



Flechten und Luftqualität im Kanton Zug: Wirkungskontrolle 2023

im Auftrag des Amtes für Umwelt, Kanton Zug

20. Juni 2024

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

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| | Zusammenfassung | 3 |
| 1 | Einleitung und Ziele..... | 4 |
| 2 | Vorgehen | 6 |
| 3 | Luftgütekarten Primärschadstoffe | 9 |
| 3.1 | Luftbelastung Primärschadstoffe 2003, 2013 und 2023 | 9 |
| 3.2 | Differenzkarten Primärschadstoffe | 11 |
| 3.3 | Vergleich mit technischen Luftmessungen | 11 |
| 4 | Luftgütekarten Ammoniak | 13 |
| 4.1 | Luftbelastung Ammoniak 2003, 2013 und 2023 | 13 |
| 4.2 | Differenzkarten Ammoniak | 13 |
| 4.3 | Vergleich mit technischen Luftmessungen | 15 |
| 5 | Luftgütekarten Ozon | 17 |
| 5.1 | Luftbelastung Ozon 2003, 2013 und 2023..... | 17 |
| 5.2 | Differenzkarten Ozon..... | 17 |
| 3.3 | Vergleich mit technischen Luftmessungen | 19 |
| 6 | Flechten-Biodiversität..... | 21 |
| 7 | Fazit und Ausblick | 24 |
| 8 | Literatur | 27 |
| 9 | Anhang | 28 |
| 9.1 | Anhang 1: Daten | 28 |
| 9.2 | Anhang 2: Karten Primärschadstoffe..... | 34 |
| 9.3 | Anhang 3: Karten Ammoniak..... | 40 |
| 9.4 | Anhang 4: Karten Ozon | 46 |
| 9.5 | Anhang 5: Karten Flechten-Biodiversität | 52 |

Impressum

Auftraggeber: Amt für Umwelt Kanton Zug, Aabachstrasse 5, 6300 Zug,
Mirjam Halter, Peter Stofer

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

in Zusammenarbeit mit: Kathrin Peter, 3112 Allmendingen

Zitiervorschlag:

puls 2024: Flechten und Luftqualität im Kanton Zug: Wirkungskontrolle 2023.
Amt für Umweltschutz Kanton Zug. 48 S.

Zusammenfassung

Im Kanton Zug wurden 1993, 2003 und 2013 Flechtenuntersuchungen zur Beurteilung der Luftqualität durchgeführt. Die vorliegende Untersuchung wiederholt diese Erhebungen nach weiteren 10 Jahren. Sie erfasst die aktuellen Luftbelastungen sowie deren Veränderung in den letzten Jahrzehnten und dient als Wirkungskontrolle der seither erfolgten Massnahmen zur Luftreinhaltung.

Baumbewohnende Flechten sind empfindliche Zeiger der Luftverschmutzung. Die verwendete Flechtenindikationsmethode ist mit technischen Immissionsdaten kalibriert. Aus den Erhebungen resultieren drei Flechtenindices: Primärschadstoffe, Ammoniak und Ozon. Diese Indices werden als flächendeckende Luftgütekarten dargestellt. Aktuell liegen Luftgütekarten zu den Belastungen 2003, 2013 und 2023 sowie Differenzkarten zwischen diesen drei Zeitpunkten vor. Die Flechtenkarten weisen neun Stufen unterschiedlicher Belastungen der Schadstoffe aus. In den Differenzkarten werden sieben Stufen der Belastungsveränderung unterschieden.

Alle drei Flechtenindices zeigen seit 2003 einen Rückgang der Belastungen an. Deutlich ist dieser Rückgang bei den Primärschadstoffen und beim Ozon. Bei Ammoniak ging die Belastung insbesondere im landwirtschaftlich geprägten Teil des Untersuchungsgebiets (Rotkreuz-Cham) von einer hohen auf eine mittlere bis hohe Belastung zurück. Erhöhte Belastungen finden sich aktuell je nach Flechtenindex in unterschiedlichen Gebieten (Primärschadstoffe: Zentrum von Zug; Ammoniak: tiefer gelegene Gebiete; Ozon höher gelegene Gebiete).

Die Flechten-Biodiversität hat zwischen 1993 wie 2023 in grossen Teilen des Untersuchungsgebiets deutlich abgenommen. Dieser Befund steht in Übereinstimmung mit der Abnahme der Biodiversität in in vielen Lebensräumen der Schweiz.

Die anhand der Flechtenuntersuchungen festgestellten Verbesserungen der Luftqualität werden durch technische Immissionsmessungen in der Tendenz bestätigt. Diese Messungen zeigen für die Primärschadstoffe eine deutliche Abnahme der Schadstoffkonzentrationen. Auch rückläufig sind die Ozon-Belastungen, wohingegen die NH₃-Messungen nur geringfügige Belastungsänderungen anzeigen.

Diese Verbesserungen der Luftqualität sind die positiven Folgen der in den letzten Jahrzehnten getroffenen Massnahmen zur Luftreinhaltung. Zur Zeit werden die Massnahmenpläne zur Luftreinhaltung weiter umgesetzt; zusätzliche Verbesserungen der Luftqualität sind deshalb zu erwarten.

Auch zukünftig kann die Entwicklung der Luftbelastung anhand der Flechtenuntersuchung verfolgt werden. Die Flechtenindikationsmethode macht die Luftbelastung sichtbar und erfasst diese flächendeckend über ein grösseres Gebiet. Sie zeigt die Wirkung der Belastungen an und ist damit näher beim Menschen als technische Messungen. Aus diesen Gründen ist die Flechtenindikationsmethode neben der Erfolgskontrolle auch gut für die Öffentlichkeitsarbeit geeignet.

1. Einleitung und Ziele

Flechten als Bioindikatoren

Baumbewohnende Flechten sind empfindlich gegenüber Luftschadstoffen. Deshalb sind sie als Zeiger der Luftverschmutzung geeignet. 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 Flechtenindikationsmethode (siehe Kap. 2) bietet die Möglichkeit, die Luftbelastungen grossflächig und flächendeckend abzubilden.

Bisherige Untersuchungen

Der Kanton Zug hat eine langjährige Erfahrung mit Flechten als Bioindikatoren zur Beurteilung der Luftbelastung: Untersuchungen wurden in einem 10-Jahresrhythmus in den Jahren 1993, 2003 und 2013 durchgeführt (puls 2014). Hauptresultat dieser Untersuchungen sind Flechten-Luftgütekarten. Anhand dieser Karten konnten wichtige Erkenntnisse über die räumliche Struktur, über wesentliche Quellen und über die Entwicklung der Luftbelastung gewonnen werden. Mit der vorliegenden Untersuchung 2023 wird der 10-Jahresrhythmus der Flechtenuntersuchungen weitergeführt.

Wirkungskontrolle 2023

Die vorliegende Untersuchung wiederholt die Flechtenerhebungen im Kanton Zug, so dass die Entwicklung der Luftbelastung räumlich differenziert in 10-Jahresperioden aufgezeigt werden kann. Die Erhebung 2023 erfolgt nach derselben Methode wie die drei vorangehenden Untersuchungen.

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.

Ziele

Die Wiederholung der Flechtenuntersuchung dient der Wirkungskontrolle der in den letzten dreissig Jahren erfolgten lufthygienischen Massnahmen. Sie gibt Auskunft über die heutige Luftqualität und deren Veränderung in den letzten Jahrzehnten. Folgende Teilziele sollen die Wirkungsweise der durchgeführten lufthygienischen Massnahmen im Kanton Zug aufzeigen:

- Die Flechtenkartierungen von 1993, 2003 und 2013 sollen wiederholt werden, die Daten sollen analog zu den früheren Untersuchungen erhoben und ausgewertet werden.
- Der jetzige Zustand der Luftqualität soll analysiert und interpretiert werden. Die Luftbelastung 2023 wird mit Flechten als Bioindikatoren räumlich differenziert erfasst und in Form von Luftgütekarten für Primärschadstoffe, Ammoniak und Ozon dargestellt.
- Die Entwicklung der Luftqualität soll erfasst und interpretiert werden. Die Veränderung der Immissionssituation von 2003 bis 2023 wird in Form von Differenzkarten für Primärschadstoffe, Ammoniak und Ozon abgebildet.
- Der Vergleich zwischen Flechtenkarten und technischen Immissionsdaten soll zur Interpretation der biologischen Ergebnisse beitragen.
- Die Untersuchungsergebnisse sollen so dokumentiert werden, 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 Erfolg der Luftreinhaltung im Kanton Zug

2. Vorgehen

Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms 14 «Lufthaushalt und Luftverschmutzung in der Schweiz» wurde an 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. Diese Methode wurde seither in vielen Städten und Kantonen der Schweiz angewandt.

Die Methode basiert auf einer einmaligen Auszählung der Vielfalt und Häufigkeit der Flechten auf ausgewählten, freistehenden Laubbäumen. Dabei muss keinerlei Material entnommen werden, die Flechten bleiben unverseht. Die Methode erfasst die Flechtenvegetation innerhalb einer standardisierten Aufnahme­fläche am Baum. Diese ist durch ein Gitter begrenzt (Abb. 1). Zur Ermittlung der Häufigkeit einer bestimmten Flechtenart oder -artengruppe werden die Felder im Gitter gezählt, in denen diese auftritt. Die so ermittelte Frequenzzahl der Art kann einen Wert zwischen 0 (d. h. die Art ist nicht vorhanden) und 10 (d. h. die Art ist in allen Feldern vorhanden) annehmen.



Abb. 1:
Baum Nr. 803 mit
Frequenzgitter

Bis 2013 basierte die kalibrierte Flechtenindikationsmethode auf dem Luftgütewert IAP18 (Index of Atmospheric Purity). Dieser wurde vor über 30 Jahren mit technischen Immissionsmessungen kalibriert und gab Auskunft über eine Gesamtbelastung der Luft. Er berechnet sich als Summe aller Flechten-Frequenzzahlen an einem Baum. Aus den Untersuchungen resultierte eine Karte mit fünf Zonen unterschiedlicher Gesamtluftbelastung.

Aufgrund erfolgreicher Sanierungsmassnahmen hat sich die Luftqualität in den letzten Jahrzehnten deutlich verbessert und die Zusammensetzung der Luftschadstoffe stark gewandelt. Deshalb wurde die Flechtenindikationsmethode im Auftrag mehrerer Kantone neu kalibriert (AGB et al. 2018, Herzig

et al. 2020). Es resultierten drei neue auf einzelne Immissionskomponenten kalibrierte Flechtenindices:

- Primärschadstoff-Flechtenindex; kalibriert mit NO₂, SO₂ und PM10
- Ammoniak-Flechtenindex; kalibriert mit NH₃
- Ozon-Flechtenindex; kalibriert mit AOT40 (Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40 Parts Per Billion / kumulierte Stundenwerte über 40 ppb)

Diese Flechtenindices zeigen eine gute Übereinstimmung zu modellierten Immissionsdaten. Neben gesamtschweizerischen Indices wurden auch regionalisierte Flechtenindices gebildet, welche eine noch höhere Übereinstimmung zu den Immissionsdaten aufweisen. So gelangen im Kanton Zug die regionalisierten Indices für die Zentralschweiz zur Anwendung.

2019 wurden die Zuger Flechtenkarten 2003 und 2013 für die drei neu entwickelten Flechtenindices erstellt, welche über den jeweiligen Stand der Luftbelastung Auskunft geben (puls 2019). Zudem wurden Differenzkarten erarbeitet, welche die Belastungsveränderung in der jeweiligen Zeitperiode zeigen.

Analog zu diesem Vorgehen wurden die Flechtendaten 2023 ausgewertet: Für die drei neu entwickelten Flechtenindices werden aktuelle Flechtenkarten und Differenzkarten zu den Karten 2003 und 2013 erstellt. Gültig ist diese Auswertungsmethode für Daten ab etwa 2000; ältere Daten führen nicht zu sinnvollen Ergebnissen. Deshalb konnten die Zuger Flechtenuntersuchungen von 1993 nicht in die vorliegenden Auswertungen zu den Flechtenindices einbezogen werden.

Die Flechtenwerte sind so normiert, dass Werte zwischen 0 und 1 resultieren. Dieser Wertebereich wird in den Flechtenkarten durch neun Stufen der Luftbelastung mit identischer Stufenbreite von 0.11 dargestellt, die Stufen reichen von „höchste Belastung“ bis „tiefste Belastung“ (Abb. 2).

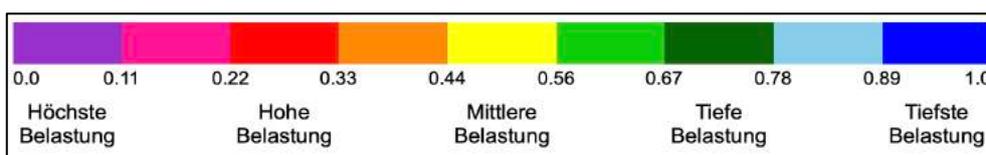


Abb. 2:
Belastungsstufen in
den Luftgütekarten

Zur Darstellung der Belastungsveränderung wird aus den Flechtenwerten 2003 und 2013 die Differenz berechnet. Die Werte liegen meist zwischen etwa -0.4 und +0.4. Um den Wert Null wird eine Zone «keine wesentliche Veränderung» definiert. Die Stufenbreite in der Differenzkarte beträgt 0.1; so weist die Differenzkarte folgende sieben Stufen auf (Abb. 3):

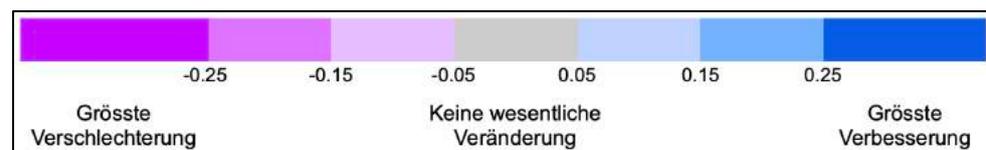


Abb. 3:
Veränderungsstufen in
den Differenzkarten

Die Flechtenwerte der einzelnen Bäume werden in Gruppen von in der Regel fünf Bäumen zu einem Mittelwert verrechnet. Die Baumgruppen wurden innerhalb von geographisch einheitlichen Räumen, den sogenannten Georäumen, gebildet. Durch die ähnlichen geographischen Bedingungen innerhalb

eines Georaums darf dort mit einer vergleichbaren Wirkung der Gesamtluftbelastung auf die Flechten gerechnet werden.

Die Flechtenwerte dieser Georäume sind die Grundlage für die Flechtenkarten. Isolinien gleicher Flechtenwerte unterteilen die Karte in die neun Belastungsstufen. Die Grenzen zwischen den einzelnen Zonen der Belastungsstufen werden durch lineare Interpolation zwischen den Georaumwerten hergeleitet. In einem ersten Schritt wird dazu eine automatische Isolinienberechnung mit der Software R (Pakete akima und XLConnect) vorgenommen. Anschliessend werden diese Isolinien im GIS händisch optimiert: Kleinstflächen von unter 1 km² wurden in der Regel weggelassen und der Linienverlauf vereinfacht und geglättet.

Das Untersuchungsgebiet 2023 ist mit demjenigen von 2013 identisch. Insgesamt wurden die Flechten an 284 Bäumen auf einer Fläche von rund 50 km² erhoben. Nach Möglichkeit wurden die gleichen Bäume wie 2013 untersucht. Von den 284 damals kartierten Bäumen mussten 98 (35%) ersetzt werden, da sie gefällt, im Bestand eingewachsen oder aus anderen Gründen für die Erhebung nicht mehr geeignet waren. Anhang 1 enthält die Flechtendaten sämtlicher 2023 untersuchten Bäume.

3. Luftgütekarten Primärschadstoffe

Der Primärschadstoff-Flechtenindex basiert auf den drei Primärschadstoffen Stickstoffdioxid (NO₂), Schwefeldioxid (SO₂) und Feinstaub (PM10). NO₂ und SO₂ entstehen hauptsächlich bei Verbrennungsprozessen. Hauptquellen sind der motorisierte Strassenverkehr und Feuerungsanlagen (Siedlung und Industrie). PM10 ist ein Mass für die Feinstaubbelastung (Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 0,01 Millimetern). Feinstaub entsteht ebenfalls bei Verbrennungsprozessen (Verkehr, Feuerungen, insb. Holzfeuerungen), aber auch durch Abrieb von Reifen und Bremsen sowie durch Aufwirbelung von Staub (Verkehr, Bau- und Landwirtschaft).

Abbildung 4 (folgende Seite) enthält eine Übersicht über alle sechs Luftgütekarten zu den Primärschadstoffen (drei Belastungskarten und drei Differenzkarten). Diese Karten sind im Anhang 2 zusätzlich in einem grösseren Massstab abgebildet.

3.1 Luftbelastung Primärschadstoffe 2003, 2013 und 2023

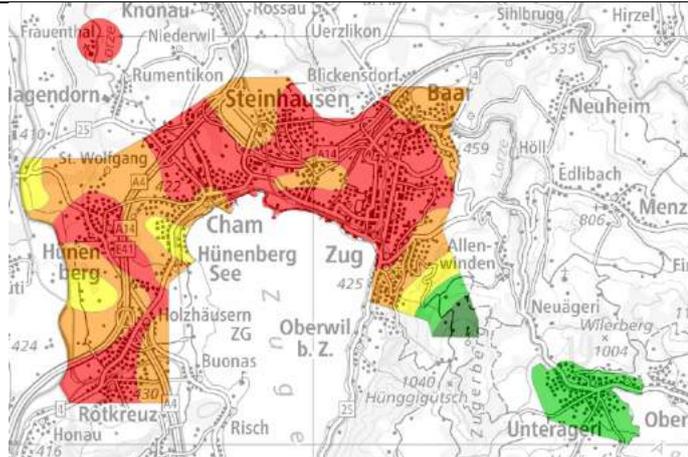
Die Karte der Primärschadstoffbelastung **2003** (Abb. 4a, Anhang 2a) reicht von einer tiefen (dunkelgrüne Zone) bis zu einer hohen Belastung (rote Zone), wobei die hohe Belastung fast die Hälfte der gesamten untersuchten Fläche ausmacht. Tiefe Luftbelastungen (grün) finden sich auf dem Zugerberg und in Unterägeri. Vier kleinere Flächen weisen eine mittlere Belastung auf (gelb); westlich (Zollweid), südlich (Meisterswil) und östlich (Hünenberg See) von Hünenberg sowie am Zugerberg. Die übrigen Gebiete zeigen eine hohe Belastung und sind auf der Karte orange und rot eingefärbt.

Die Belastung der Primärschadstoffe **2013** (Abb. 4b, Anhang 2b) reicht von einer hohen bis mittleren Belastung (orange) bis zu einer sehr tiefen Belastung (hellblau). Die Karte zeigt somit eine klare Verbesserung der Luftbelastung gegenüber 2003. Dominant ist nun eine mittlere Luftbelastung (gelb). Der Zugerberg und Unterägeri weisen eine sehr tiefe Belastung auf (hellblau). Die schlechtesten Werte finden sich im Gebiet zwischen Steinhausen und Baar mit einem Ausläufer bis ins Zentrum von Zug (orange).

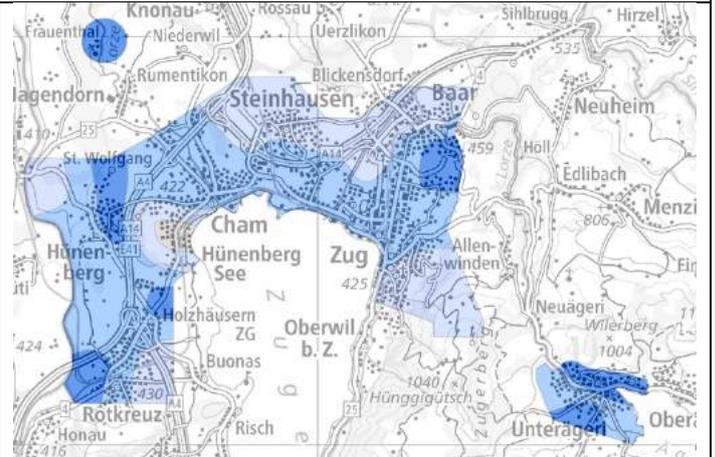
Die beiden etwas ausserhalb liegenden Gebiete Raten und Schwand (nordöstlich von Menzingen) sowie auch Frauenthal weisen eine tiefe Belastung auf (hell- und dunkelgrün).

2023 weist die Karte der Primärschadstoffbelastung fast nur noch mittlere bis tiefe Belastungen auf (gelbe und grüne Zonen; Abb. 4c, Anhang 2c). Ausnahme bildet das Zentrum von Zug, welches einer mittleren bis hohen Belastungsstufe angehört (orange). Es sind keine Gebiete mit einer sehr tiefen Belastung mehr vorhanden (hellblau). Die tiefsten Belastungen sind nach wie vor in den höheren Regionen am Zugerberg, in Unterägeri, am Raten und nordöstlich Menzingen (Schwand) zu finden.

