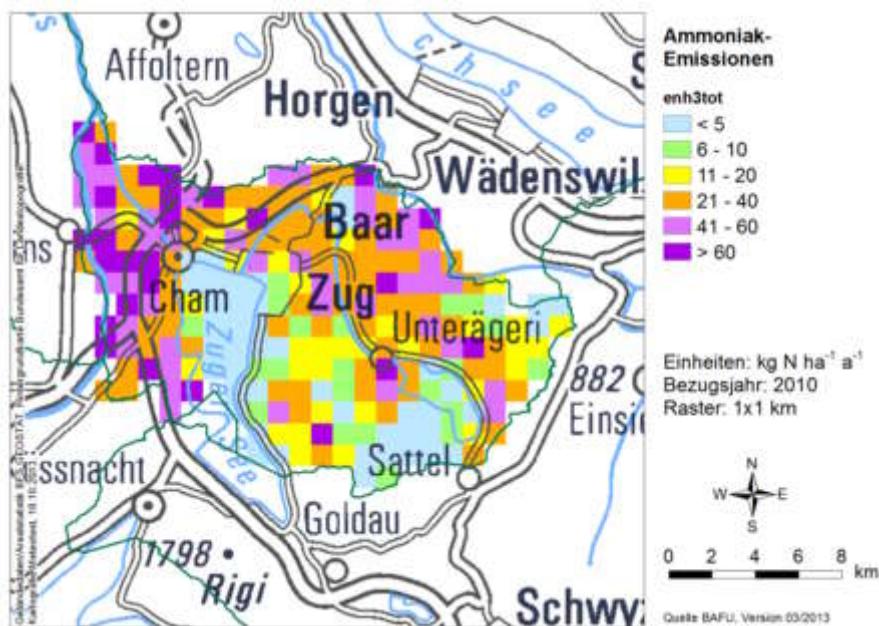
Abb. 31:
Ammoniakkonzentrationen (oben) und –
Stickstoffeinträge (unten) in der Schweiz;
Schadstoffkarten BAFU
2011



Ammoniak-Emissionen Kanton Zug

Die Abbildung 32 bestätigt die je nach Region und landwirtschaftlicher Aktivität sehr hohen Ammoniak-Emissionen im Kanton Zug.

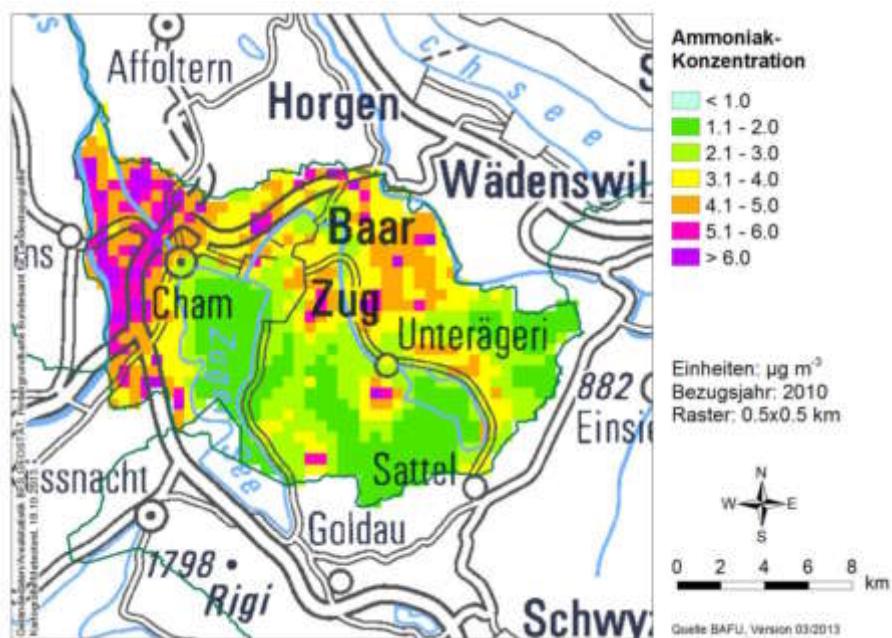
Abb. 32:
Ammoniak-Emissionen
2010, Kanton Zug



Ammoniak-Konzentrationskarte Kanton Zug

Die modellierten Immissionen von Ammoniak für den Kanton Zug zeigen dementsprechend ein ähnliches Bild der Belastung (Abb. 33).

