



# **Flechten und Luftqualität in der Region Aarau: Erfolgskontrolle 2006**

im Auftrag des Kantons Aargau,  
Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung für Umwelt

19. Februar 2007

## **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](mailto:info@pulsbern.ch)  
[www.pulsbern.ch](http://www.pulsbern.ch)



# Inhalt

1. Zusammenfassung .....	1
2. Einleitung.....	4
3. Ziele .....	6
4. Methode .....	7
5. Flechtenkarten 1989 und 2006 .....	9
6. Differenzkarte 1989 bis 2006 .....	16
7. Auswertung einzelner Flechtenarten.....	18
Parmelia sulcata.....	23
Physcia adscendens-Gruppe .....	25
Parmelia tiliacea.....	27
Hypogymnia physodes .....	29
8. Acidoindex und Nitroindex .....	31
9. Vergleich mit dem Limmattal.....	42
10. Analyse der Veränderungen.....	44
10.1 Einleitung .....	44
10.2 Emissionsdaten .....	44
10.3 Immissionsmessungen.....	46
10.4 Flechten-Differenzkarte und technische Messdaten.....	50
10.5 Flechten und technische Messungen: Zwei Messsysteme .....	50
10.6 Vergleich mit Flechtenuntersuchungen im Mittelland .....	51
10.7 Weitere mögliche Gründe für den Flechtenrückgang .....	53
11. Schlussfolgerungen.....	55
12. Glossar .....	57
13. Literatur.....	60
14. Anhang .....	62

Projektbearbeitung:

Dr. Martin Urech

Ingrid Schär

Carmen Senn



# 1. Zusammenfassung

Flechten sind empfindliche Bioindikatoren der Luftbelastung. Mit der standardisierten und kalibrierten Methode der Bestimmung des Flechtenindex (IAP18) ist es möglich, die gesamthafte Luftbelastung mit diesen Indikatoren zu erfassen. Durch den Vergleich mit anderen Luftgütedaten (Emissionen, Immissionen) können Hinweise auf Ursachen der Flechtenbeeinträchtigungen gewonnen werden. Gleichläufigkeiten und Zusammenhänge zwischen Flechtenbewuchs und Luftdaten können festgestellt werden, auch wenn keine gesicherten Rückschlüsse auf die Wirkung von Einzelschadstoffkomponenten möglich sind.

In der Region Aarau wurde 1989 die Luftqualität erstmals mit dieser biologischen Methode erfasst. Mit der Wiederholung 2006 wurde nun die heutige Luftbelastung erfasst und die Entwicklung der letzten 17 Jahre aufgezeigt.

## **Flechten als Zeiger der Luftbelastung**

Flechten bilden eher unscheinbare, krusten-, blatt- oder strauchförmige Polster auf Baumrinden. Diese Lebewesen reagieren empfindlich auf Luftschadstoffe. Je stärker die Luft mit Schadstoffen belastet ist, desto weniger Flechten vermögen die Rinde von Baumstämmen zu besiedeln. Flechten vermitteln ein Gesamtbild der Luftbelastung, welche auf Pflanzen, Tiere und auf den Menschen einwirkt. Nicht Konzentrationen einzelner Schadstoffe werden angezeigt, sondern die Auswirkung des Gesamtgemisches unterschiedlichster Schadstoffe.

## **Luftgüte 1989**

Im Zentrum von Aarau wurde eine kritische Luftbelastung (rote Zone) festgestellt. Daran anschliessend und im Zentrum von Suhr war die Luftbelastung stark (orange Zone). Grosse Teile des Gebietes waren gering oder sehr gering belastet.

## **Luftgüte 2006**

Das Zentrum von Aarau weist nach wie vor eine kritische Luftbelastung auf. Die Zone mit starker Belastung hat sich ausgedehnt. Dominierend ist nun die gelbe Zone mit mittlerer Luftbelastung. Aber noch immer sind die Zonen der geringen und sehr geringen Belastung vorhanden: auf der Staflegg, in und um Biberstein, im Aarauer Schachen, im Gönertwald und in Buchs.

### **Differenzkarte 1989 bis 2006**

Die Differenzkarte visualisiert die räumlichen Veränderungen der Luftbelastung zwischen den Untersuchungsjahren. In den letzten 17 Jahren hat sich die Gesamtluftbelastung in der Region Aarau mehrheitlich verschlechtert. In ehemals gering belasteten Gebieten hat sich die Situation stark verschlechtert, so z. B. in Küttigen und in Buchs. Grosse Gebiete sind in der hellroten Zone. In den ehemals stark und mittel belasteten Gebieten rund um Aarau hat sich die Luftbelastung nicht wesentlich verändert.