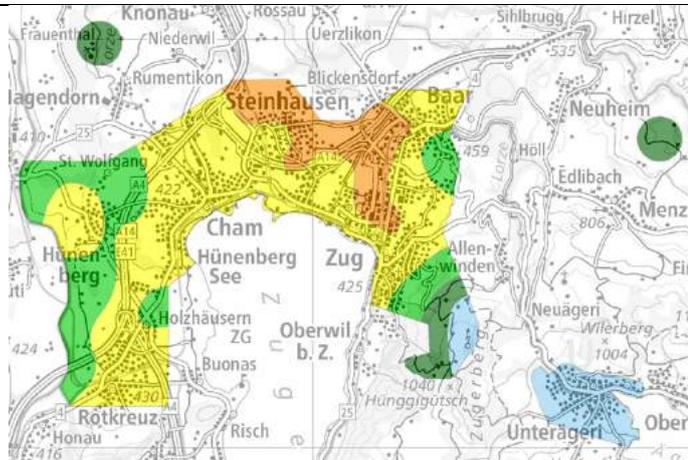
a) Luftbelastung 2003



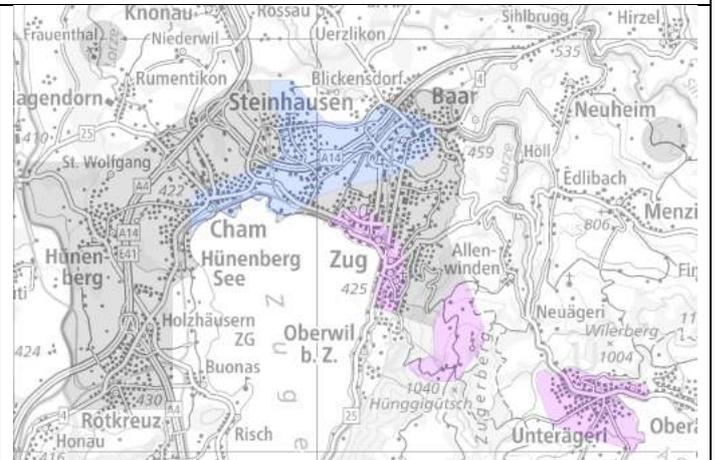
d) Differenz 2003 - 2013



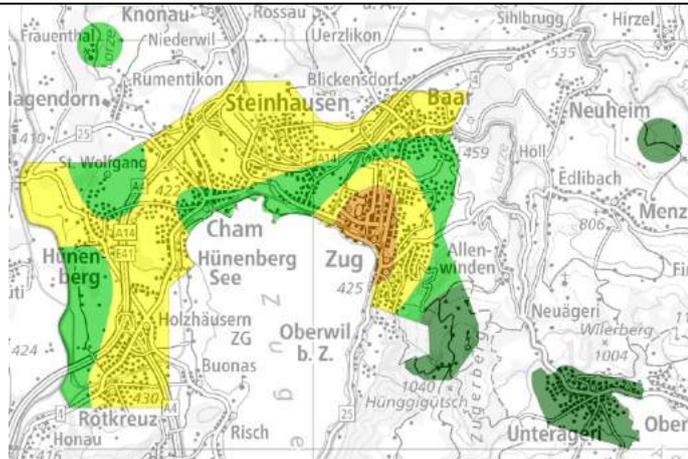
b) Luftbelastung 2013



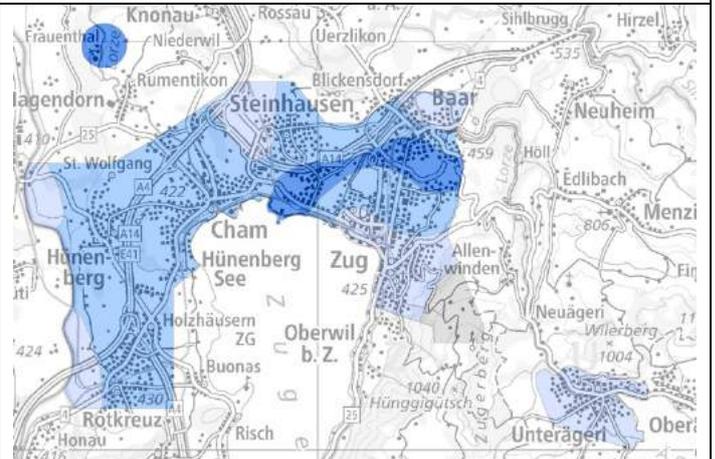
e) Differenz 2013 - 2023



c) Luftbelastung 2023



f) Differenz 2003 - 2023



- tiefste Belastung
- tiefe Belastung
- mittlere Belastung
- hohe Belastung
- höchste Belastung

- grösste Verbesserung
- keine wesentliche Veränderung
- grösste Verschlechterung

3.2 Differenzkarten Primärschadstoffe

Die Primärschadstoffbelastung hat sich von **2003 bis 2013** (Abb. 4d, Anhang 2d) wesentlich verbessert. Die Karte wird von blauen Zonen, d.h. von Verbesserungen, dominiert. Einzig eine kleine Fläche in Hünenberg See hat sich nicht wesentlich verändert (grau); sie weist auch nach zehn Jahren noch eine mittlere Belastung auf. Zonen mit besonders grossen Verbesserungen (dunkelblau) finden sich in Frauenthal, Hünenberg, Holzhäusern, Rotkreuz, Inwil und Unterägeri.

In der Differenzkarte **2013 bis 2023** (Abb. 4e, Anhang 2e) herrscht die Zone ohne wesentliche Belastungsveränderungen vor (graue Zone). Daneben kommen noch Gebiete mit einer Belastungsverbesserung respektive -verschlechterung vor, beide Zonen in ähnlicher Flächenausdehnung. Leicht verschlechtert hat sich die Luftbelastung im Zentrum von Zug, auf dem Zugerberg und in Unterägeri (hellviolette Zone), leicht verbessert im Gebiet Cham - Steinhausen - Baar (hellblaue Zone).

Die Differenzkarte **2003 bis 2023** (Abb. 4f, Anhang 2f) – als Summe der beiden vorangehenden Differenzkarten – zeigt für grosse Teile des Untersuchungsgebiets eine wesentliche Verbesserung der Primärschadstoffbelastung. Einzig der Zugerberg verzeichnet keine wesentliche Veränderung; dort hat die Belastung zwischen 2003 und 2013 leicht abgenommen, zwischen 2013 und 2023 dann wieder leicht zugenommen. Die grösste Verbesserung weist ein Gürtel vom Gebiet Choller an der Einmündung der alten Lorze in den Zugersee über Riedmatt und die Lorzenebene nach Baar und Inwil sowie die punktuelle Untersuchung in Frauenthal auf.

3.3 Vergleich mit technischen Luftmessungen

Die Kalibration des Flechtenindex' Primärschadstoffe erfolgte mit Immissionsdaten der drei Schadstoffen NO₂, SO₂ und PM10 (siehe Kap. 2). Zum Vergleich der Flechtenresultate mit den technischen Daten werden deshalb Immissionsdaten dieser Schadstoffe herangezogen, soweit diese im Kanton Zug gemessen werden: Dies sind kontinuierliche Messungen von NO₂ und PM10 an der Station Postplatz in Zug sowie NO₂-Passivsammlermessungen an mehreren Messtationen im ganzen Kanton (in-luft.ch 2000ff).

Alle diese Messungen bestätigen die Abnahme der Primärschadstoff-Belastung von 2003 bis 2023, wie sie von den Flechten angezeigt wird. Am Postplatz in Zug sind in der Untersuchungsperiode sowohl die NO₂-Werte (Abb. 5) wie auch die PM10-Werte (Abb. 6) deutlich gesunken. Abbildung 7 enthält die über mehrere Zuger NO₂-Passivsammlerstandorte gemittelten Jahresmittelwerte¹. Auch diese Messungen zeigen eine deutliche Abnahme der NO₂-Belastung in der Untersuchungsperiode.

Für SO₂ liegen im Kanton Zug keine Immissionsmessungen vor. Die Erhebungen im nationalen NABEL-Messnetz zeigen, dass die SO₂-Belastung in der Schweiz in diesem Jahrhundert nur noch minimal ist. Allerdings war sie 2003 noch etwas höher als 2023; diese Abnahme der SO₂-Belastung ist ebenfalls gleichläufig mit den Flechtenergebnissen.

¹ Zur Berechnung dieser Werte wurden Jahresmittelwerte derjenigen Stationen beigezogen, welche vollständige NO₂-Messreihen von 2000 bis 2022 aufweisen. Es sind dies acht Stationen: Baar-Inwil, Cham-Dugglimatt, Cham-Frauenthal, Rotkreuz-Gemeindehaus, Rotkreuz-Holzhäusern, Unterägeri-Lorzenstrasse, Walchwil-Bahnhofplatz, Zug-Neugasse. Datenquelle: inluft.ch

Abb. 5:
NO₂ an der Station
Zug Postplatz;
LRV: Jahresmittel-
grenzwert der Luftrein-
halteverordnung LRV

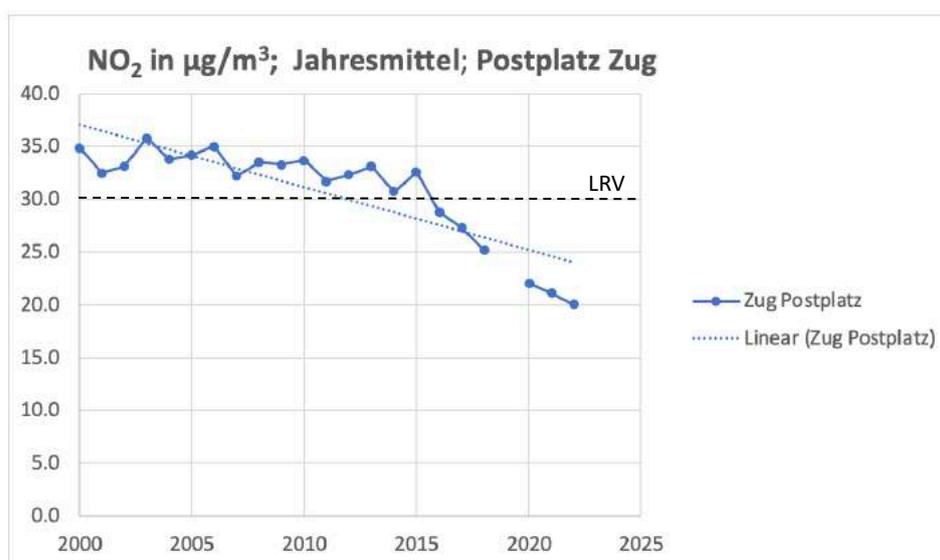


Abb. 6:
PM₁₀ an der Station
Zug Postplatz;
LRV: Jahresmittel-
grenzwert der Luftrein-
halteverordnung LRV

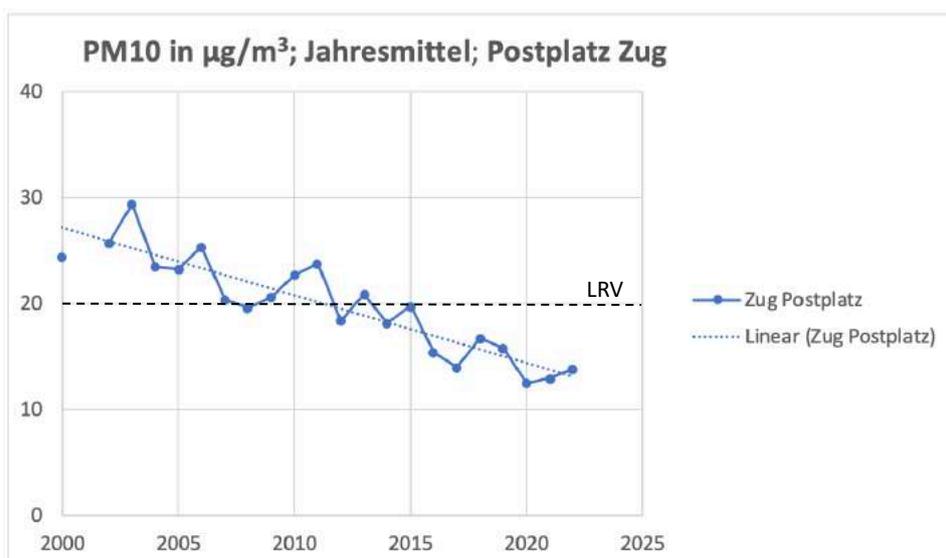
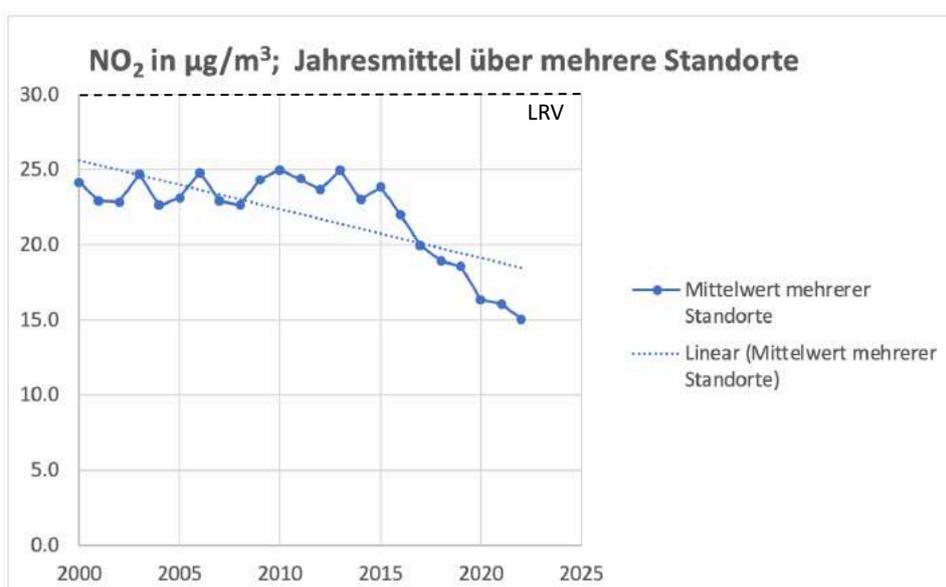


Abb. 7:
NO₂: gemittelte Werte
mehrerer Passiv-
sammlerstandorte im
Kanton Zug



4. Luftgütekarten Ammoniak

Ammoniak stammt hauptsächlich aus der Nutztierhaltung der Landwirtschaft. Es entsteht insbesondere beim Ausbringen und Lagern von Gülle und Mist.

Abbildung 8 (folgende Seite) enthält eine Übersicht über alle sechs Luftgütekarten zum Flechtenindex Ammoniak (drei Belastungskarten und drei Differenzkarten). Diese Karten sind im Anhang 3 zusätzlich in einem grösseren Massstab abgebildet.

4.1 Luftbelastung Ammoniak 2003, 2013 und 2023

Grosse Teile der Karte **2003** (Abb. 8a, Anhang 3a) weisen eine mittel bis hohe oder hohe Ammoniak-Belastung auf (orange und rote Zone). Nur die Stadt Zug, der Zugerberg und der westliche Teil von Unterägeri sind mittel oder tiefer belastet (gelbe und hellgrüne Zone). Im westlichen Kantonsteil (Cham-Hünenberg-Rotkreuz) ist die Belastung durchschnittlich höher (rote Zone) als im Gebiet um Steinhausen und Baar (orange Zone). Im westlichen Teil sind es insbesondere die eher landwirtschaftlich geprägten Gebiete, welche hohe Belastungen aufweisen (rote Zone).

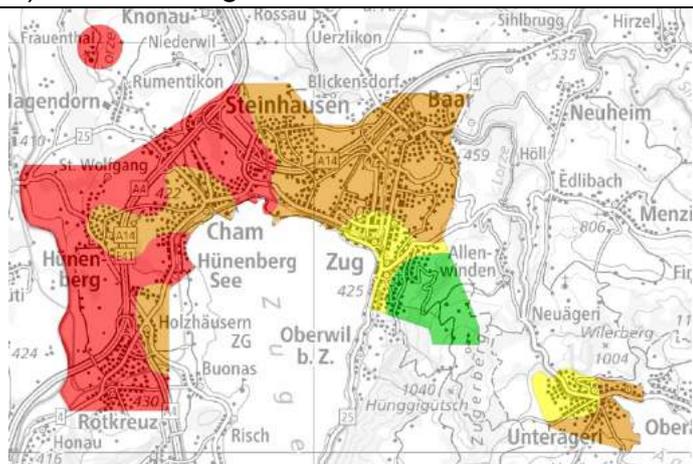
Auch **2013** (Abb. 8b, Anhang 3b) dominieren mittel bis hohe und hohe Ammoniak-Belastungen im Untersuchungsgebiet (rote und orange Zone). Grössere Gebiete gehören nun zur mittleren Belastung (gelbe Zone), dazu zählen Unterägeri und die Gebiete rund um Zug. Das Stadtzentrum von Zug weist jetzt eine eher hohe Belastung auf (orange Zone). Eine tiefe Belastung ist nur auf dem Zugerberg, am Hang des Zugerbergs und an den beiden punktuell untersuchten Stationen Raten und nordöstlich von Menzingen (Schwand) feststellbar (grüne Zonen).

2023 (Abb. 8c, Anhang 3c) überwiegen immer noch die Gebiete mit mittel bis hoher Ammoniak-Belastung (orange Zone). Hohe Belastungen (rote Zone) finden sich noch nördlich von Rotkreuz, mittlere Belastungen haben sich räumlich etwas ausgedehnt (gelbe Zone). Tiefere Belastungen sind auf dem Zugerberg, in Unterägeri und auf dem Raten zu finden (grüne Zonen).

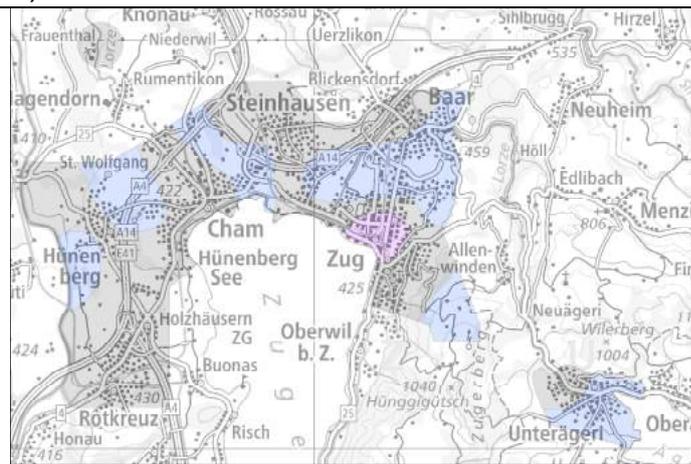
4.2 Differenzkarten Ammoniak

Von **2003 bis 2013** (Abb. 8d, Anhang 3d) hat sich die Ammoniak-Belastung nur wenig verändert, grosse Teile des Untersuchungsgebiets werden von der grauen Zone ohne wesentliche Belastungsveränderungen bedeckt. Nur im Zentrum von Zug ist die Ammoniak-Belastung etwas angestiegen (hellviolette Zone). In einigen landwirtschaftlich geprägten Gebieten sowie am Zugerberg und im östlichen Teil von Unterägeri ist die Ammoniak-Belastung leicht gesunken (hellblaue Zone).