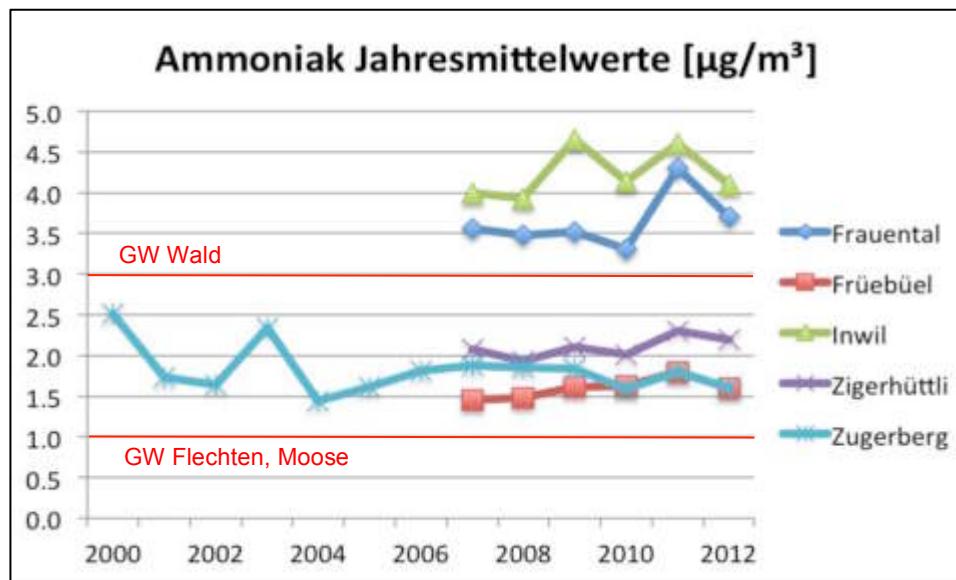
Abb. 33:
Ammoniak-
Konzentrationen 2010,
Kanton Zug



Ammoniak-Messungen mit Passivsammeln PS

Im Kanton Zug werden die modellierten Werte von Abbildung 33 durch Ammoniak-Messungen im Feld bestätigt. Besonders Ökosysteme wie Wälder, Moore, Trockenrasen reagieren äusserst empfindlich auf zu hohe Stickstoffbelastungen, was sich z. B. in Artenschwund, Versauerung, Windbruch oder Flechtenrückgang äussert. Zum Schutz von Ökosystemen gelten Critical Levels (international festgelegte Grenzwerte) für Ammoniak-Konzentrationen in der Luft. Im Kanton Zug werden an allen Passivsampler-Stationen diese Grenzwerte überschritten (3 µg/m³ für höhere Pflanzen; 1 µg/m³ für Flechten, Moose). An den besonders schutzwürdigen und empfindlichen Moorstandorten Zugerberg, Zigerhüttli und Früebüel wird der Richtgrenzwert von 1 µg/m³ deutlich überschritten (Abb. 34). Die Messungen in Zug und in der Zentralschweiz weisen auf eine gleichbleibend hohe Ammoniak-Belastung in den letzten zehn Jahren hin.