### **Acidindex und Nitroindex**

Flechten reagieren artspezifisch auf den Säuregehalt ihrer Umgebung. Durch die Auswertung von geeigneten Zeigerarten wird der Acidindex gebildet, welcher Aussagen über den Säuregehalt und die Acidität der Immission erlaubt.

1989 ist das Gebiet sauer geprägt, einige wenige Georäume weisen auf basische Immissionen hin. 2006 ist die Situation anders, weite Teile sind basisch geprägt. Die Differenzkarte zeigt, dass das gesamte Gebiet basischer geworden ist. Diese Veränderung des Acidindex ist gleichläufig mit dem Anstieg des pH-Wertes im Regen.

Der Nitroindex ist eine Messgrösse für den Eutrophierungsgrad durch Ammoniak. 1989 ist gut die Hälfte der Georäume anitrophil geprägt, 2006 ist es nur noch knapp jeder zehnte. Die Differenzkarte zeigt, dass das gesamte Gebiet nitrophiler geworden ist.

Die Flechten zeigen eine zunehmende Eutrophierung durch Ammoniak-eintrag an, das Artenspektrum verschiebt sich in Richtung nitrophiler Arten und geht einher mit einer Artenverarmung.

### **Vergleich mit dem Limmattal**

Im westlichen Limmattal wurden ebenfalls 1989 Flechtendaten erhoben, Erfolgskontrollen wurden 1994/1995 und 2003 durchgeführt. Die Daten von 1989, resp. 2003/2006 werden miteinander verglichen.

Das westliche Limmattal war 1989 im Gegensatz zur Region Aarau stark belastet. Heute werden beide Gebiete von der mittleren Gesamtbelastung dominiert. Es hat eine Nivellierung der Luftbelastung stattgefunden. Diese Nivellierung wurde in verschiedenen Untersuchungen im Schweizer Mittelland festgestellt.

### **Analyse der Veränderungen**

Die festgestellten Veränderungen der Flechtenvegetation wurden in Bezug auf mögliche Ursachen analysiert.

Im Untersuchungsgebiet ist kein offensichtlicher Zusammenhang zwischen der Verschlechterung der Gesamtbelastung und den technischen Emissions- und Immissionsdaten erkennbar. Auffallend ist, dass weite Teile des Untersuchungsgebietes 1989 gering oder sehr gering belastet waren. Die Verschlechterungen traten mehrheitlich in diesen Gebieten auf. Dieses Phänomen ist in allen Flechtenuntersuchungen im Schweizer Mittelland feststellbar.

Flechten und technische Immissionsmessungen sind zwei verschiedene Messsysteme zur Erfassung der Luftbelastung. Sie müssen nicht unbedingt identische Resultate liefern; unterschiedliche Resultate, wie sie im untersuchten Gebiet festgestellt wurden, sind durchaus denkbar.

Als mögliche Gründe für den Flechtenrückgang in ehemals unbelasteten Gebieten sind zu nennen: ein Ansteigen der Nebelgrenze, Inversionslage im Februar 2006, der Einfluss bisher nicht erkannter Schadstoffe, die Kombinationswirkung von Schadstoffen, eine Mehrbelastung durch nährstoffhaltige Schadstoffe, eine erhöhte Bautätigkeit und eine Langzeitwirkung durch chronische Schädigung der Flechten. Gut denkbar ist auch, dass eine Kombination von verschiedenen dieser Ursachen zum festgestellten Flechtenrückgang geführt hat.

Methodische Ursachen, natürliche Prozesse und Standortfaktoren (mit Ausnahme der Nebelobergrenze und der Inversionslagen) können mit grosser Wahrscheinlichkeit als Ursachen für die Veränderungen ausgeschlossen werden.

### **Schlussfolgerungen**

Die Flechten erfassen die Wirkung der Luftbelastung und eignen sich zur Erfolgskontrolle der lufthygienischen Massnahmen, auch wenn in der vorliegenden Untersuchung nicht alle Ergebnisse in einen direkten Bezug zu den technischen Daten zur Luftqualität gebracht werden konnten. Gerade hier liegt ihr Wert als biologische Indikatoren: Sie ergänzen die technischen Messungen mit Aussagen zur Wirkung der Luftbelastung auf Lebewesen.

Zur systematischen Überwachung der Luftqualität bietet sich die erneute Wiederholung der Flechtenuntersuchung in einigen Jahren an. Dann werden auch erste Aussagen über die Auswirkungen der neuen Staffeleggstrasse möglich sein.