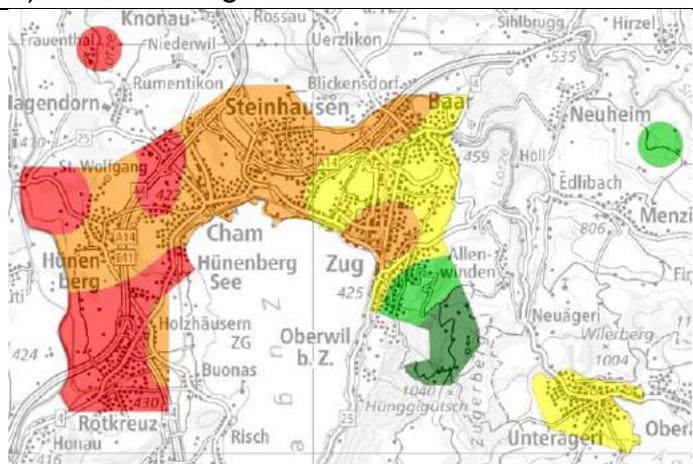
a) Luftbelastung 2003



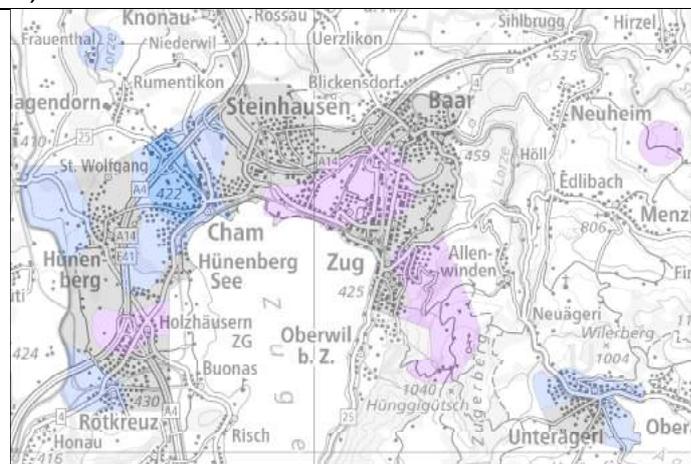
d) Differenz 2003 - 2013



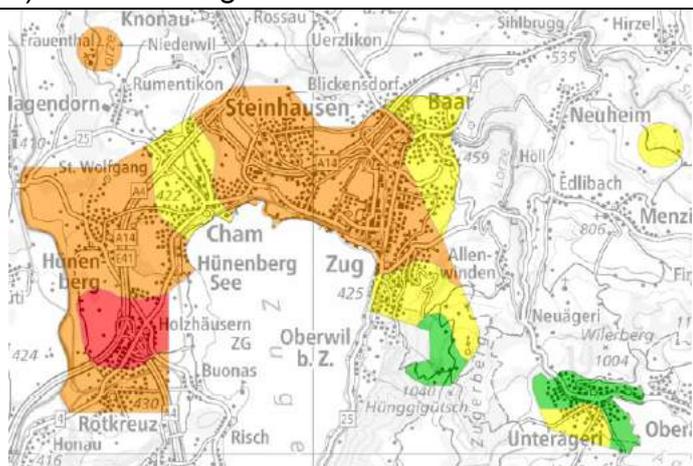
b) Luftbelastung 2013



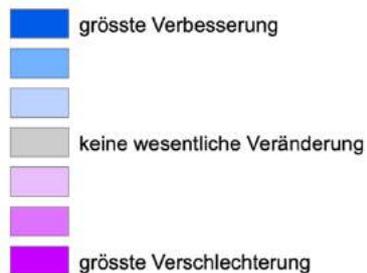
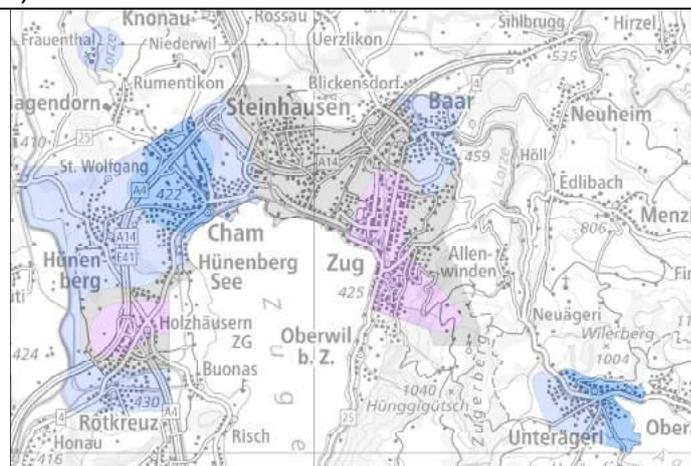
e) Differenz 2013 - 2023



c) Luftbelastung 2023



f) Differenz 2003 - 2023



In der Differenzkarte **2013 bis 2023** (Abb. 8e, Anhang 3e) sind Gebiete ohne wesentliche Änderung (grau), mit einer geringen Zunahme (hellviolett) und einer geringen Abnahme (hellblau) der Ammoniak-Belastung etwa zu gleichen Teilen vertreten. Leicht abgenommen hat die Belastung in westlichen Teilen des Untersuchungsgebiets (Cham, westlich von Rotkreuz und westlich von Hünenberg), leicht zugenommen hat sie nördlich von Rotkreuz in der Lorzenebene, am Hang des Zugerbergs sowie nordöstlich von Menzingen.

Die Differenzkarte **2003 bis 2023** (Abb. 8f, Anhang 3f) – als Summe der beiden vorangehenden Differenzkarten – enthält mehr Gebiete mit einer Abnahme der Ammoniak-Belastung (blaue Zonen) als einer Zunahme (violette Zonen). Insbesondere im westlichen Teil des Untersuchungsgebiets, welches landwirtschaftlich geprägt ist, hat die Ammoniak-Belastung abgenommen – mit Ausnahme der Fläche nördlich von Rotkreuz, dort hat die Belastung leicht zugenommen. Abgenommen hat die Ammoniak-Belastung auch in Baar und Unterägeri, zugenommen hat sie in Zug und am Hang des Zugerbergs.

4.3 Vergleich mit technischen Luftmessungen

Der Flechtenindex Ammoniak wurde mit NH_3 -Immissionsdaten kalibriert (siehe Kap. 2), die Flechtenresultate werden deshalb mit technisch gemessenen NH_3 -Daten verglichen (Abb. 9). Im Kanton Zug liegen NH_3 -Daten von acht Immissionsmessstationen vor (inNET Monitoring AG 2023). Im Flechten-Untersuchungsgebiet und dessen näheren Umgebung liegen folgende vier Stationen, deren Daten für den Vergleich verwendet werden: Niederwil (Mittelwert der drei nahe beieinander liegenden Stationen ZG01, ZG02 und ZG03; Messungen 2010-2022), Inwil (2007-2022), Frauenthal (2007-2022) und Zugerberg (2000-2022).

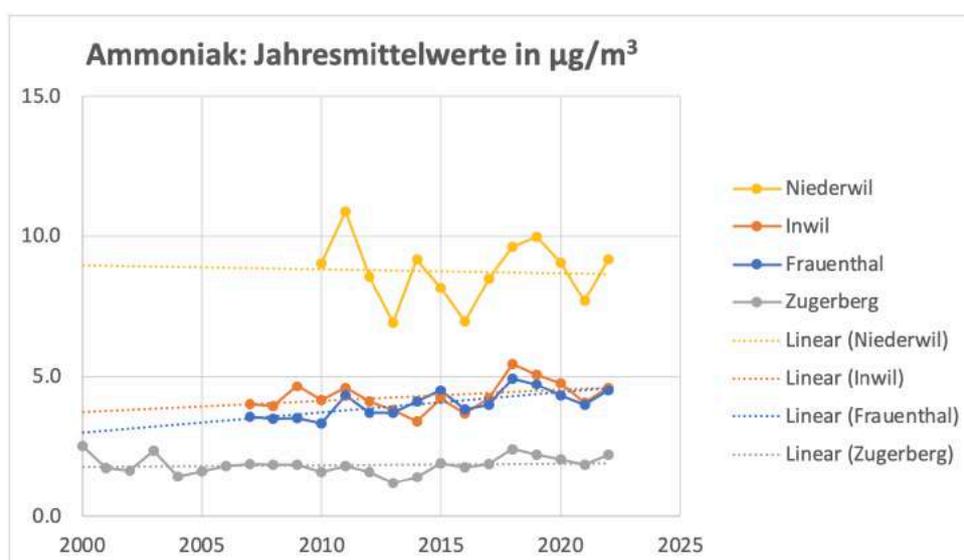


Abb. 9:
Ammoniak: Jahresmittelwerte an vier Stationen im Kanton Zug

Über die Messperiode hat sich die technisch gemessene NH_3 -Belastung nur wenig verändert. An der Station Niederwil, welche die Belastung inmitten von intensiver Landwirtschaft misst, ist die Belastung minimal rückläufig. An den beiden Stationen Frauenthal und Inwil ist sie leicht ansteigend und auf dem Zugerberg, mit der längsten Messreihe, ist sie gleichbleibend tief.

Der Flechtenindex Ammoniak stimmt in der Tendenz mit diesen Messungen überein. Die landwirtschaftlich geprägten Gebiete weisen auch bei den Flechtenkarten höhere Belastungen aus als die übrigen Teile des Untersuchungsgebiets. Die niedrigsten Belastungen sind auch hier auf dem Zugerberg zu finden.

Wie die technischen Messungen zeigen auch die Flechtenkarten nur geringfügige Veränderungen der NH_3 -Belastung an. Allerdings stimmen die Resultate an den Messstationen nicht immer vollständig überein. So zeigen die Flechten beispielsweise für das Gebiet Frauenthal eine geringe Verbesserung an, während die technischen Messungen eine leichte Verschlechterung ausweisen.

Die beiden Messverfahren unterscheiden sich unter anderem in ihrem räumlichen Messkonzept; die technischen Messungen erfolgen an einem Punkt, die Flechtenkarten basieren auf räumlich interpolierten Daten von mehreren Baumstandorten. Dieser Unterschied kann zu Differenzen in den Belastungsanzeigen führen. Ammoniak weist höhere Belastungsgradienten in Abhängigkeit von der Emissionsdistanz auf als andere Schadstoffe. Deshalb sind bei Ammoniak grössere Differenzen bei den Belastungsanzeigen der beiden Messverfahren möglich. Sehr hohe NH_3 -Belastungen in unmittelbarer Emittentennähe, wie beispielsweise an der Messstation Niederwil, werden deshalb durch die Flechtenkarten nur teilweise abgebildet.

5. Luftgütekarten Ozon

Ozon bildet sich bei Sonneneinstrahlung aus Sauerstoff und den Vorläuferstoffen Stickoxiden (NO_x) sowie den flüchtigen organischen Verbindungen (VOC). NO_x stammen aus Verbrennungsprozessen (Verkehr, Siedlung, Industrie), VOC aus industriellen und gewerblichen Prozessen.

Abbildung 10 (folgende Seite) enthält eine Übersicht über alle sechs Luftgütekarten zum Flechtenindex Ozon (drei Belastungskarten und drei Differenzkarten). Diese Karten sind im Anhang 4 zusätzlich in einem grösseren Massstab abgebildet.

5.1 Luftbelastung Ozon 2003, 2013 und 2023

Die Karte der Ozonbelastung **2003** (Abb. 10a, Anhang 4a) weist für das Untersuchungsgebiet Zonen aus fünf Belastungsstufen aus. Diese reichen von einer leichten Belastung (hellgrün) bis zu einer sehr hohen Ozonbelastung (pink). Die am stärksten belasteten Gebiete (pinke und rote Zone) sind der Zugerberg und Unterägeri. Im Gegensatz dazu gibt es im Flachland drei Flächen mit einer leichten Belastung (hellgrün): bei Hünenberg, bei Cham sowie westlich und nördlich von Zug. Dominant ist die mittlere Belastung (gelb), welche grosse Teile des Untersuchungsgebietes einnimmt.

Die Karte **2013** (Abb. 10b, Anhang 4b) wird durch tiefe Belastungen charakterisiert (grüne Zonen). Nur noch rund um Unterägeri wird eine hohe Belastung (rote Zone) festgestellt. Unterägeri selbst und der Zugerberg sind etwas weniger stark belastet (orange Zone). Inwil und der Hang des Zugerbergs weisen je eine mittlere Belastung (gelbe Zone) auf.

Die beiden etwas ausserhalb liegenden Gebiete Raten und nordöstlich von Menzingen sind beide hoch belastet (rot).

Auch die Karte **2023** (Abb. 10c, Anhang 4c) wird von tiefen Belastungen dominiert (grüne Zonen). Wie 2013 sind Unterägeri, der Zugerberg und dessen Hang stärker belastet (gelbe und orange Zone). Eine hohe Belastung (rote Zone) ist aber nirgends mehr zu finden. Auch die beiden Gebiete Raten und nordöstlich von Menzingen sind jetzt nur noch mittel bis hoch belastet (orange Zone).

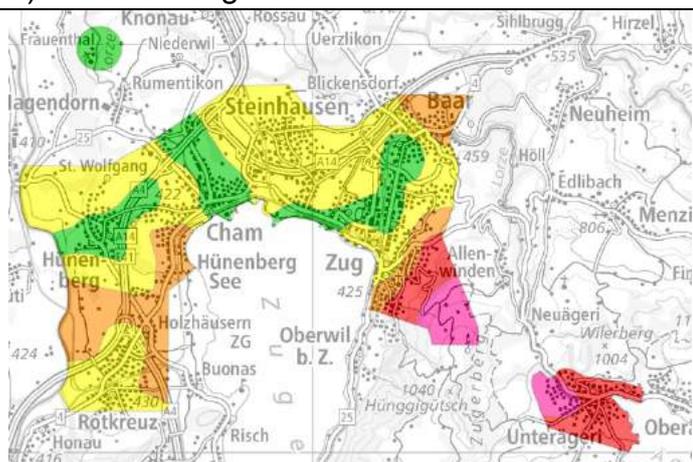
5.2 Differenzkarten Ozon

Die Differenzkarte **2003 bis 2013** (Abb. 10d, Anhang 4d) zeigt flächendeckend eine Abnahme der Ozonbelastung an (blaue Zonen). Ausnahme bildet eine kleine Insel um Inwil, hier ist die Belastung unverändert (graue Zone). Flächen mit grösster Verbesserung (dunkelblau) liegen südöstlich von Rotkreuz, nordwestlich von Steinhausen und am Hang des Zugerbergs.

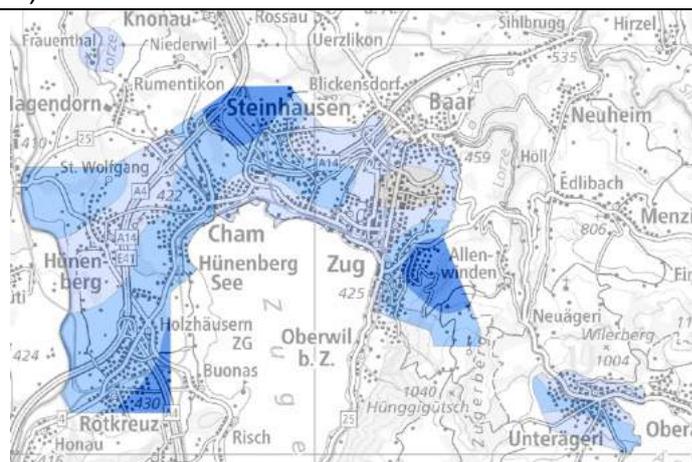
Flechtenindex Ozon

Abb. 10

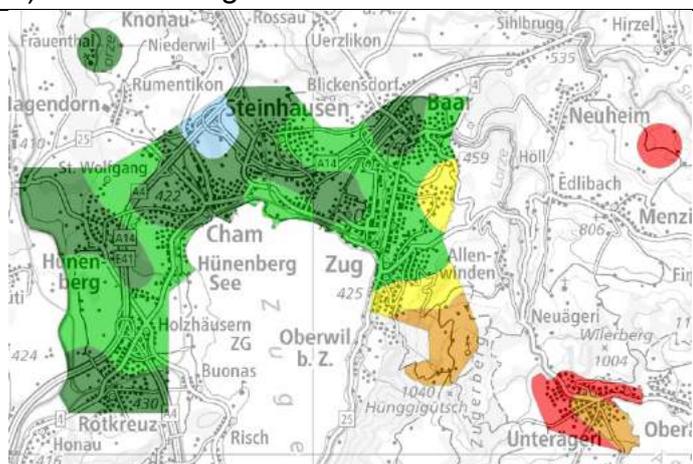
a) Luftbelastung 2003



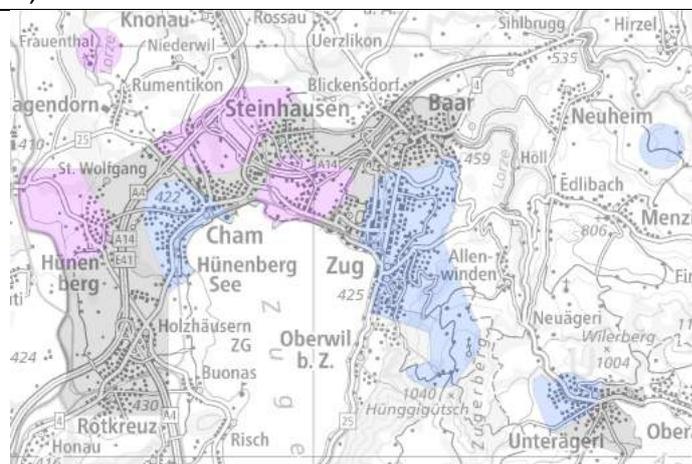
d) Differenz 2003 - 2013



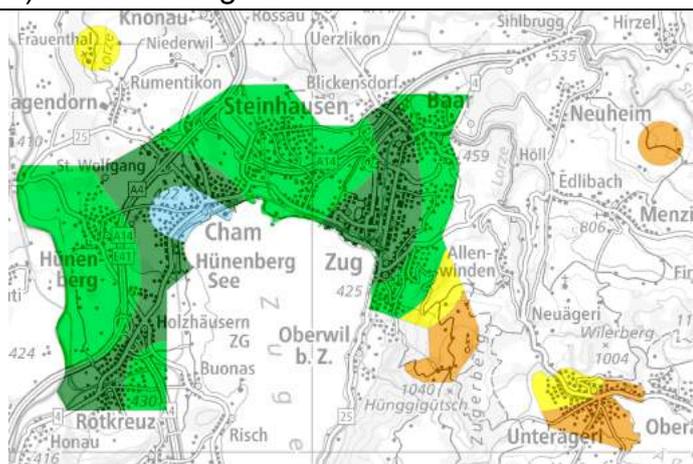
b) Luftbelastung 2013



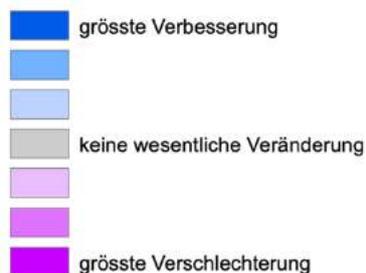
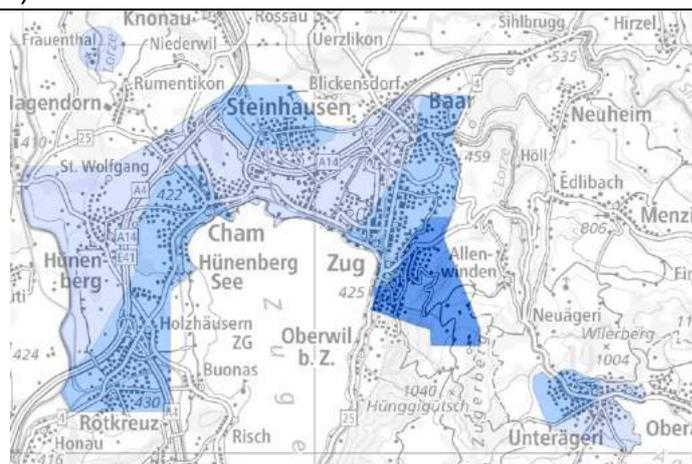
e) Differenz 2013 - 2023



c) Luftbelastung 2023



f) Differenz 2003 - 2023



Die Differenzkarte **2013 bis 2023** (Abb. 10e, Anhang 4e) weist sowohl Gebiete ohne wesentliche Veränderung, Gebiete mit einer Abnahme als auch einer Zunahme der Ozonbelastung auf. Leicht abgenommen hat die Belastung primär in den höher gelegenen Gebieten sowie in den Zentren von Zug, Inwil, Cham und Hünenberg See (hellblaue Zonen). Leicht zugenommen hat die Belastung in ländlich geprägten Gebieten westlich von Hünenberg, nördlich von Cham sowie im südlichen Teil der Lorzenebene (hellviolette Zonen). In allen drei Gebieten liegt die Ozonbelastung 2023 immer noch zwischen mittel und tief (Abb. 10c, Anhang 4c, hellgrüne Zone).

Die Differenzkarte **2003 bis 2023** (Abb. 10f, Anhang 4f) – als Summe der beiden vorangehenden Differenzkarten – zeigt für das ganze Untersuchungsgebiet einen Rückgang der Ozonbelastung an (blaue Zonen). Am grössten ist die Verbesserung am Hang des Zugerbergs (dunkelblaue Zone).

5.3 Vergleich mit technischen Luftmessungen

Die Kalibration des Flechtenindex' Ozon erfolgte mit Daten des Immissionswerts AOT40 (siehe Kap. 2). Dies ist ein für die Vegetation relevanter Dosiswert der Ozonbelastung, ausgedrückt als die kumulierte Ozonbelastung oberhalb einer Konzentration von 40ppb.