Abb. 34:
Ammoniak Jahresmittel
PS, Kanton Zug;
GW: Grenzwert

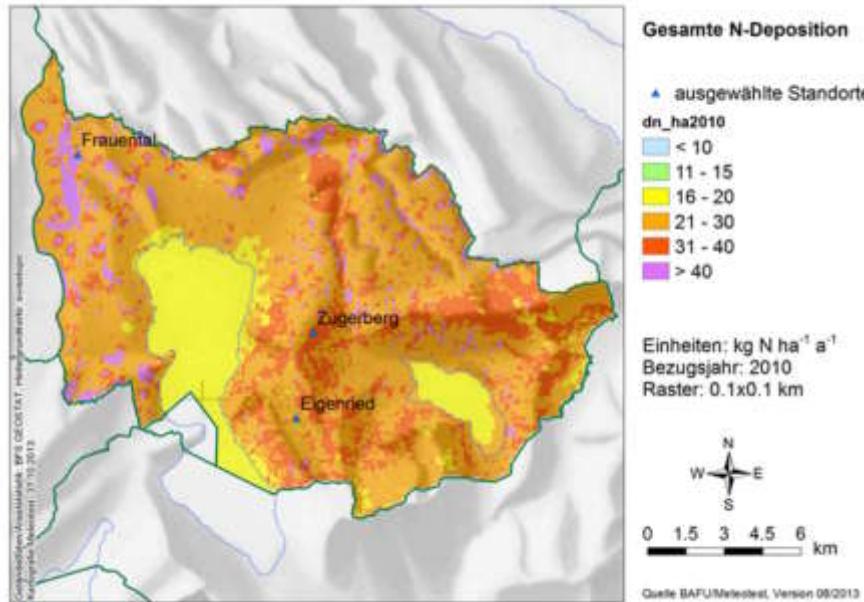


h) Stickstoffeinträge im Kanton Zug

Für den Kanton Zug hat Meteotest die gesamten Stickstoff-Depositionen berechnet und in einer Karte dargestellt. Auf dieser sind ausgewählte Ökosystem-Standorte eingetragen, die besonders empfindlich auf zu hohe Stickstoffeinträge reagieren (Abb. 35). Mit den Critical Loads werden kritische Eintragswerte definiert. Unterhalb dieser Werte sind keine Schädigungen an empfindlichen Ökosystemen zu erwarten. Die Critical Loads liegen z. B. für Hochmoore zwischen 5-10 kg N/ha/a, oder für Wald bei höchstens 20 kg N/ha/a.

Aus der Abbildung wird deutlich, dass z. B. auf dem Zugerberg mit seinen Moorflächen die Stickstoffeinträge grösser als 30 kg N/ha/a liegen. Verträglich wären für Flachmoore weniger als 25 kg N/ha/a.

Abb. 35:
Stickstoffeinträge 2010,
Kanton Zug



i) *Massnahmen gegen zu hohe Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft*

Die Kantone sind bei übermässigen Immissionen nach dem Bundesrecht (Umweltschutzgesetz, Luftreinhalte-Verordnung) verpflichtet, einen Massnahmenplan zu erstellen, der die Einhaltung der Immissions-Grenzwerte zum Ziel hat.

Die ZUDK und die Zentralschweizer Landwirtschaftsämter haben aus diesem Grund im Jahre 2010 das Ressourcenprojekt Zentralschweiz lanciert, das die Reduktion von Ammoniak aus der Landwirtschaft zum Ziel hat. Da dieses Programm auf Freiwilligkeit beruht, sind die gesetzten Ziele bislang nicht erreicht.

Deshalb und weil grosser Handlungsbedarf besteht, hat die Zuger Regierung 2013 verschiedene kantonale Amtsstellen mit der Ausarbeitung eines Massnahmenplanes beauftragt, der die Reduktion von Ammoniak bei der Ausbringung und Lagerung von Gülle, bei Tierställen sowie "softe" Massnahmen wie Informationskampagnen etc. vorsieht.

5. Schlussfolgerungen

Die Flechtenindikation erfasst die Gesamtbelastung der Luft im Kanton Zug: 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.

Die Firma inNet betreibt im Auftrag der sechs Zentralschweizer Kantone Luzern, Zug, Schwyz, Obwalden, Nidwalden und Uri das Luftpessnetz in-Luft. Dieses überregionale Messnetz überwacht 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 zeigt die Luftgütekarte jedoch nicht die erwartete Verbesserung der Verhältnisse gegenüber 2003 bzw. 1993 in den ehemaligen Belastungsgebieten. Vielmehr hat sich die Frequenzzahl der Flechtenarten (IAP18) auf hohen Belastungswerten nivelliert.

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 dies auch die Immissions- und Emissionsdaten des BAFU (2011 und 2009) zeigen. Je nach Standort werden die LRV-Immissionsgrenzwerte auch im Kanton Zug immer noch überschritten (ZUDK 2007).