Die vorliegenden Ergebnisse können für die Information der Behörden und der Öffentlichkeit über die Wirkung der bisherigen Luftreinhaltepolitik und die Notwendigkeit weiterer Massnahmen verwendet werden. Die Untersuchung kann dazu in einer leicht verständlichen und ansprechenden Form aufbereitet und präsentiert werden.

## 2. Einleitung

### **Flechten als Bioindikatoren**

Baumbewohnende Flechten sind empfindliche Zeiger der Luftverschmutzung. Sie reagieren empfindlich auf Luftschadstoffe. Flechten bestehen aus einer Pilz- und einer Algenart, die eine Lebensgemeinschaft bilden. Diese Symbiose reagiert besonders sensibel auf Veränderungen der Umweltbedingungen. Hinzu kommt, dass sich Flechten praktisch ausschliesslich von feinsten Staubteilchen aus Regen, Nebel und Luft ernähren. Sie sind den Schadstoffen der Luft schutzlos ausgeliefert. Je stärker die Luft mit Schadstoffen belastet ist, desto weniger Flechten vermögen die Rinde von Baumstämmen zu besiedeln. Wo viele verschiedene Flechtenarten wachsen, ist demnach die Luftqualität besser als an Orten, wo die Rinde fast kahl ist.

Mit der kalibrierten Flechtenindikationsmethode lassen sich flächendeckende Karten der Gesamtluftbelastung erstellen.

### **Bisherige Untersuchungen**

Im Kanton Aargau wurden 1989 entsprechende Flechtenuntersuchungen in den Regionen Aarau, Rheinfelden und im westlichen Limmattal durchgeführt (Bericht 1990: ‚Flechten als Bioindikatoren der Luftverschmutzung im Kt. Aargau, Untersuchungen 1989‘). In den Jahren 1994/95 und 2003 wurden im Limmattal Wiederholungsuntersuchungen durchgeführt (Bericht 1995: ‚Wiederholungsuntersuchungen mit Flechten: 6-Jahrestrend der Luftbelastung im westlichen Limmattal‘, Bericht 2003: ‚Flechten und Luftqualität im westlichen Limmattal: Erfolgskontrolle 2003‘).

Im Jahr 2006 wurde in der Region Aarau eine Wiederholungsuntersuchung durchgeführt. Der vorliegende Bericht stellt diese vor und zeigt auch den Vergleich von 1989 bis 2006 auf. Zudem werden die beiden Gebiete Aarau und westliches Limmattal miteinander verglichen.

1989 waren in der Region Aarau grosse Gebiete gering oder sehr gering belastet. Im Zentrum von Aarau gab es eine Zone von kritischer Gesamtluftbelastung umgeben von Zonen mit starker und mittlerer Belastung.

### **Bisherige Massnahmen**

1991 erstellte der Kanton Aargau den ersten Massnahmenplan zur Luftreinhaltung. Die dadurch ausgelösten Massnahmen führten zu Verbesserungen der Luftqualität. Diese Verbesserungen wurden auch durch die genannten Flechtenuntersuchungen im westlichen Limmattal nachgewiesen. Noch sind aber nicht alle Grenzwerte der eidgenössischen Luftrein-

halteverordnung eingehalten. Deshalb erstellte der Kanton im Jahr 2002 einen neuen Massnahmenplan Luft. Ziel ist es, mittels zusätzlichen Massnahmen die Luftqualität weiter zu verbessern.

### **Erfolgskontrolle**

Wiederholungsuntersuchungen mit Flechten sind ein Instrument der Erfolgskontrolle von lufthygienischen Massnahmen, wie sie die genannten Massnahmenpläne vorsehen. Wie die beiden Erfolgskontrollen im westlichen Limmattal eindrücklich bestätigten, zeigen die Flechtenuntersuchungen auf, dass sich die Sanierungsmassnahmen in diesem Gebiet positiv auf die belebte Umwelt auswirken.

Anhand der Flechtenuntersuchungen kann die Wirkung der Massnahmen auf die Luftbelastung räumlich dargestellt werden. Wiederholungsuntersuchungen führen die Wirkungserhebungen zur Luftreinhaltung in sinnvoller Weise fort.

## 3. Ziele

Die Wiederholung der Flechtenuntersuchung in der Region Aarau dient der Erfolgskontrolle der in den letzten 17 Jahren erfolgten lufthygienischen Massnahmen.