AOT40 wird deshalb zum Vergleich der Flechtenresultate mit den technischen Messungen herangezogen. Im Kanton Zug liegen AOT40-Messungen an den beiden Messstationen Zug Postplatz und Zugerberg vor (in-luft.ch 2000ff). Abbildung 11 zeigt die AOT40-Belastung an den beiden Stationen für die Zeitspanne von 2000 bis 2022.

Diese Messungen stimmen gut mit den Flechtenwerten zur Ozonbelastung überein: An beiden Standorten nehmen die AOT40-Werte über die gemessene Periode ab, am Zugerberg deutlicher als am Zug Postplatz. Übereinstimmend ist auch die durchschnittlich tiefere Belastung an der Station Zug Postplatz als an der Station Zugerberg.

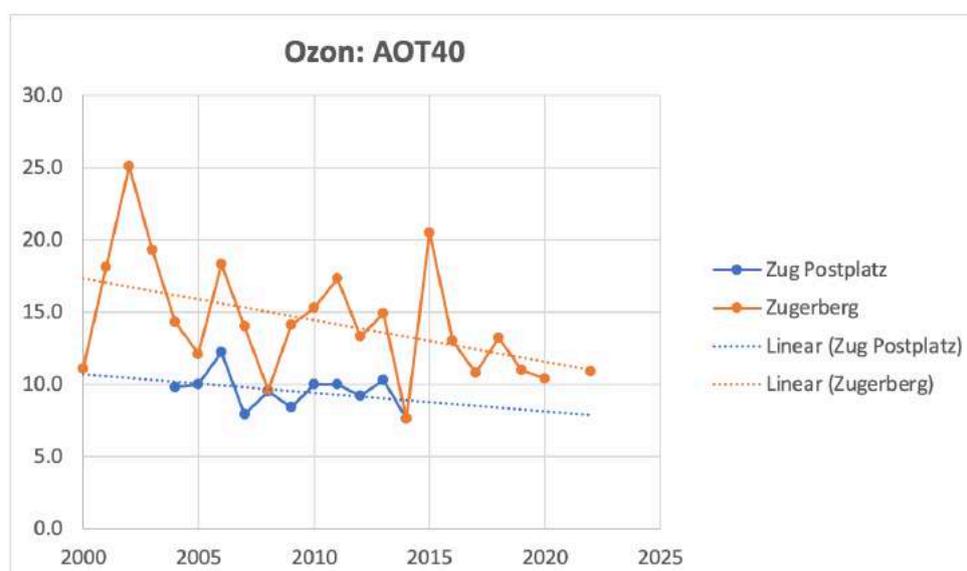


Abb. 11:
Ozon: AOT40 an den
Stationen Zug Post-
platz und Zugerberg

Als weitere Ozonmessgrösse ist in Abbildung 12 das maximale Stundenmittel der beiden Messstationen abgebildet. Auch diese Messgrösse zeigt in Übereinstimmung mit den Flechtenwerten die gleichen Trends: Eine leichte Abnahme der Ozonbelastung über die Messperiode und eine etwas geringere Ozonbelastung an der Station Zug Postplatz als an der Station Zugerberg.

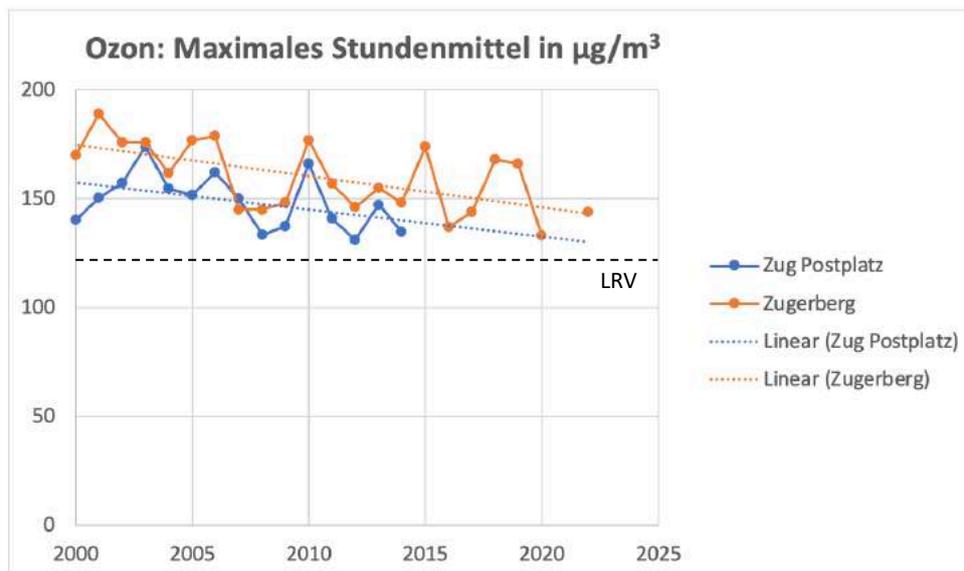


Abb. 12:
Ozon: Maximales
Stundenmittel an den
Stationen Zug Post-
platz und Zugerberg;
LRV: Stundenmittel-
Grenzwert der Luftrein-
halteverordnung LRV;
darf höchstens einmal
pro Jahr überschritten
werden

6. Flechten-Biodiversität

Biodiversität bezeichnet die biologische Vielfalt von Lebensräumen, der Arten und der Gene sowie deren Interaktionen. Sie ist unverzichtbar für das Leben auf der Erde. Die Biodiversität steht weltweit unter Druck. Auch in der Schweiz ist sie in einem schlechten Zustand und nimmt weiter ab. Fördermassnahmen der letzten Jahrzehnte konnten die Abnahme verlangsamen, aber bisher nicht stoppen (BAFU 2017, BAFU 2023, BAFU 2024).

Baumbewohnende Flechten sind eine Lebensgemeinschaft, deren Vielfalt als Mass der Biodiversität verwendet werden kann. Je vielfältiger, also diverser, die baumbewohnende Flechtenvegetation ist, desto robuster ist sie, desto besser kann sie sich an Veränderungen anpassen. Gemessen wird die Biodiversität anhand des Shannon-Index':

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

H entspricht der Biodiversität, s ist die Zahl der Flechtenarten im Untersuchungsgebiet, i steht für die einzelne Flechtenart und p_i entspricht der relativen Häufigkeit der Art (Jenssen 2006). Je grösser die Artenvielfalt und je höher der Frequenzwert der einzelnen Flechtenart desto grösser der resultierende Biodiversitätswert H. Berechnet wird der Biodiversitätswert für jeden einzelnen untersuchten Trägerbaum. Analog zu den Flechten-Luftgütekarten wurden die Werte pro Georaum gemittelt und auf Basis dieser Werte neun Zonen unterschiedlicher Biodiversität unterschieden. Dargestellt sind im Folgenden der Zustand der Flechten-Biodiversität in den Jahren 1993 und 2023 sowie die Entwicklung der Biodiversität zwischen diesen beiden Zeitpunkten.

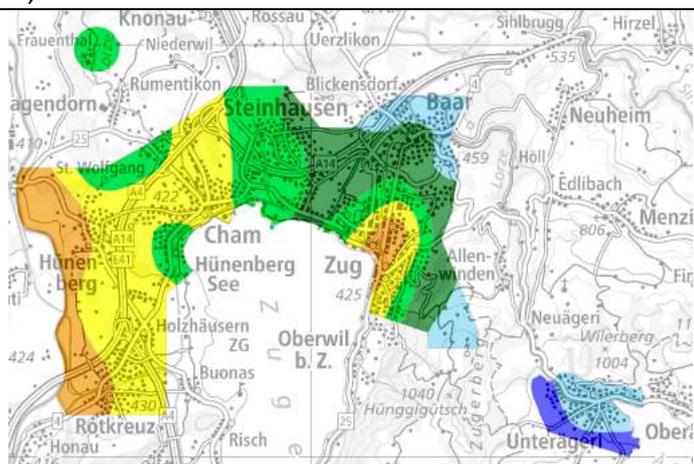
Flechten-Biodiversität 1993

Im Untersuchungsgebiet sind grosse Unterschiede bezüglich der Flechten-Biodiversität feststellbar (Abb. 13a, Anhang 5a). Im westlichen Teil, sowie in der Stadt Zug, ist die Biodiversität deutlich tiefer als in den östlichen Teilen. Die höchste Biodiversität findet sich in Unterägeri, auf dem Zugerberg sowie im nördlichen Teil von Baar. In Unterägeri ist im dicht besiedelten Teil die Biodiversität sehr hoch (hellblaue Zone), im Gürtel um das Siedlungsgebiet am höchsten (dunkelblaue Zone). In Zug nimmt die Biodiversität von den Aussenquartieren zum Stadtzentrum stark ab, von einer hohen Biodiversität (grüne Zone) bis zu einer mittleren bis tiefen Biodiversität im Zentrum (orange Zone). Vergleichbar tiefe Werte weist die landwirtschaftlich geprägte Region ganz im Westen, entlang der Reuss, auf. Von hier aus nimmt die Biodiversität gegen Osten kontinuierlich zu.

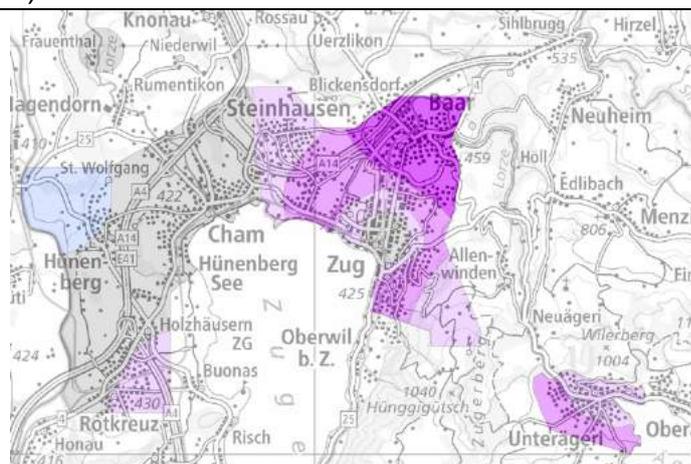
Flechten-Biodiversität

Abb. 13

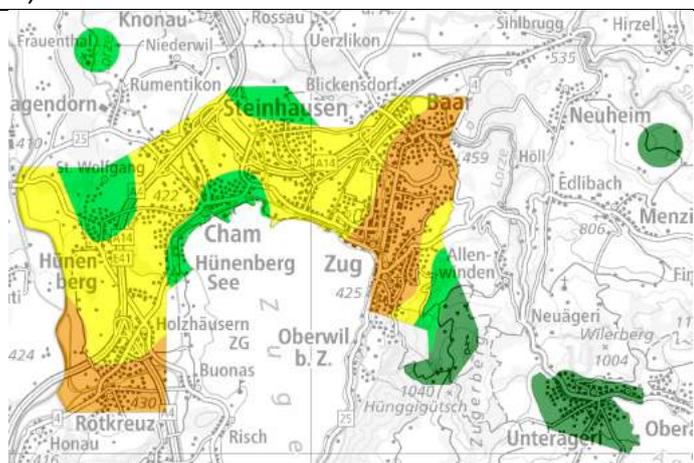
a) Biodiversität 1993



c) Differenz 1993 - 2023



b) Biodiversität 2023



- höchste Biodiversität
-
- hohe Biodiversität
-
- mittlere Biodiversität
-
- tiefe Biodiversität
-
- tiefste Biodiversität

- grösste Verbesserung
-
- keine wesentliche Veränderung
- grösste Verschlechterung
-

Flechten-Biodiversität 2023

2023 zeigt sich ein wesentlich anderes Bild bezüglich der Flechten-Biodiversität (Abb. 13b, Anhang 5b). Zwar ist noch immer ein Anstieg der Biodiversität vom Flachland in die höher gelegenen Gebiete feststellbar. Es sind aber keine Gebiete mit einer sehr hohen Biodiversität (blaue Zonen) mehr zu finden. Vorherrschend sind nun Gebiete mit mittlerer bis tiefer Biodiversität (gelbe und orange Zone). Am tiefsten ist die Biodiversität nach wie vor im Südwesten und in der Stadt Zug, wobei sich hier die orange Zone mit tiefer bis mittlerer Biodiversität über das ganze Siedlungskerngebiet Zug-Inwil-Baar ausdehnt. Am höchsten ist die Biodiversität in den höher gelegenen Gebieten am Zugerberg, in Unterägeri samt Umgebung sowie an den beiden Punkterhebungen am Raten und nordöstlich von Menzingen (grüne Zonen).

Differenz 1993 - 2023

In grossen Teilen des Untersuchungsgebiets hat sich die Biodiversität in den 30 Jahren von 1993 bis 2023 nicht wesentlich verändert (graue Zone) oder verschlechtert (violette Zonen) – dies teilweise sehr stark (Abb. 13c, Anhang 5c). Einzig im Gebiet westlich von Hünenberg ist die Biodiversität leicht gestiegen. Dort waren 1993 die tiefsten Werte anzutreffen. Diese haben sich jetzt etwas verbessert, von der orangen zur gelben Zone.

Im daran angrenzenden Gebiet von Rotkreuz-Holzhäusern-Cham veränderte sich die Biodiversität kaum. Ab Steinhausen in östlicher Richtung gegen Zug-Zugerberg und Baar-Inwil hat die Biodiversität deutlich abgenommen, mit den grössten Verschlechterungen in den Siedlungsgebieten von Baar und Inwil (dunkelviolette Zone). Einzig im Stadtzentrum von Zug hat sich die Biodiversität kaum verändert. Hier wies sie aber bereits 1993 vergleichsweise tiefe Werte auf.

Auch in den höher gelegenen Gebieten am Zugerberg und in Unterägeri hat die Biodiversität teilweise deutlich abgenommen, sie weist allerdings hier immer noch die höchsten Werte im ganzen Untersuchungsgebiet auf.

7. Fazit und Ausblick

Die Flechten zeigen Rückgang der Luftbelastung

Die Flechtenuntersuchungen zeigen die aktuelle Luftbelastungen und deren Veränderung in den letzten Jahrzehnten. Ausgewiesen wird die Belastung durch die drei Flechtenindices bezüglich Primärschadstoffe, Ammoniak und Ozon.

Alle drei Flechtenindices zeigen seit 2003 einen Rückgang der Belastungen an. Deutlich ist dieser Rückgang bei den Primärschadstoffen und beim Ozon. Bei beiden hat die Belastung im ganzen Untersuchungsgebiet abgenommen (Ausnahme: Gebiet des Zugerbergs bei den Primärschadstoffen). Bei Ammoniak ging die Belastung insbesondere im westlichen Teil des Untersuchungsgebiets (Rotkreuz – Cham) zurück. Dieses vorwiegend landwirtschaftlich geprägte Gebiet wies 2003 eine sehr hohe Belastung auf. Aktuell finden sich erhöhte Belastungen je nach Flechtenindex in unterschiedlichen Gebieten: Bei den Primärschadstoffen im Zentrum von Zug, bezüglich dem Ammoniak im Flachland und bezüglich dem Ozon in den höher gelegenen Gebieten des Untersuchungsgebiets.

Im Kanton Zug wurden die Flechtenuntersuchungen erstmals 1993 vorgenommen. Inzwischen hat sich die Zusammensetzung der Luftbelastungen stark verändert. Deshalb wurde die Flechtenmethode vor einigen Jahren neu kalibriert (siehe Kap. 2). Alle aktuellen Erhebungen werden mit dieser neuen Methode ausgewertet. Gültig ist diese Methode aber nur für Daten ab etwa 2000, weshalb die Zuger Flechtenuntersuchungen von 1993 nicht in die vorliegenden Auswertungen einbezogen wurden. Damals wiesen die Flechtenuntersuchungen hohe Luftbelastungen insbesondere in den tieferen Lagen des Untersuchungsgebiets aus, welche auch durch die damaligen technischen Luftmessungen bestätigt wurden.

Die anhand der Flechtenuntersuchungen festgestellten Verbesserungen der Luftqualität werden durch technische Immissionsmessungen an einzelnen Messstationen im Untersuchungsgebiet in der Tendenz bestätigt. Diese Messungen zeigen für die Primärschadstoffe eine deutliche Abnahme der Schadstoffkonzentrationen. Auch rückläufig sind die Werte der Ozon-Messungen, während die NH₃-Messungen nur geringfügige Belastungsänderungen anzeigen.

Die Flechten-Biodiversität hat abgenommen

Die Verwendet können die Daten 1993 aber für die Auswertungen zur Flechten-Biodiversität, ein Mass für die biologische Vielfalt der baumbewohnenden Flechten. Die Flechten-Biodiversität hat zwischen 1993 wie 2023 in grossen Teilen des Untersuchungsgebiets deutlich abgenommen. Hohe Biodiversitätswerte finden sich heute nur noch in den höher gelegenen Gebieten. Dieser Befund steht in Übereinstimmung mit der Abnahme der Biodiversität in in vielen Lebensräumen der Schweiz (BAFU 2023).

Massnahmen zeigen Wirkung

Die mit den Flechtenuntersuchungen festgestellten Belastungsabnahmen im Untersuchungsgebiet sind die positiven Folgen der in den letzten Jahrzehnten getroffenen Massnahmen zur Verbesserung der Luftqualität. Aktuell sind aber immer noch Gebiete mit hohen Belastungen verschiedener Schadstoffe zu finden. Diese Belastungen sind gemäss Umweltschutzgesetz USG des Bundes auf ein Mass zu senken, welches die Gesundheit von Mensch, Tier und Pflanze gewährleistet.

Entsprechend hat der Kanton Zug weitere Massnahmen zur Senkung der Luftbelastung ergriffen. Aktuell werden der «Zentralschweizer Massnahmenplan Luftreinhaltung II» (ZUDK 2007) sowie der «Massnahmenplan Ammoniak» (Stofer P. et al. 2016) umgesetzt.

Die Wirkung dieser und der bereits umgesetzten Massnahmen kann in Zukunft anhand weiterer Flechtenuntersuchungen, beispielsweise in 10 Jahren, erneut überprüft werden.

Mit der vorliegenden Flechtenuntersuchung wird die hohe Aussagekraft der Flechtenuntersuchungen zum Zustand und zur Entwicklung der Luftqualität bestätigt. Die Flechtenmethode kann zur grossräumigen Erfassung der Luftbelastung und ihrer zeitlichen Veränderung sowie zur lufthygienischen Erfolgskontrolle eingesetzt werden:

- Sie macht das unsichtbare Phänomen Luftbelastung sichtbar. Das Signal ist auch für Laien erkennbar und die resultierenden Luftgütekarten sind gut verständlich.
- Die Wirkung der Luftqualität auf Lebewesen wird angezeigt, inklusive der Kombinationswirkungen von mehreren Luftschadstoffen.
- Die Anzeige beinhaltet auch die Wirkung von nicht erfassten Schadstoffen.
- Die Wirkungsanzeige mit Flechten ist näher beim Menschen als technische Messungen.
- Die Anzeige erfolgt flächendeckend, dank der Methodenkalibration erfassen die Flechten die über die Zeit aufsummierte Schadwirkung der Luftbelastung.

Ausblick

Aufgrund dieser Eigenschaften eignet sich die Flechtenindikationsmethode gut für die Öffentlichkeitsarbeit zur Luftqualität und deren Entwicklung, wie beispielsweise einen Artikel im jährlichen Newsletter des AFU «Umwelt Zug».

Neben den Vergleichen der Flechtenindices mit den punktuellen Immissionsmessungen sind weitere vergleichende Auswertungen mit Immissionsdaten denkbar. Für verschiedene Schadstoffe liegen modellierte Immissionskarten vor, oder könnten nach Bedarf noch hergestellt werden. Diese flächendeckenden Immissionskarten könnten mit den Flechtenkarten verglichen werden. Die Resultate der Flechtenuntersuchungen könnten damit noch detaillierter interpretiert werden.

Interessant wäre auch ein Vergleich der Flechtenindices mit dem Langzeit-Luftbelastungs-Index LBI (Cercl Air 2015). Dieser Index basiert auf modellierten Immissionsdaten von NO₂, PM10 und Ozon. Die Gewichtung der drei Faktoren basiert auf deren gesundheitlichen Auswirkungen für den Menschen. Wie die Flechtenindices stellt der LBI eine Wirkungsanzeige der Luftbelastung dar.

Momentan liegen zum LBI nur Daten für die Messstation Zug-Postplatz von 2001 bis 2014 (in-luft.ch/schadstoffe/lbi) und für die Stadt Zug vor (bfs.admin.ch; Langzeit-Luftbelastungsindex). Für den Vergleich mit den Flechtendaten müsste der LBI flächendeckend als Jahresmittel für das Untersuchungsgebiet berechnet werden.

8. Literatur

AGB, puls, Swiss TPH, 2018: Rekalibration der Flechtenindikationsmethode: Management Summary, 9 S.