Die Tendenzen der Emissionen, Immissionen und der Gesamtbelastung im Kanton Zug sind in Tabelle 3 dargestellt.

Die Flechten weisen von 1993 bis 2003 eine generelle Verschlechterung mit lokalen Verbesserungen und von 2003 bis 2013 eine Stagnation bzw. eine weitere leichte Verschlechterung der Verhältnisse aus. Diese Tendenz deckt sich mit den Emissions- bzw. Immissionsmessungen in dieser Zeitperiode für Stickstoffoxide, Feinstaub und Ozon. Die gleichbleibend hohen Belastungen durch Stickstoffoxide, Feinstaub und Ozon seit 2003 stellen für die Flechten eine chronische Belastung dar, welche sich offensichtlich negativ auf das Flechtenwachstum auswirkt.

Tab. 3:
Tendenzen von Emissionen, Immissionen und Gesamtbelastung

| Emissionen: | Tendenz 1993 bis 2003 | Tendenz 2003 bis 2013 |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| NO _x | ↓↑ | → |
| PM10 | ↓↑ | → |
| O ₃ | ↓↑ | → |
| Immissionen: | | |
| NO _x | ↓↑ | → |
| PM10 | ↓↑ | → |
| Ozon | → | → |
| Ammoniak | → | → |

| Flechtendaten: | Tendenz 1993 bis 2003 | Tendenz 2003 bis 2013 |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| Gesamtbelastung | → | ↑↓ |
| Nitroindex | ↓↑ | ↓↑ |
| Acidoindex | ↓↑ | → |

Ein Faktor für die anhaltend hohe flächige Gesamtluftbelastung ist möglicherweise die überdurchschnittliche Zunahme der Siedlungsfläche im Kanton Zug während der letzten Jahrzehnte (Abb. 36). Die Bautätigkeit bzw. die Vergrösserung der Siedlungsfläche ist im Kanton Zug deutlich grösser als im Mittelland (Arealstatistik 2013). Siedlungsräume mit einer deutlichen Flächen- bzw. Dichtezunahme (Risch, Hünenberg, Cham, Steinhäusen, Baar) liegen heute in der Zone mit starker Luftbelastung gemäss Flechtenkartierung. Etwas geringer ist die Zunahme in Zug; dieser Siedlungsraum liegt jedoch bereits 1993 in der Zone mit starker bzw. kritischer Luftbelastung.

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 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 auf einem hohen Niveau zu schwanken.

Die Resultate der Flechtenauswertung im Kanton Zug zeigen ähnliche Tendenzen wie die Untersuchungen in andern Gebieten der Schweiz.