Die Zweituntersuchung der Immissionsbelastung mit Flechten hat folgende Ziele:

- a) Die Flechtendaten sollen analog zu denjenigen von 1989 erhoben und ausgewertet werden.
- b) Der heutige Zustand der Luftqualität in der Region Aarau soll analysiert und interpretiert werden. Die Luftbelastung 2006 wird mit Flechten als Bioindikatoren räumlich differenziert erfasst und in Form einer Luftgütekarte illustriert.
- c) Zusätzlich zum 1989 untersuchten Gebiet soll die Luftbelastung entlang der Staffeleggstrasse von Küttigen bis zur Staffelegg erfasst werden.
- d) Die Entwicklung der Luftqualität seit 1989 soll erfasst und interpretiert werden. Die Veränderungen der Immissionssituation von 1989 bis 2006 werden in einer Differenzkarte dargestellt.
- e) Die Erfolgskontrolle soll methodisch gleich wie diejenigen im Limmattal (1995 und 2003) durchgeführt werden; die Resultate der Regionen Aarau und Limmattal sollen miteinander verglichen werden.
- f) Die Flechtenerhebung soll die Luftbelastungen sichtbar und erfahrbar machen: Sie dient als Grundlage für die Information von Behörden und Öffentlichkeit über den Erfolg der Luftreinhaltung im Kanton Aargau.
- g) Durch die Auswertung der vorkommenden Flechtenarten sollen Aussagen über den Säuregrad der Immissionen (Acidindex) und der Nährstoffversorgung (Nitroindex) und deren Veränderung gewonnen werden.
- h) Die Untersuchungsergebnisse sollen so dokumentiert werden, dass weitere Wiederholungsuntersuchungen in späteren Jahren problemlos möglich sind.

## 4. Methode

### **Kalibrierte Flechtenindikationsmethode**

Die Flechten-Bioindikation bildete Teil des Nationalen Forschungsprogramms 14 ‚Lufthaushalt und Luftverschmutzung in der Schweiz‘. Mitte der 80er Jahre wurde die kalibrierte Flechtenindikationsmethode entwickelt und mit technischen Luftdaten kalibriert (Urech et al. 1991). Seither fand die Methode vielfache Anwendung in kantonalen und kommunalen Projekten, in welchen die Luftbelastung mit dem so genannten Flechtenindex bestimmt wurde.

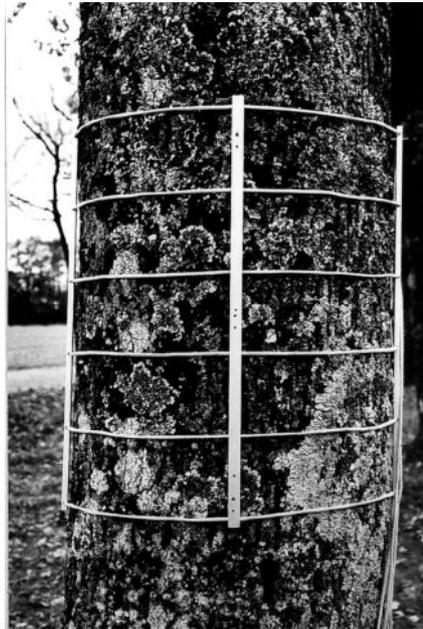
Räumlich ist die Flechtenindikationsmethode im Schweizer Mittelland in waldfreien Gebieten unterhalb etwa 1000 m ü. M. anwendbar. Die Anzeige der Luftbelastung durch die Flechtenvegetation erfolgt mit einer Verzögerungszeit von 1 bis 3 Jahren. Die Flechtenvegetation spiegelt demnach die Belastungssituation der letzten Jahre wider. Die Flechtenergebnisse entsprechen dem Integral der Gesamtluftbelastung, welche auch Spitzenbelastungen beinhaltet.

Die Methode basiert auf der einmaligen Auszählung der Vielfalt und Häufigkeit der Flechten auf ausgewählten, freistehenden Laubbäumen. Berücksichtigt werden Linden, Ahorne, Eschen und Eichen. Ideale Trägerbäume stehen frei, ausserdem sind sie möglichst senkrecht gewachsen und sie sollten keine tiefhängenden Äste sowie eine ungestörte Aufnahme­fläche aufweisen. Zur Bestimmung des Flechtenindex (IAP18, Index of Atmospheric Purity) muss keinerlei Flechtenmaterial entnommen werden, die Flechten werden nicht zerstört.