BAFU 2017: Biodiversität in der Schweiz: Zustand und Entwicklung. Ergebnisse des Überwachungssystems im Bereich Biodiversität, Stand 2016. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1630: 60 S.

BAFU 2023: Biodiversität in der Schweiz: Zustand und Entwicklung. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 2306: 95 S.

BAFU 2024: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/biodiversitaet/inkuerze.html>

Cercl Air 2015: Langzeit Luftbelastungs-Index LBI. Gesamtschweizerisches Index-System zur vereinfachten Kommunikation der Langzeit-Luftbelastung unter Berücksichtigung der gesundheitlichen Auswirkungen. Empfehlung Nr. 27b. 11 S.

Herzig R, Schindler C, Urech M, Rihm B, Lötscher HP, Thomann G, 2020: Recalibration and validation of the Swiss lichen bioindication methods for air quality assessment. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09001-x>

in-luft.ch 2000ff: Detaillierte Messdaten 2000, Umwelt Zentralschweiz, Bericht Nr. 1 und folgende

inNET Monitoring AG 2023: Messbericht Ammoniak. Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2022. Im Auftrag von Umwelt Zentralschweiz; 60 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.

puls 2004: Flechten und Luftqualität im Kanton Zug: Wirkungskontrolle 2003. Amt für Umweltschutz des Kantons Zug. 55 S.

puls 2014: Flechten und Luftqualität im Kanton Zug: Wirkungskontrolle 2013. Amt für Umweltschutz des Kantons Zug. 69 S.

puls 2019: Flechten und Luftqualität im Kanton Zug: Aktualisierte Luftgütekarten 2003 und 2013. Amt für Umweltschutz des Kantons Zug. 22 S.

Stofer P. et al. 2016: Massnahmenplan Ammoniak 2016 – 2030 Kanton Zug. 42 S.

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

ZUDK 2007: Zentralschweizer Massnahmenplan Luftreinhaltung II, Zentralschweizer Umweltschutzdirektoren-Konferenz (ZUDK), 4. Dezember 2007

9. Anhang

9.1 Anhang 1: Daten der Trägerbäume 2023

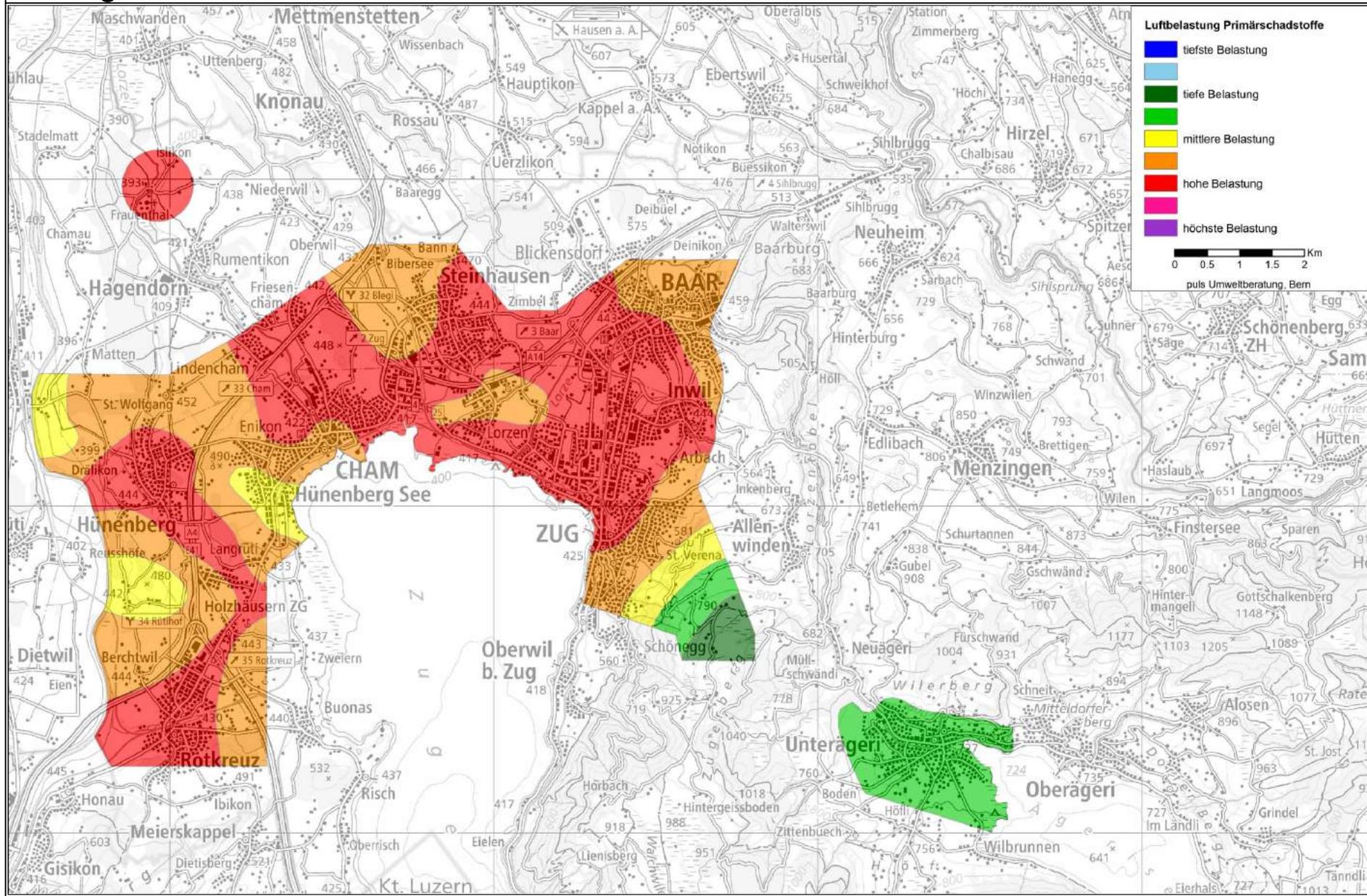
In der Tabelle auf den folgenden Seiten sind für die 284 Trägerbäume der Erhebungen 2023 untenstehende Angaben enthalten; die Bäume sind nach aufsteigender Objekt Nummer 2023 sortiert:

| | |
|------------|--|
| Obj. 2023: | Nummer des Trägerbaums 2023 |
| Obj. 2013: | Nummer des Trägerbaums 2013 |
| K1: | horizontale Koordinate der Schweizer Landeskarte (6-stellig) |
| K2: | vertikale Koordinate der Schweizer Landeskarte (6-stellig) |
| Geo: | Nummer des Georaums 2023, dem der Trägerbaum angehört |
| Baumart: | Baumart 2023: |
| | 1: einheimische Linde |
| | 2: ausländische Linde |
| | 3: Esche |
| | 4: Eiche |
| | 5: Spitzahorn |
| | 6: ausländischer Ahorn |
| | 7: Bergahorn |
| | 8: Feldahorn |
| | 9: Silberahorn |

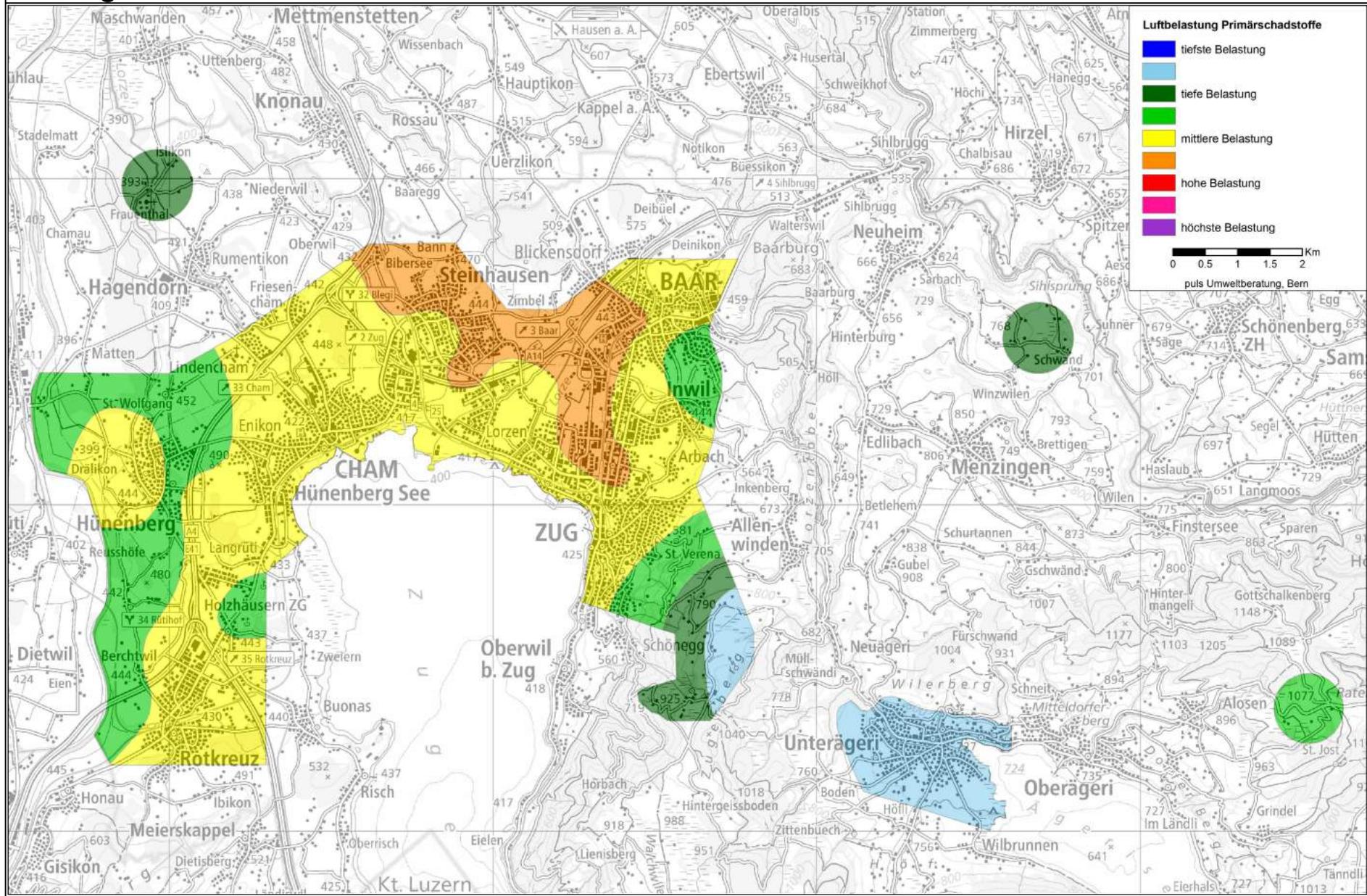
Frequenzwerte der 2023 erfassten Flechtenarten und -artengruppen (diese sind seit 1993 unverändert):

| | |
|------------------------------|----------------------------------|
| 1: Bryoria fuscescens | 23: Parmelia subargentifera |
| 2: Evernia prunastri | 24: Parmelia subrudecta |
| 3: Pseudevernia furfuracea | 25: Parmelia sulcata |
| 4: Ramalina farinacea | 26: Parmelia tiliacea |
| 5: Ramalina fastigiata | 46: Parmeliopsis ambigua |
| 6: Ramalina fraxinea | 27: Parmeliopsis hyperopta |
| 43: Ramalina pollinaria | 28: Physcia aipolia-Gr. |
| 7: Usnea sp. | 29: Physcia adscendens |
| 8: Anaptychia ciliaris | 48: Physcia caesia |
| 9: Cetraria cetrarioides-Gr. | 30: Phaeophyscia orbicularis-Gr. |
| 10: Cladonia sp. | 31: Physconia perisidiosa |
| 11: Hypogymnia farinacea | 49: Physconia enteroxantha |
| 12: Hypogymnia physodes | 32: Physconia grisea |
| 13: Hypogymnia tubulosa | 33: Physconia distorta |
| 14: Parmelia acetabulum | 34: Xanthoria fallax-Gr. |
| 15: Parmelia caperata | 35: Xanthoria parietina |
| 16: Parmelia submontana | 36: Xanthoria polycarpa |
| 17: Parmelia exasperata | 37: Graphis scripta |
| 18: Parmelia exasperatula | 38: Lecanora carpinea-Gr. |
| 19: Parmelia flaventior | 39: Lecanora argentata-Gr. |
| 20: Parmelia glabra | 45: Normandina pulchella |
| 21: Parmelia glabratula-Gr. | 40: Pertusaria albescens |
| 44: Parmelia quercina | 41: Pertusaria amara |
| 47: Parmelia revoluta | 42: Phlyctis argena-Gr. |
| 22: Parmelia saxatilis | |

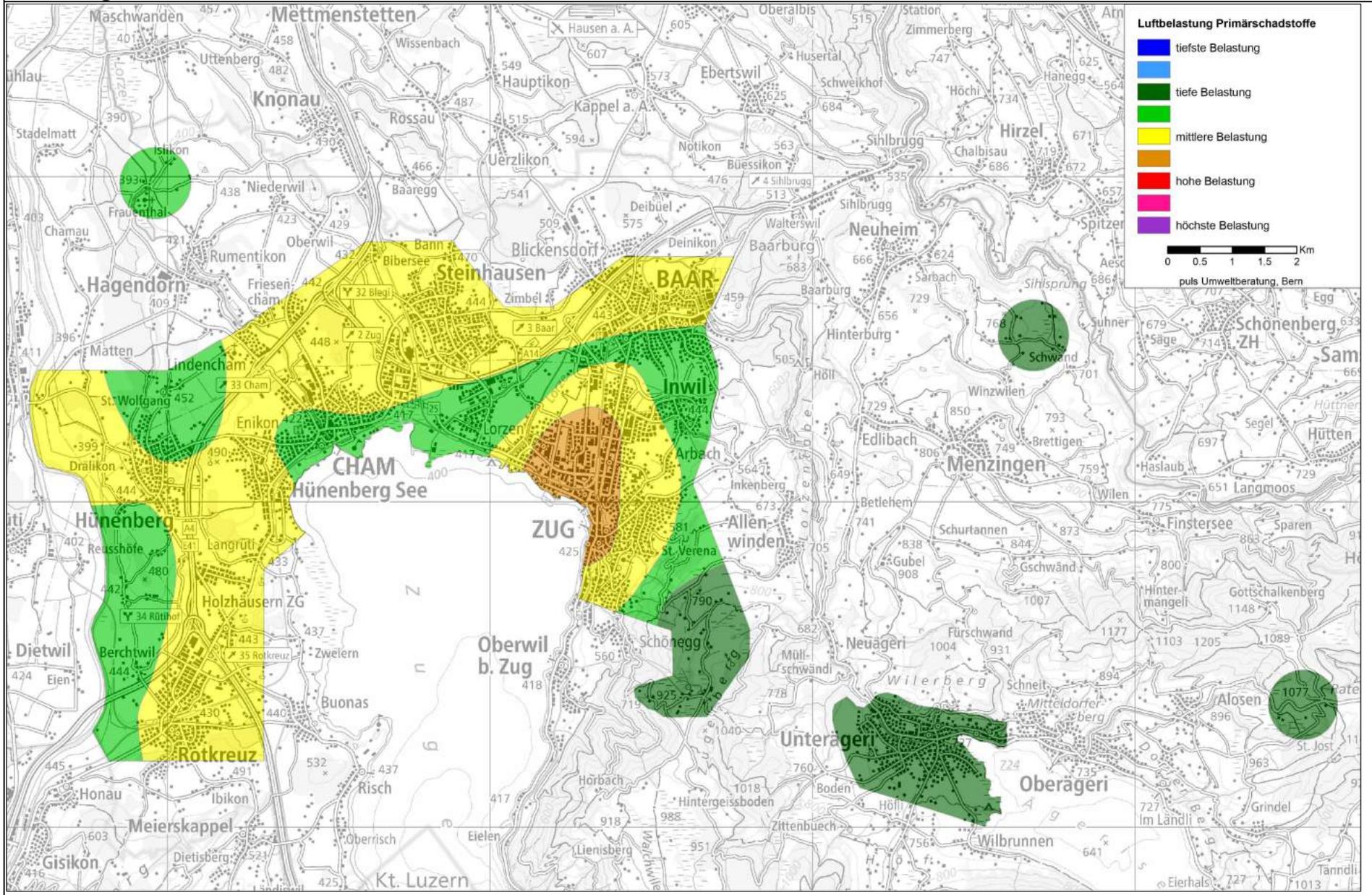
Anhang 2a: Flechtenindex Primärschadstoffe 2003



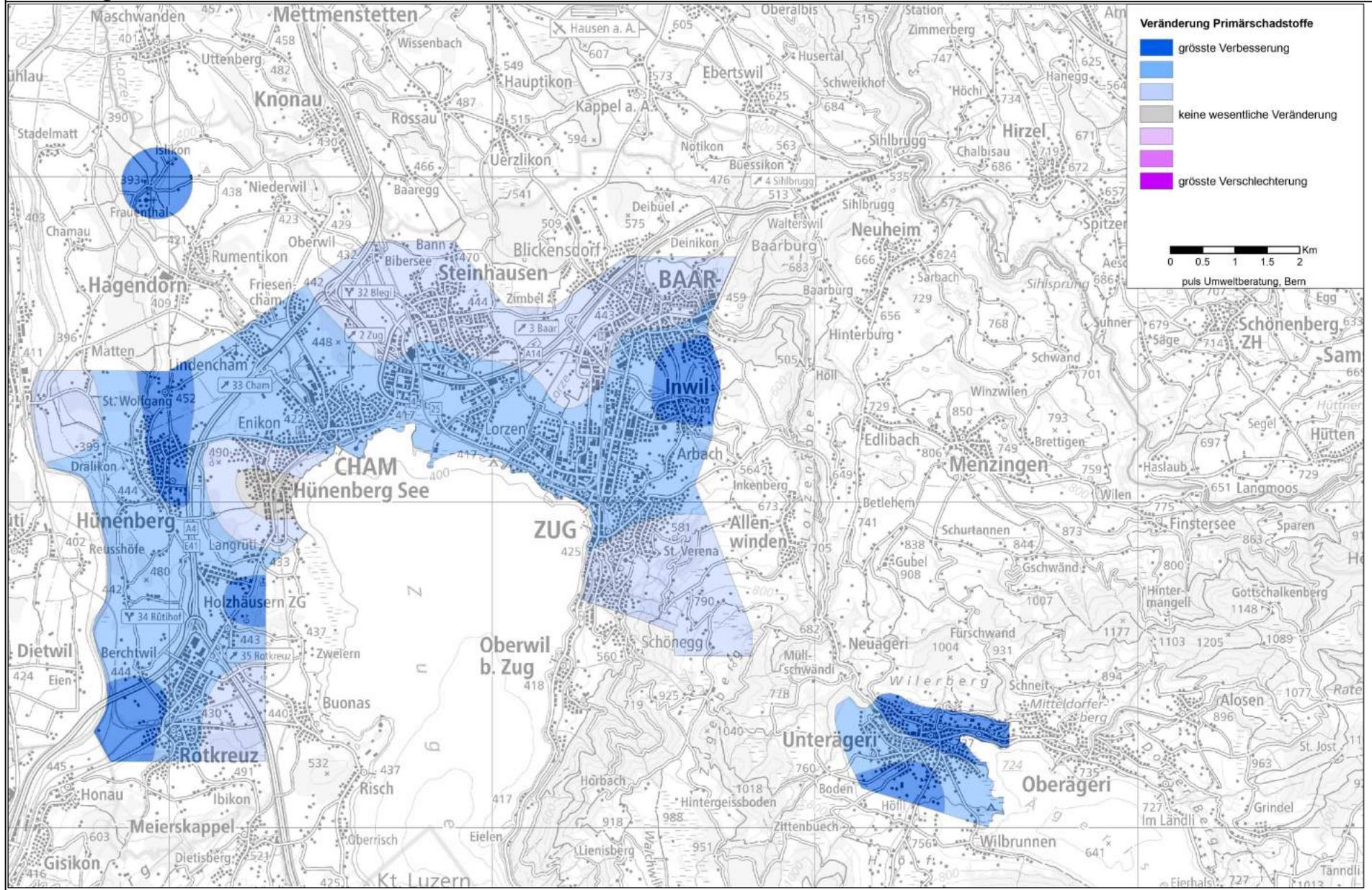
Anhang 2b: Flechtenindex Primärschadstoffe 2013