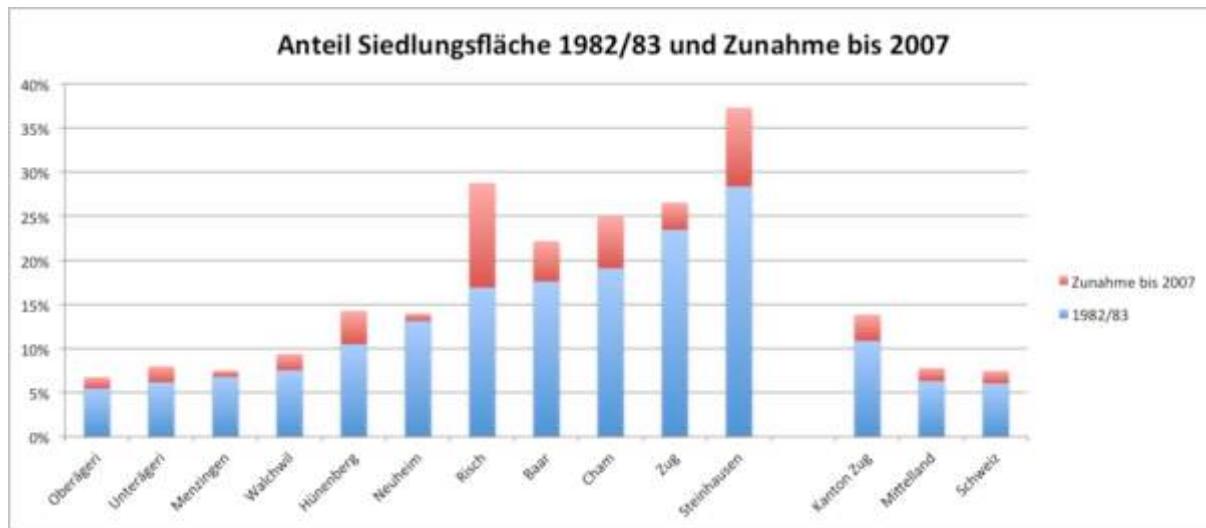


Abb. 36:
Siedlungsfläche und deren Zunahme zwischen 1982/83 und 2007

Die Nivellierung und Stagnierung der Belastung über das ganze Kantonsgebiet und der gleichzeitige Anstieg des Nitroindexes weisen auf eine steigende Bedeutung der Ammoniakbelastung für die Flechten hin.

Die Flechtenkartierung im Kanton Zug 2013 erweitert das biologische Messnetz von 1993 und 2003 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 kritischen Belastung zu eliminieren und die Zonen starker und mittlerer Gesamtbelastung reduziert werden sollten, die Zonen der geringen Belastung sind wieder auszudehnen.

Insbesondere müssen die Anstrengungen zur Reduktion der Ammoniakemissionen intensiviert werden, denn die starke Eutrophierung in der ganzen Schweiz ist verantwortlich für die Abnahme der Biodiversität. Besonders betroffen davon sind ökologisch wertvolle Gebiete wie zum Beispiel Moore im Kanton Zug.

Literatur

- BFS (2013) Arealstatistik: http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/-infothek/erhebungen__quellen/blank/blank/arealstatistik/01.html
- BAFU, Bundesamt für Umwelt (2009): Luftschadstoff- und Klimagasesmissionen 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.
- BAFU (2013): NABEL – Luftbelastung 2012. Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1324.
- 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.
- EKL, 2005: Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Status-Bericht der Eidg. Kommission für Lufthygiene (EKL). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL, Ed.), Schriftenreihe Umwelt Nr. 384, Bern, 168 S.
- FAL, IUL, FAT (1996): Ammoniakemissionen Schweiz. Bundesamt für Landwirtschaft BLW.
- inNet (2013): Entwicklung der Luftbelastung in der Zentralschweiz. Auswertung in-Luft-Messdaten von 1999 bis 2011. Zentralschweizer Umweltdirektionen ZUDK, Zug.
- inNet (2014): Ammoniak-Messbericht. Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2012, 73 S.
- 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.
- LRV (1985): Luftreinhalte-Verordnung, vom 16. Dezember 1985. SR 814.318.142.1
- OSTUFT (2004): Stickstoff-Depositionen in der Ostschweiz 1994 bis 2003.
- puls (1994): Luftqualitätsuntersuchungen mit Flechten im Kanton Zug. Amt für Umweltschutz des Kantons Zug.
- puls (2004): Flechten und Luftqualität im Kanton Zug: Wirkungskontrolle 2003. Amt für Umweltschutz des Kantons Zug.
- 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., Seitler E. (2013): Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz 2000 bis 2012. Messbericht. Im Auftrag des BAFU u. a. m., 56 S.
- Urech, M., Herzig, R. (1991): Flechten als Bioindikatoren: Integriertes biologisches Messsystem der Luftverschmutzung für das Schweizer Mittelland. *Bibliotheca Lichenologica* 43.
- 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. Infras, Zürich, 62 S.

Anhang: Daten der IAP18-Bäume

In der folgenden Tabelle sind für sämtliche 284 Trägerbäume der Erhebungen 2013 untenstehende Angaben enthalten:

- Obj. 2013: Objektnummer = Nummer des Trägerbaums 2013
Obj. 2003: Objektnummer = Nummer des Trägerbaums 2003
Obj. 1993: Objektnummer = Nummer des Trägerbaums 1993
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 2003: IAP18-Wert des Trägerbaums im Jahr 2003
IAP 1993: IAP18-Wert des Trägerbaums im Jahr 1993
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 parientina*
- 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.