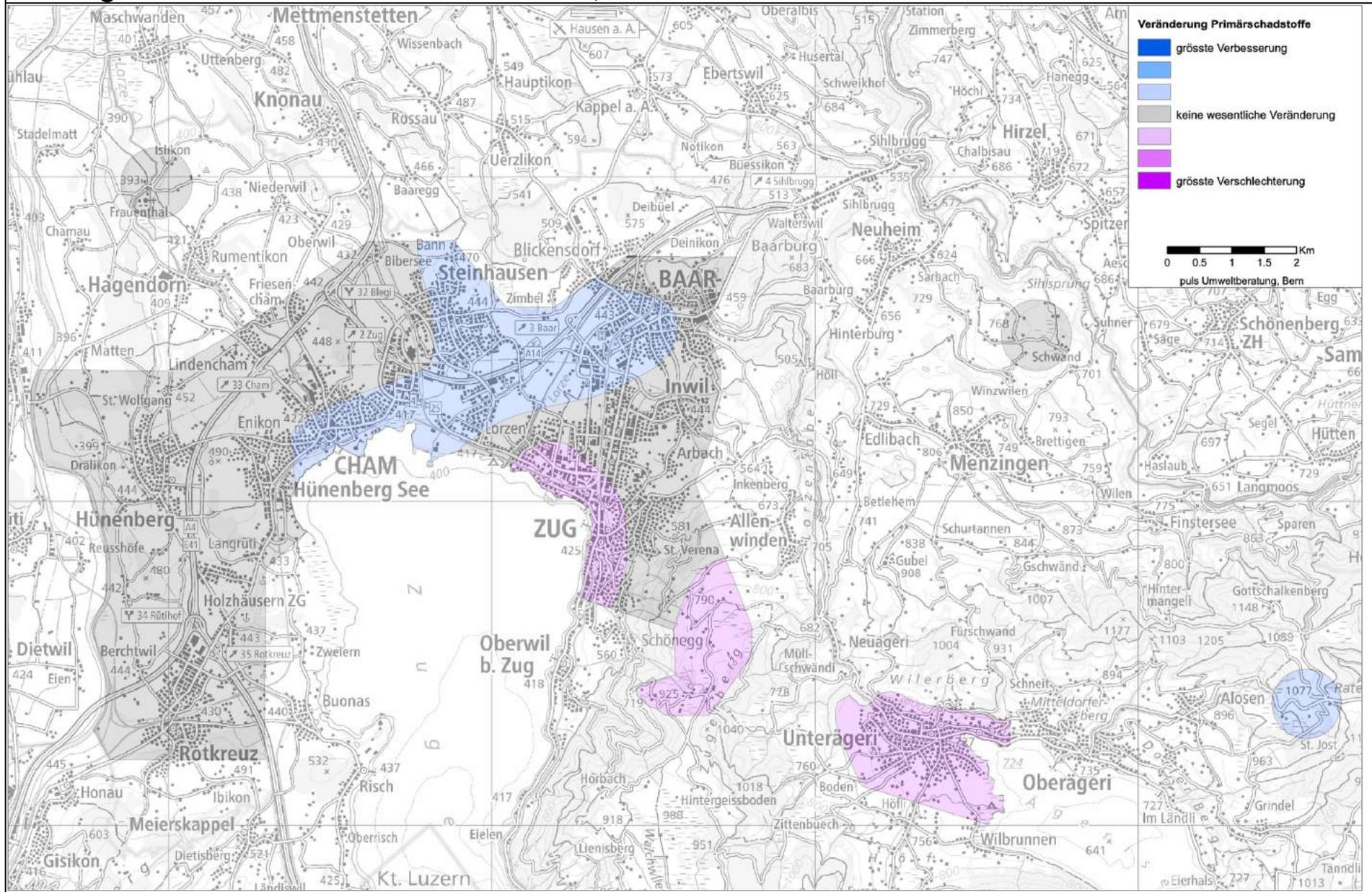
Anhang 2c: Flechtenindex Primärschadstoffe 2023



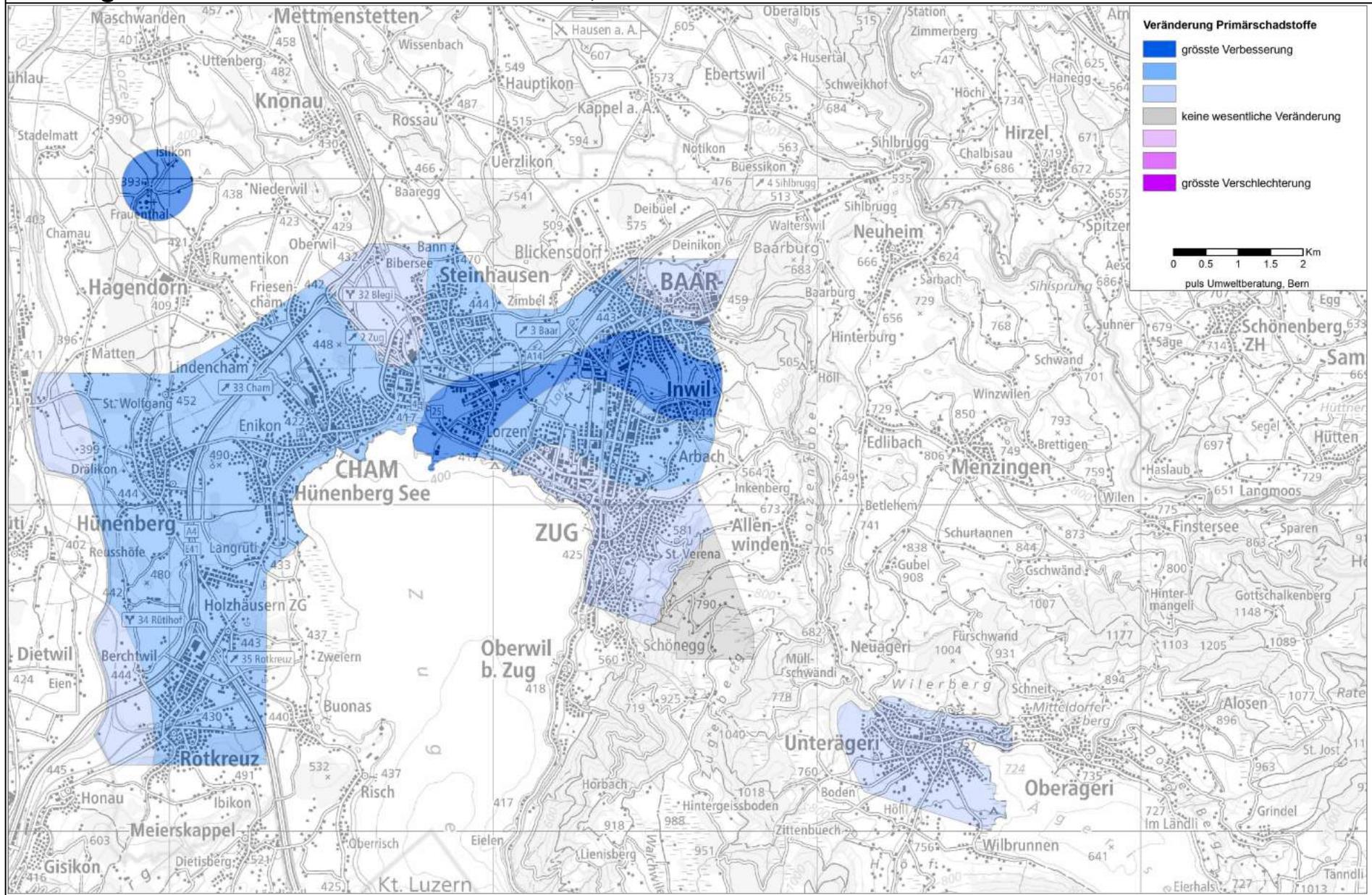
Anhang 2d: Flechtenindex Primärschadstoffe, Differenz 2003 - 2013



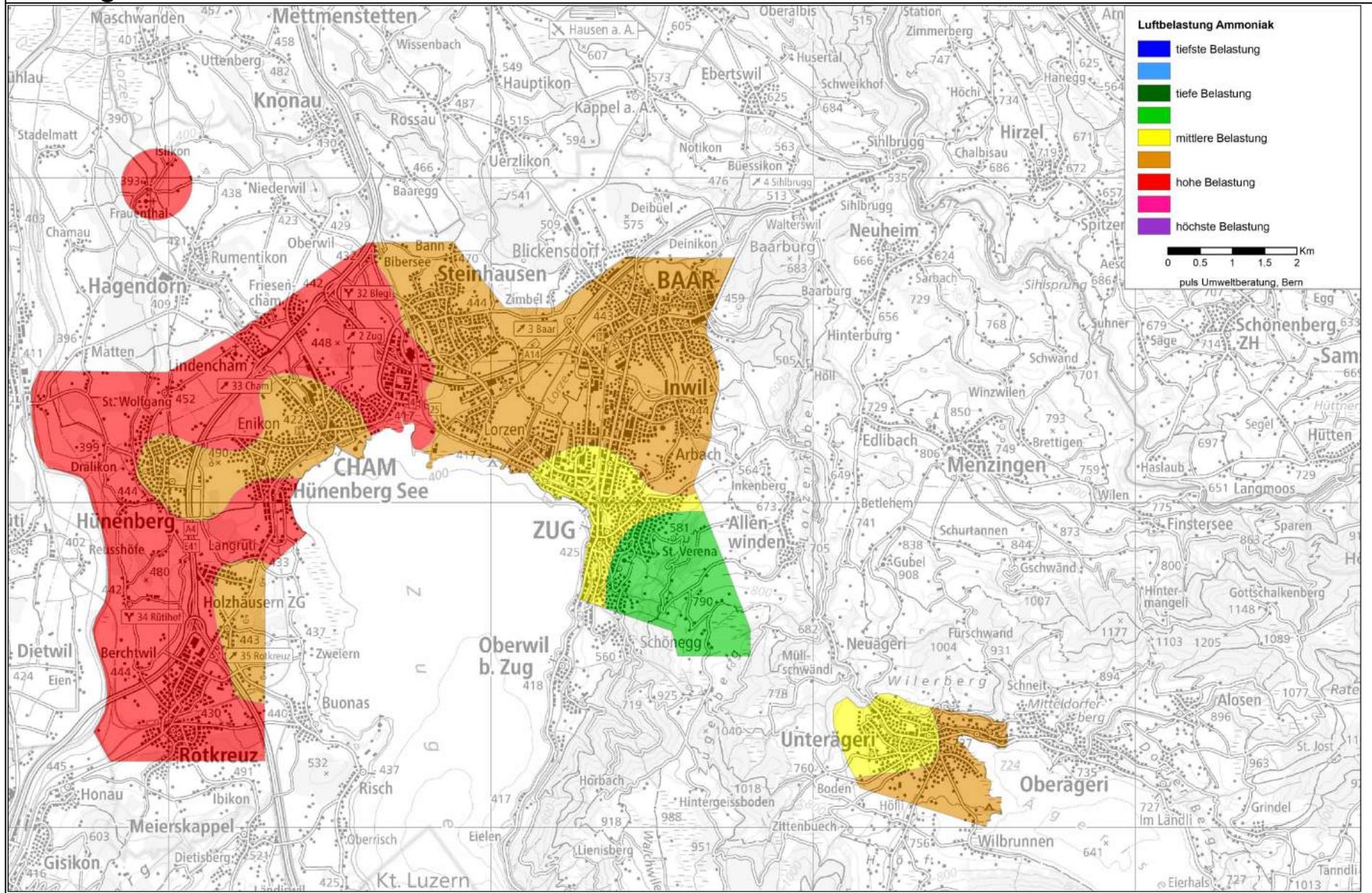
Anhang 2e: Flechtenindex Primärschadstoffe, Differenz 2013 - 2023



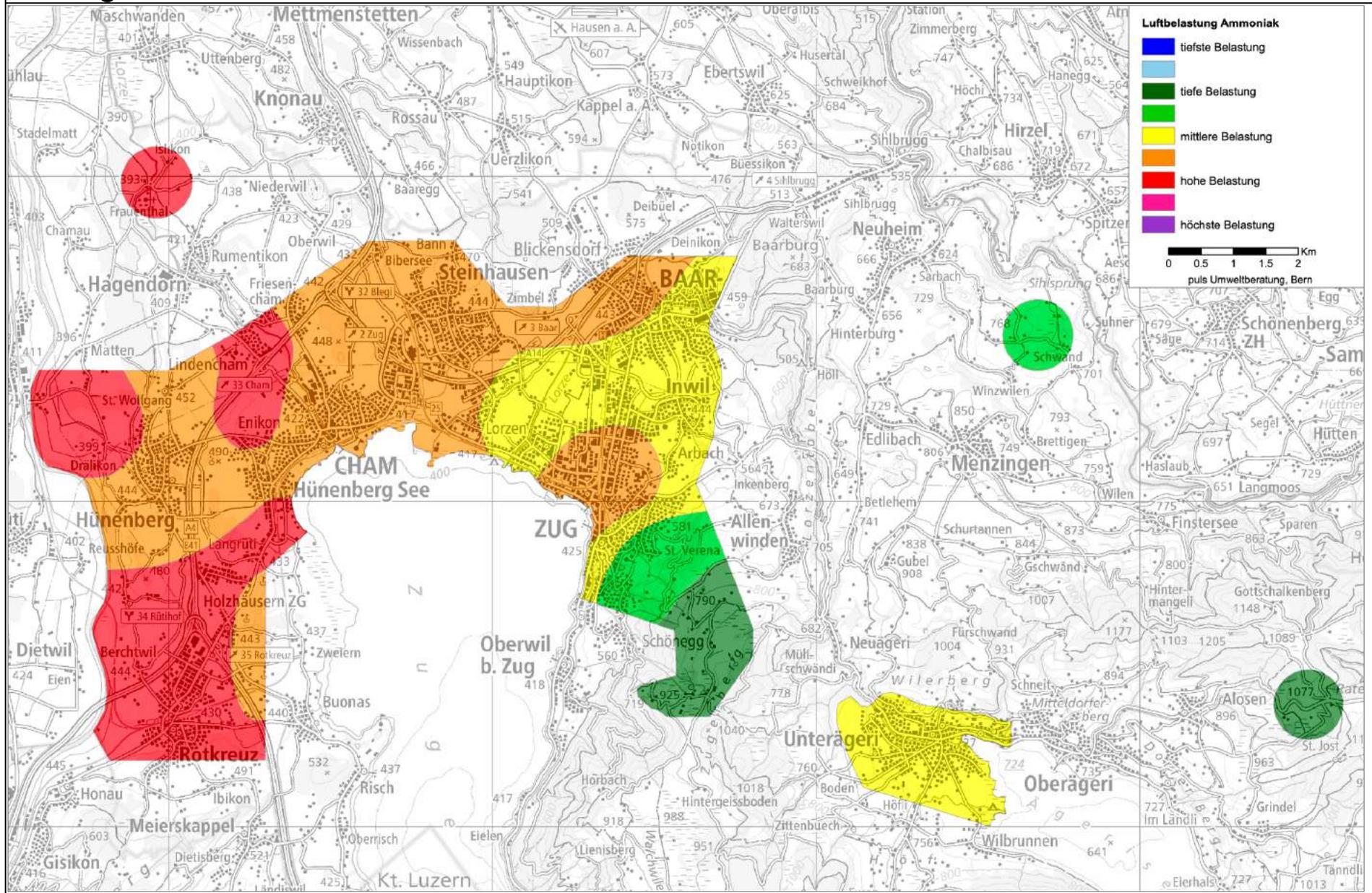
Anhang 2f: Flechtenindex Primärschadstoffe, Differenz 2003 - 2023



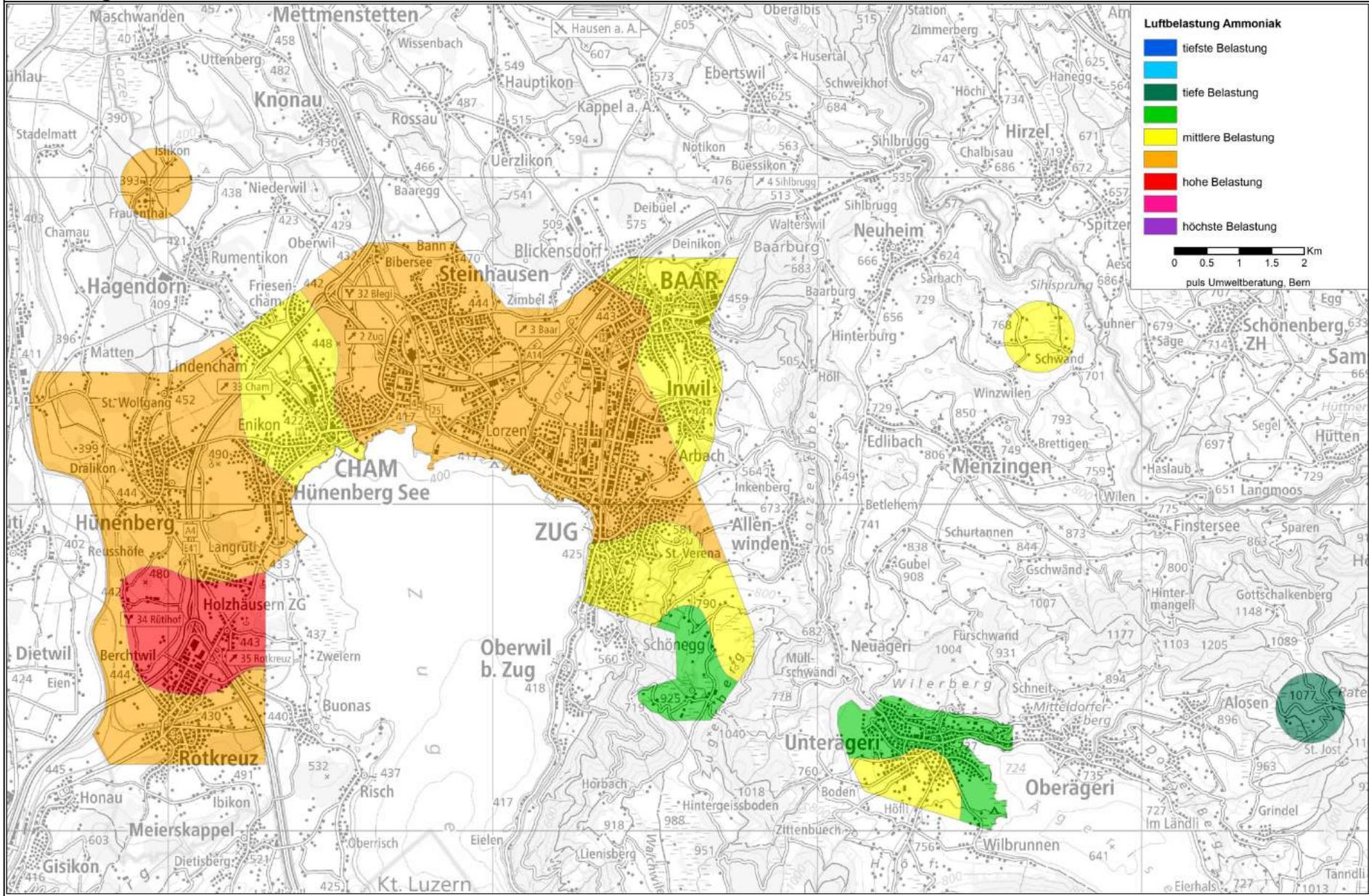
Anhang 3a: Flechtenindex Ammoniak 2003



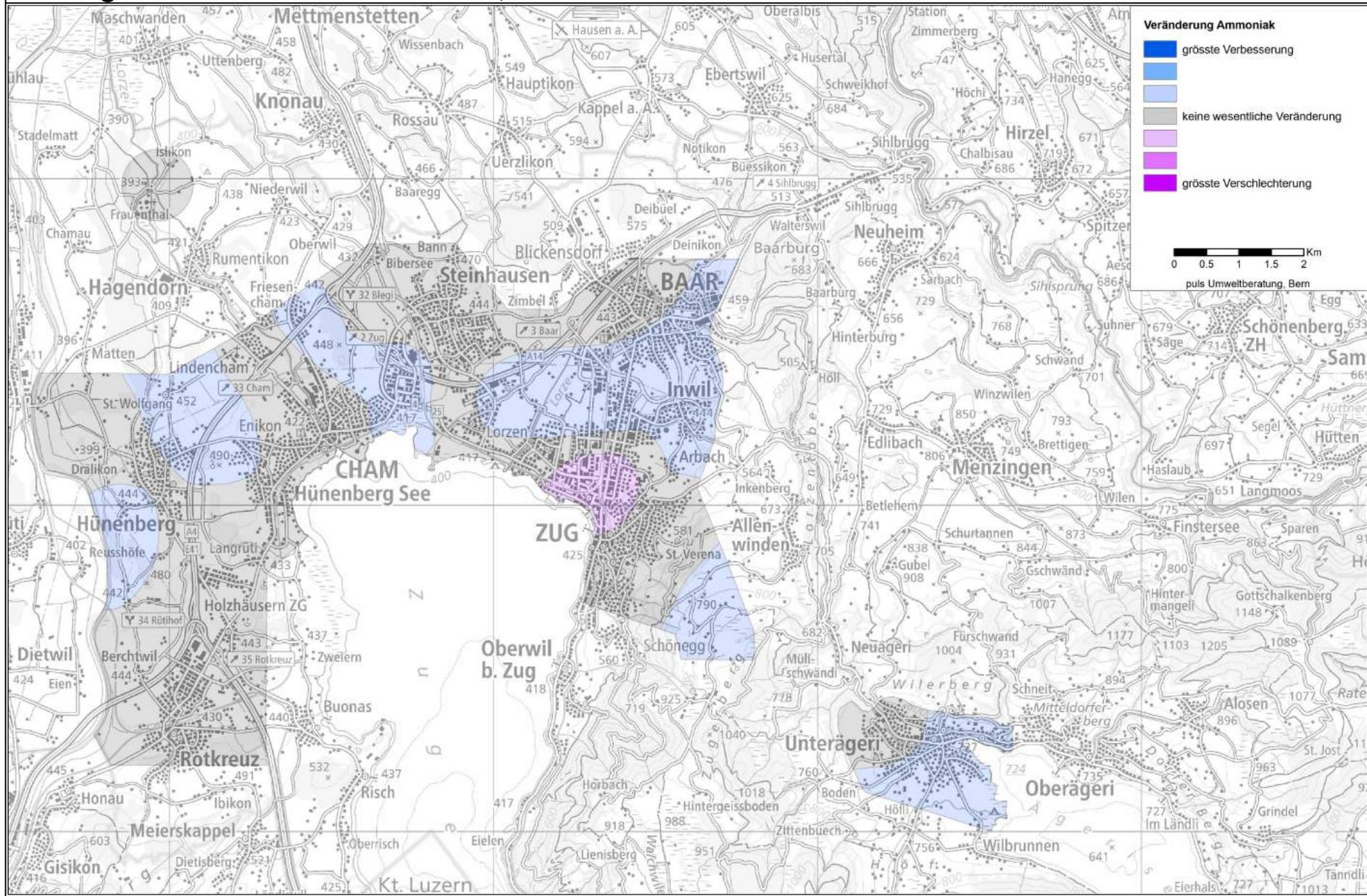
Anhang 3b: Flechtenindex Ammoniak 2013



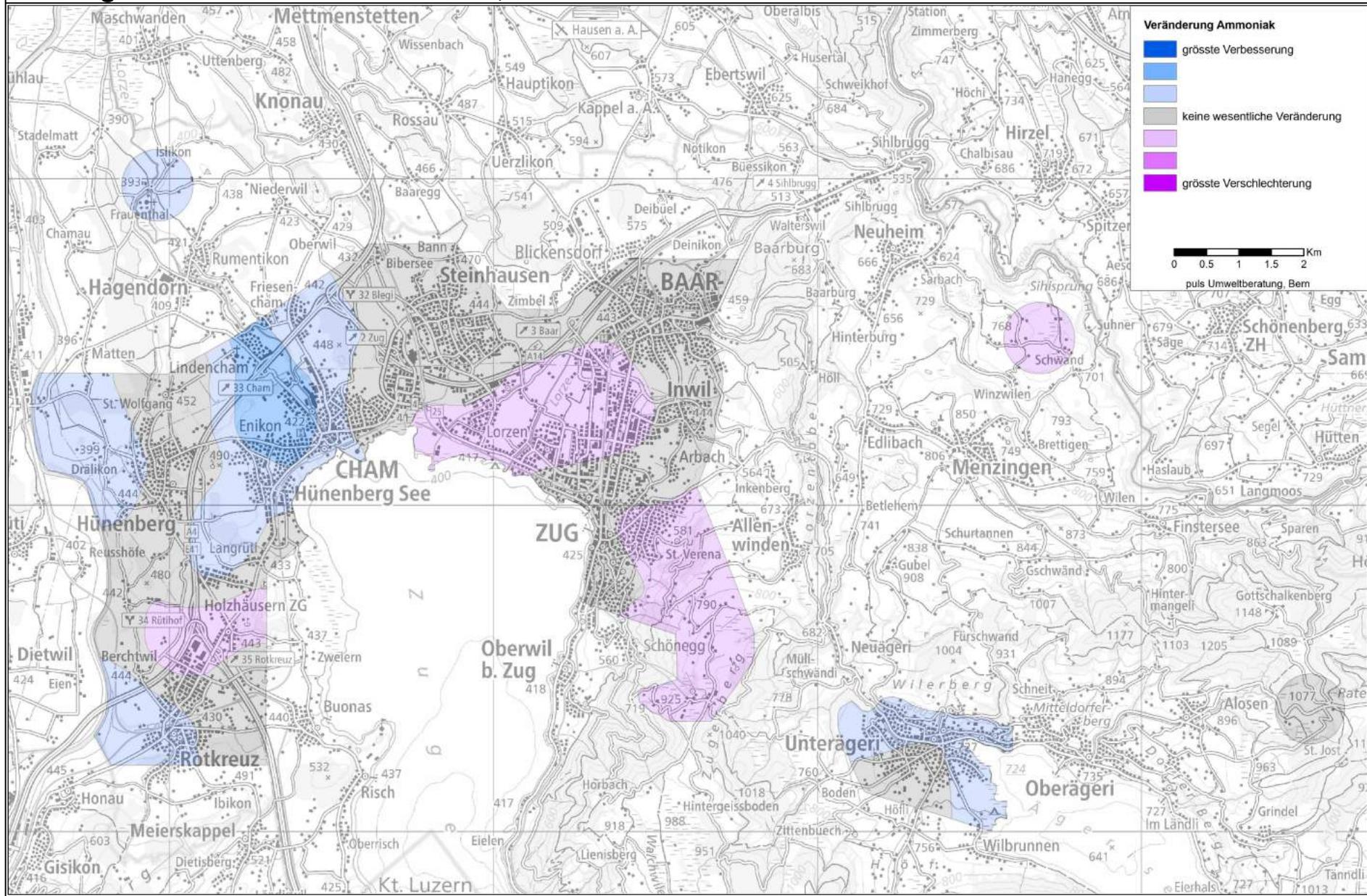
Anhang 3c: Flechtenindex Ammoniak 2023



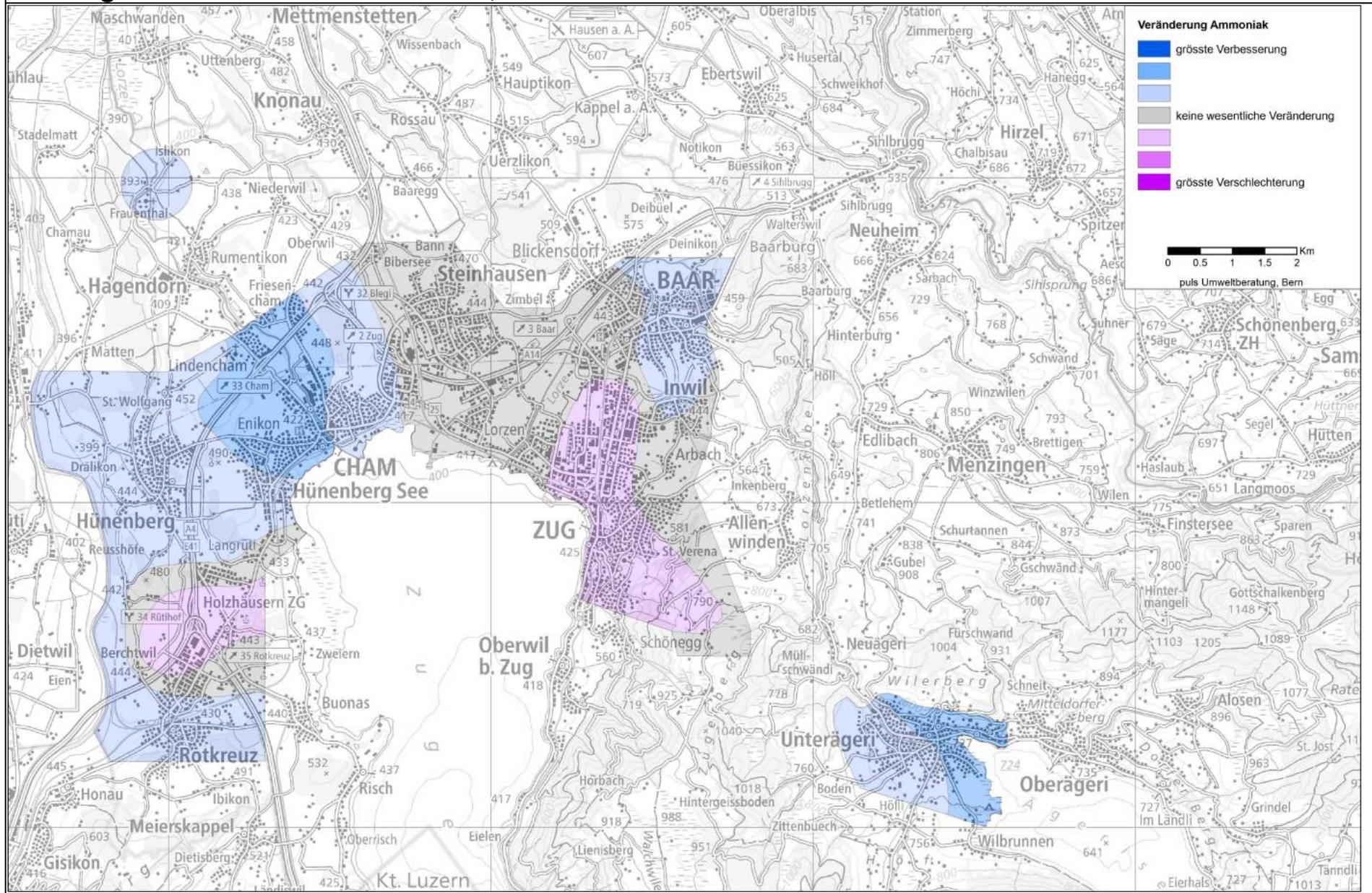
Anhang 3d: Flechtenindex Ammoniak, Differenz 2003 - 2013



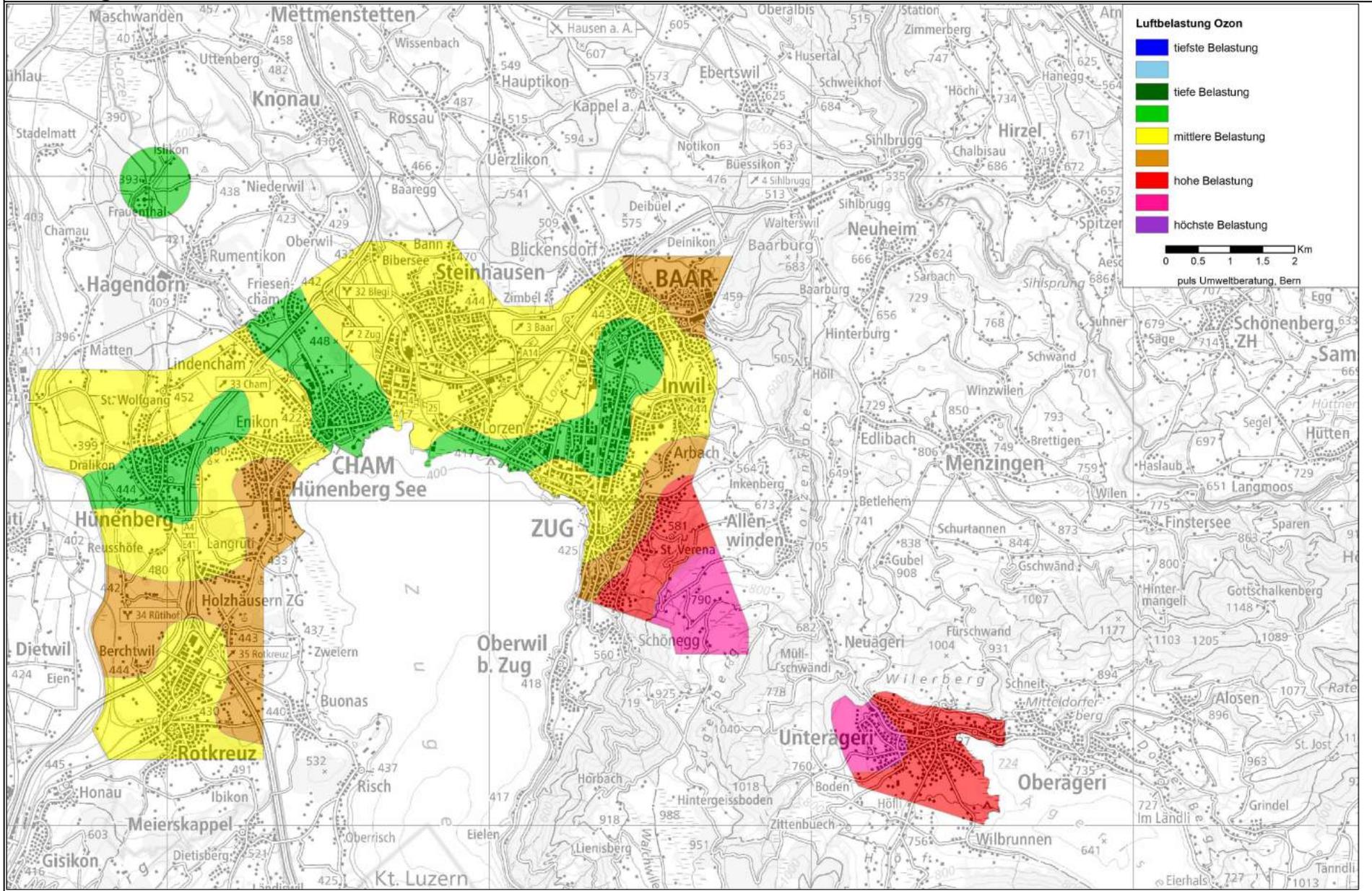
Anhang 3e: Flechtenindex Ammoniak, Differenz 2013 - 2023



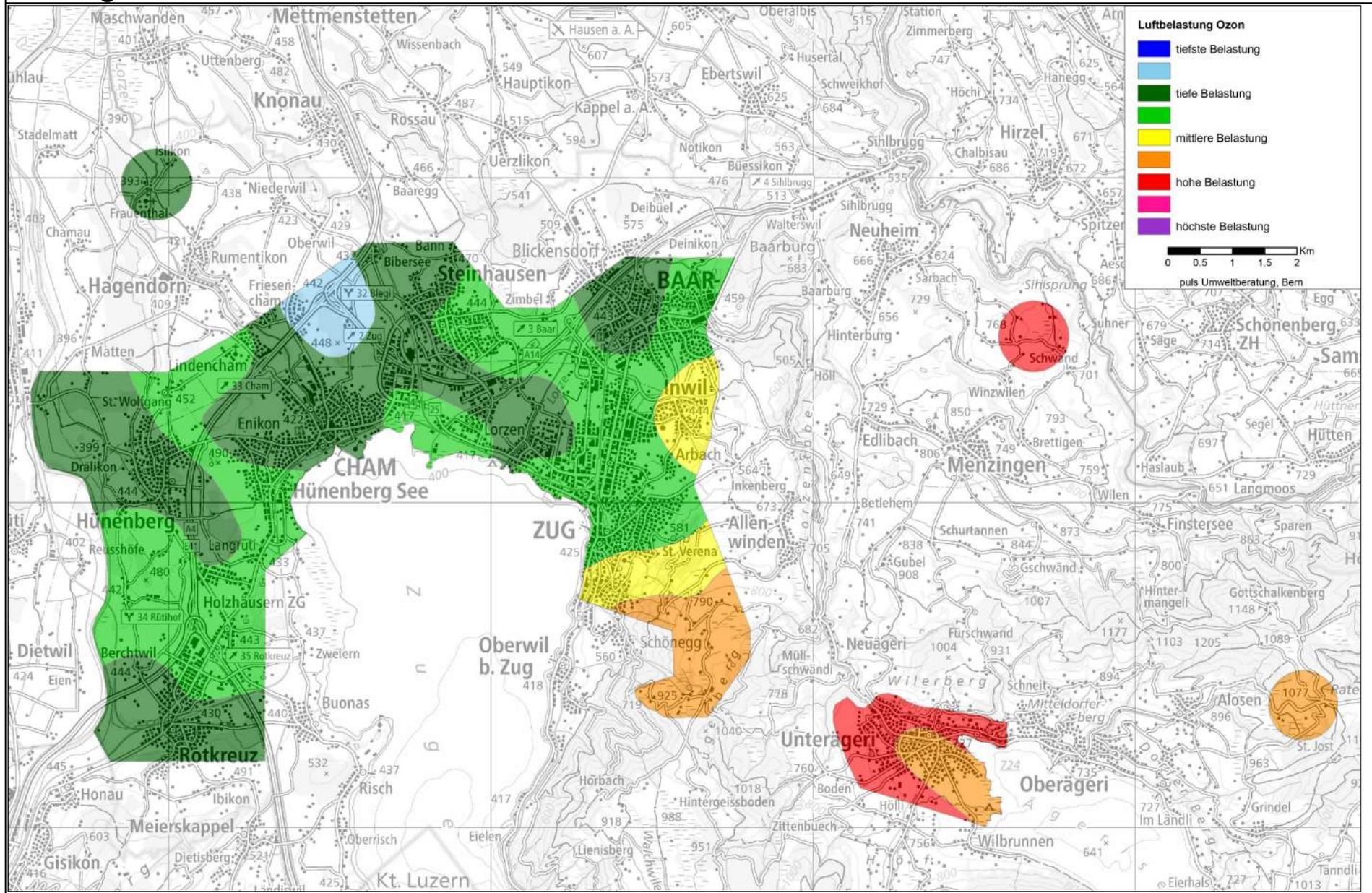
Anhang 3f: Flechtenindex Ammoniak, Differenz 2003 - 2023



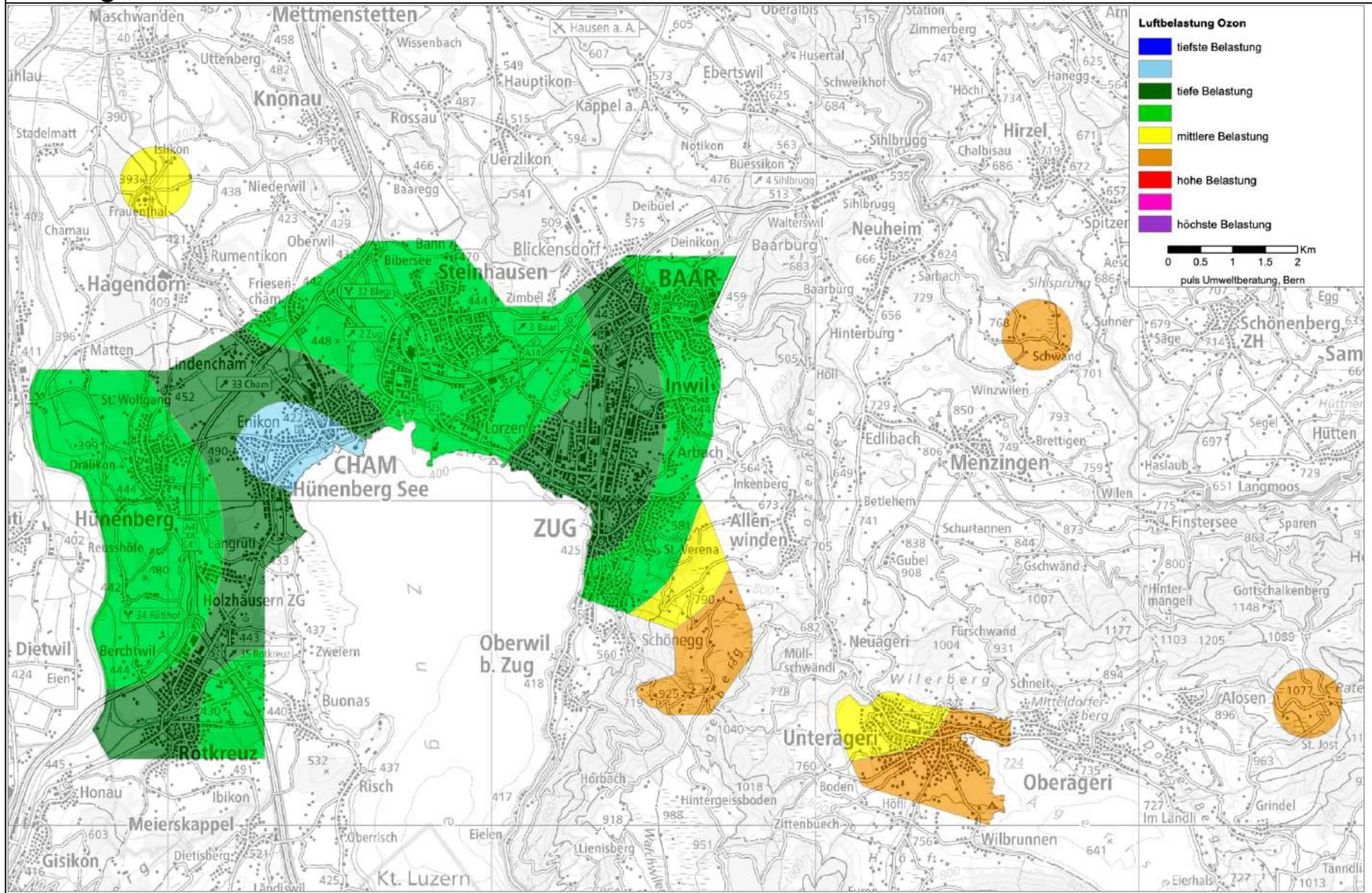
Anhang 4a: Flechtenindex Ozon 2003



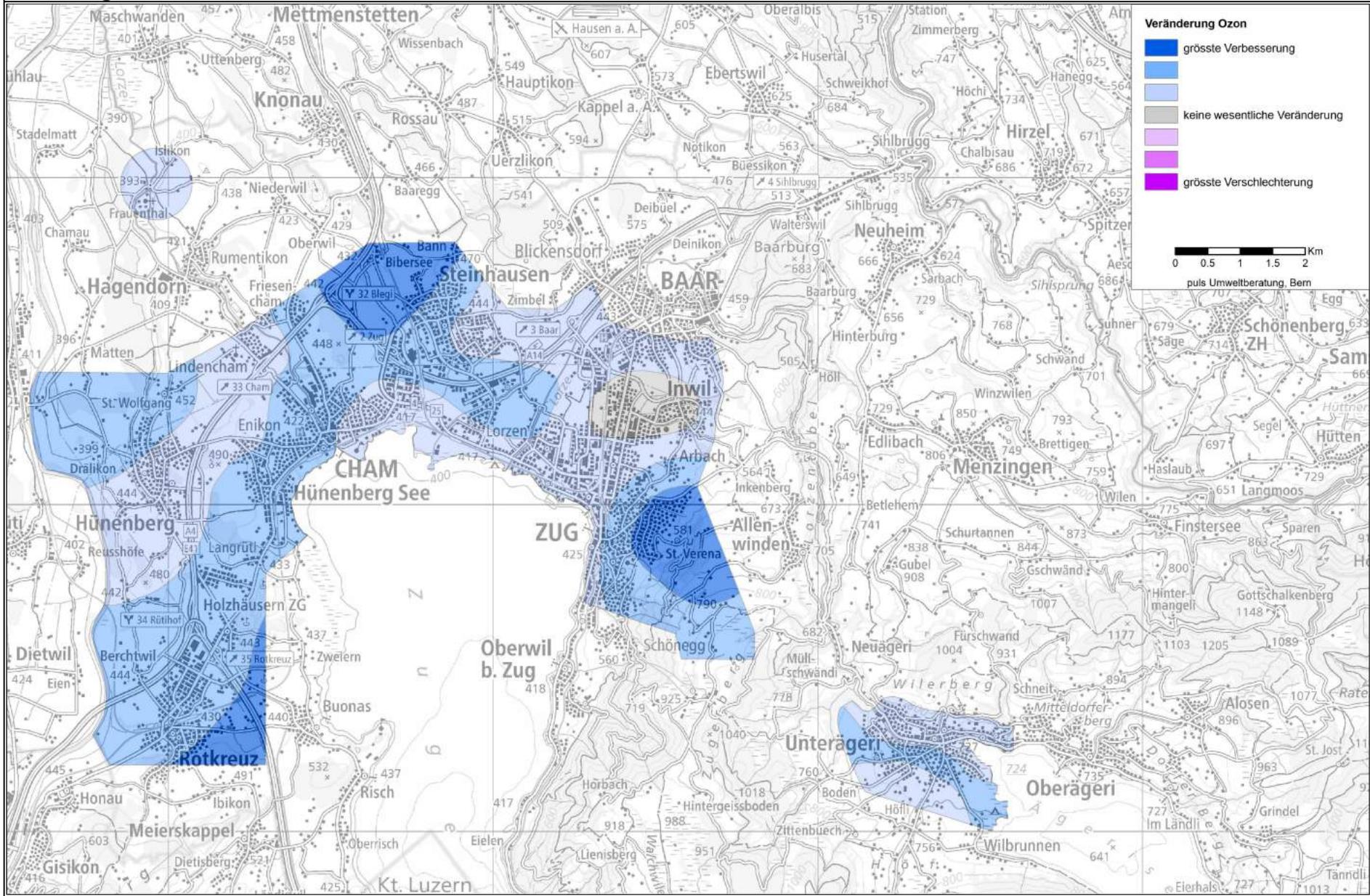
Anhang 4b: Flechtenindex Ozon 2013



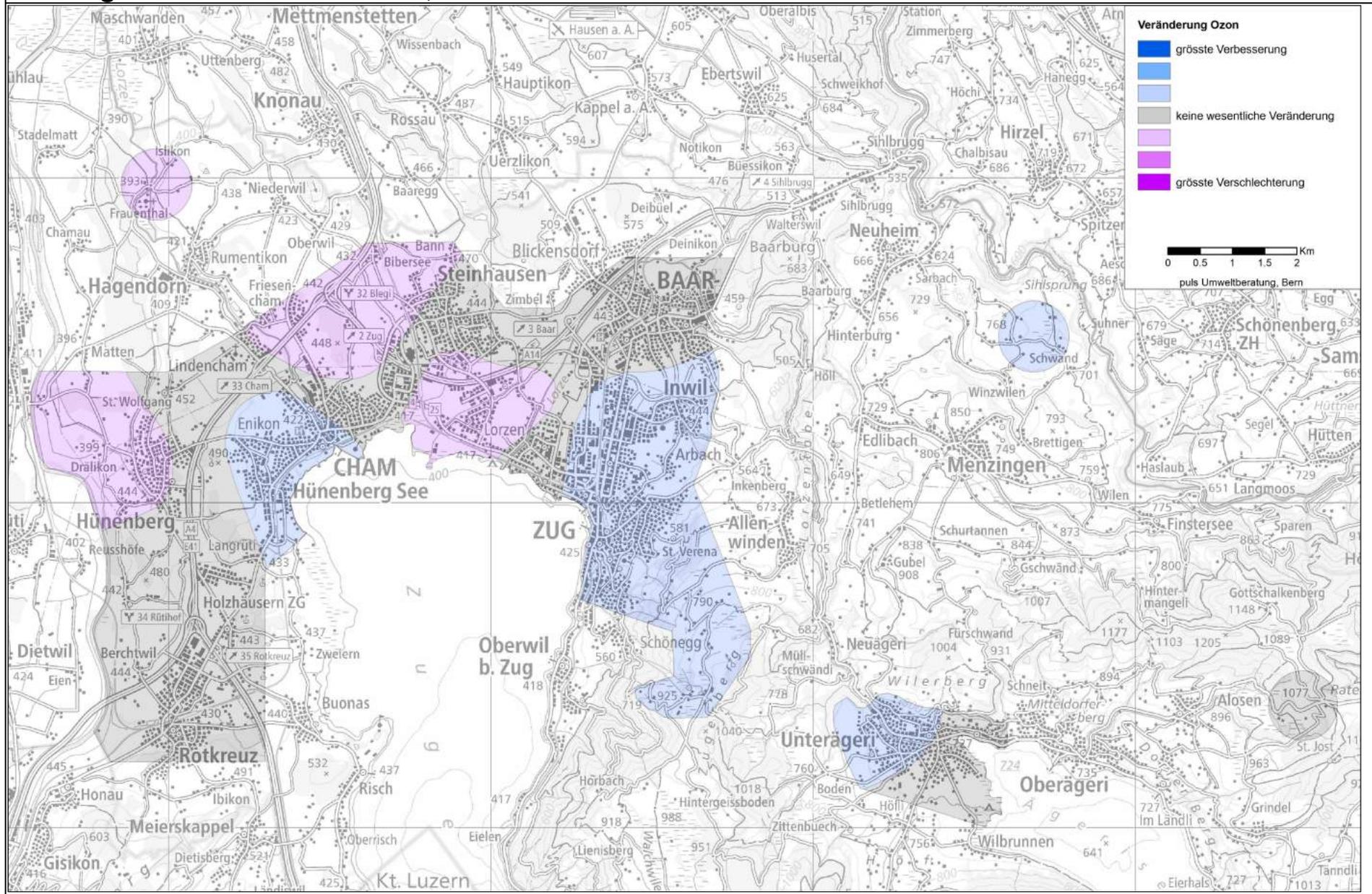
Anhang 4c: Flechtenindex Ozon 2023



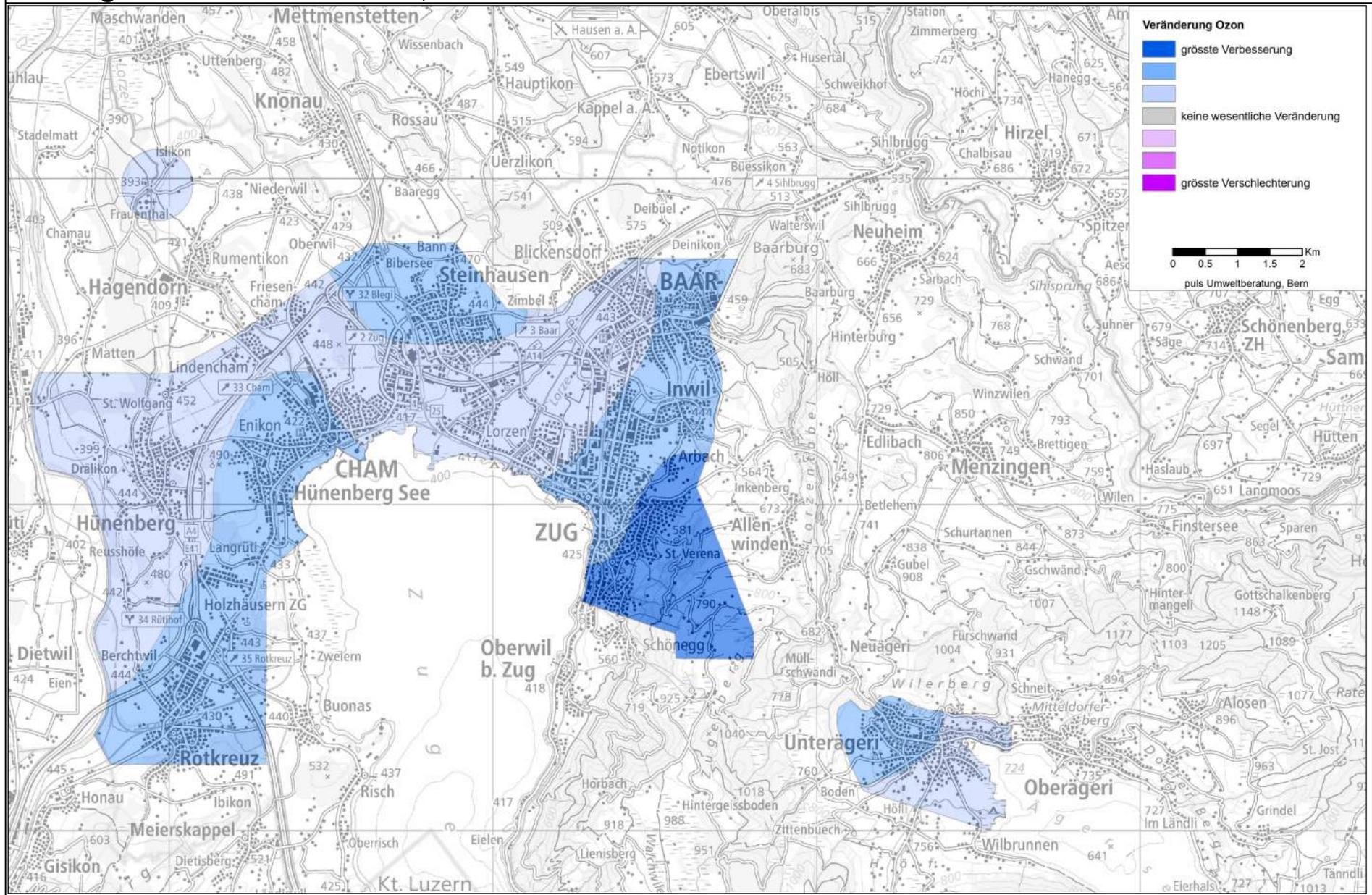
Anhang 4d: Flechtenindex Ozon; Differenz 2003 - 2013



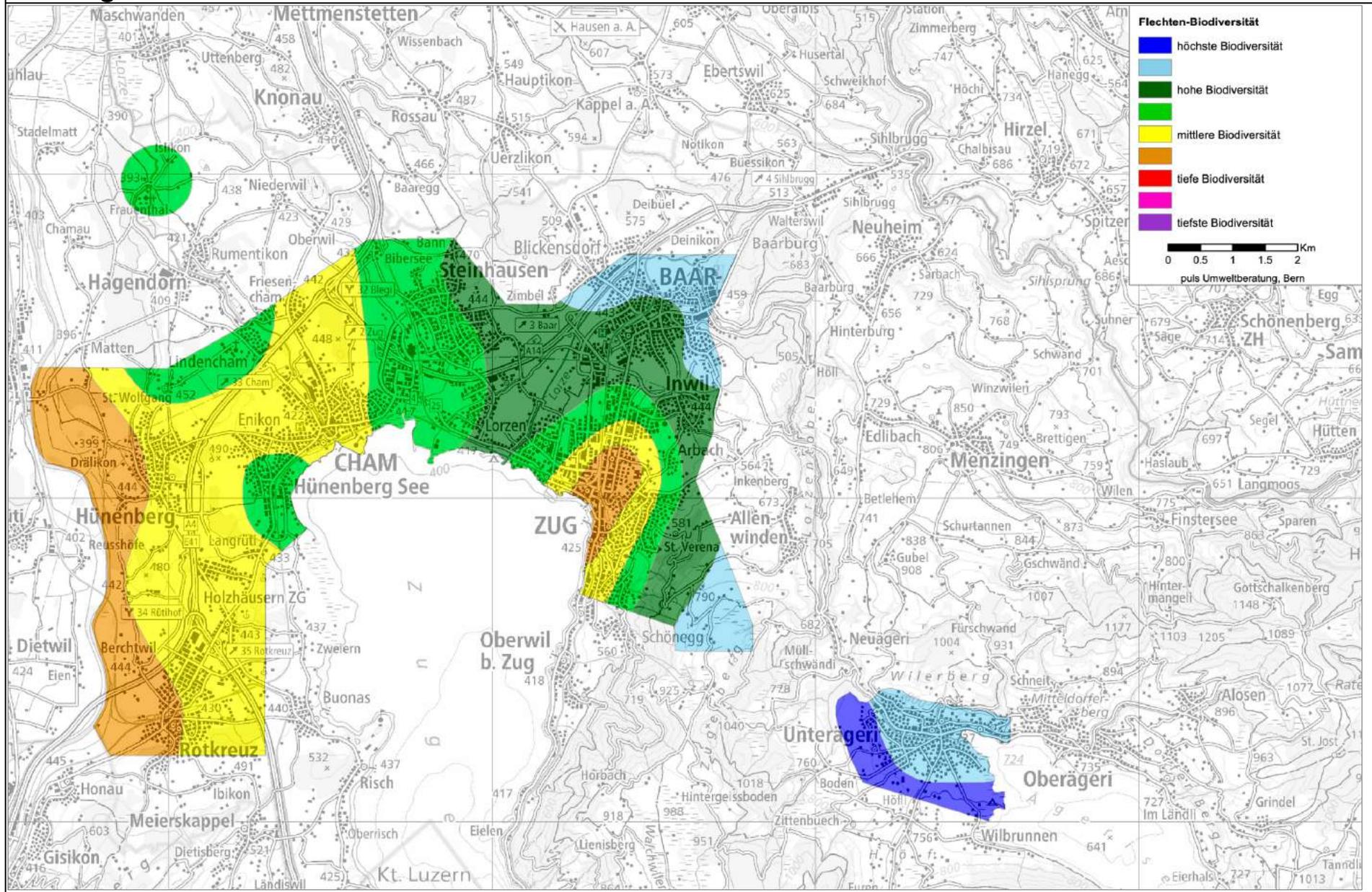
Anhang 4e: Flechtenindex Ozon; Differenz 2013 - 2023



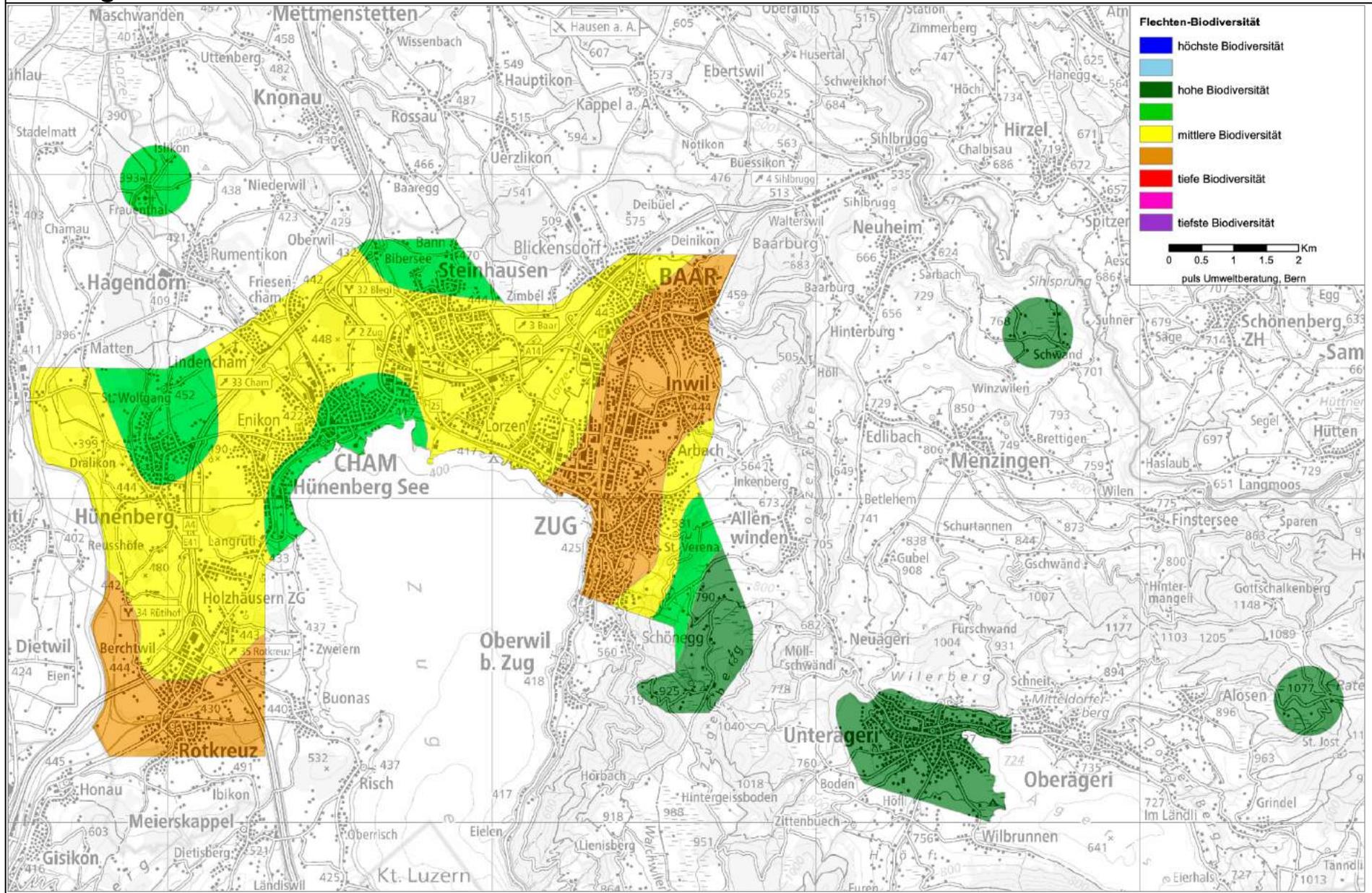
Anhang 4f: Flechtenindex Ozon; Differenz 2003 - 2023



Anhang 5a: Flechten-Biodiversität 1993



Anhang 5b: Flechten-Biodiversität 2023



Anhang 5c: Flechten-Biodiversität, Differenz 1993 - 2023