Die kalibrierte Flechtenmethode erfasst die Flechtenvegetation innerhalb einer standardisierten Aufnahme­fläche am Baum. Diese ist durch das Frequenzgitter begrenzt, das immer auf dieselbe Weise am Baum befestigt wird (Abb. 1). Das Frequenzgitter ist 50 cm hoch, umfasst den halben Stammumfang und wird immer in Richtung des grössten Flechtenbewuchses am Baum befestigt. Die Breite der Aufnahme­fläche ist also umso grösser, je dicker der Trägerbaum ist. Das Frequenzgitter unterteilt die Aufnahme­fläche in zehn gleich grosse Felder.

Die Frequenz bezeichnet die Anzahl Felder im Frequenzgitter, in welchen eine bestimmte Flechtenart oder –artengruppe auftritt. Die Frequenz einer Art kann demnach 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:  
Das Frequenzgitter  
wird so an die  
Stammfläche ange-  
bracht, dass 10  
gleichgrosse Felder  
entstehen.



Der IAP18-Wert eines Trägerbau-  
mes ist die Summe der Frequenzen  
aller berücksichtigten Flechtenarten.  
Dieser Flechtenwert charakterisiert  
die Luftgüte aufgrund der Häufig-  
keit von 49 verschiedenen Flech-  
tenarten und –artengruppen in der  
Aufnahmefläche an den untersuch-  
ten Bäumen. Einige wenige Flech-  
tenarten stören die IAP-Aussage  
und werden für die Berechnung des  
IAP18-Wertes grundsätzlich aus-  
geschlossen.

### **Flechtenuntersuchungen 2006**

Die Flechtenuntersuchung 2006 wurde analog zu der Erhebung von 1989 durchgeführt. Das Gebiet umfasst eine Fläche von 33.5 km<sup>2</sup>. Davon sind rund 4 km<sup>2</sup> randliche und eingeschlossene Waldgebiete, welche zwar durch die Luftgütekarte abgedeckt sind, in denen aber keine Flechtenerhebungen vorgenommen werden. Die Flechtendaten wurden von Mai bis Oktober 2006 erhoben.

Im Untersuchungsgebiet wurde möglichst an den gleichen Bäumen mit der identischen Methode der Flechtenluftgütewert IAP18 bestimmt. Pro km<sup>2</sup>-Rasterflächen des Landeskartenkoordinatennetzes wurden jeweils sechs Trägerbäume zur Analyse der baumbewohnenden Flechtenvegetation ausgewählt. Insgesamt wurden 177 Bäume kartiert, 153 auf dem Gebiet der Untersuchung 1989 und 24 Bäume im erweiterten Gebiet Küttigen-Stafflegg. Gut 44% Prozent der 1989 kartierten Bäume mussten durch neue ersetzt werden, da sie entweder gefällt wurden oder sich aus anderen Gründen nicht mehr für die Methode eigneten. Die Daten der einzelnen Bäume befinden sich im Anhang.

Die Flechtenwerte der einzelnen Bäume wurden in Gruppen von 4 bis 6 Bäumen zu einem Mittelwert verrechnet. Diese Baumgruppen stehen in geographisch einheitlichen Räumen, so genannten Georäumen. Das untersuchte Gebiet umfasst 38 Georäume. Es wird davon ausgegangen, dass die Flechten innerhalb eines Georaumes einer vergleichbaren Gesamtluftbelastung ausgesetzt sind. Die Daten der Georäume (Lage, Mittelwerte) befinden sich im Anhang.

## 5. Flechtenkarten 1989 und 2006

Die Luftgütekarte wird in Form einer Isolinienkarte erstellt, d.h. Punkte mit gleicher Belastung werden zu Linien verbunden. Die Luftgütekarte zeigt, räumlich differenziert, die Effekte der Luftbelastung auf die Flechten. Die Karte umfasst fünf Zonen mit unterschiedlicher Beeinträchtigung der Flechten. Die Zonengrenzen sind als Übergangsbereiche und deshalb nicht auf ihren metergenauen Verlauf hin zu interpretieren. Alle randlich liegenden Zonierungsverläufe sind mit Vorsicht zu interpretieren, da die fehlende Information im angrenzenden Gebiet eine gut abgestützte Linienführung erschwert. Linien, welche weniger präzise abgesichert sind, werden in den Karten durch Strichelung gekennzeichnet.

### **Der Stand der Luftbelastung 1989 ...**

Abbildung 2 (nächste Seite) zeigt die Luftgütekarte von 1989. Damals waren in diesem Gebiet alle fünf Zonen unterschiedlicher Luftqualität aufgetreten.

Das Stadtzentrum von Aarau gehörte der roten Zone der kritischen Luftbelastung an. Die orange Zone der starken Gesamtbelastung erstreckte sich vom Stadtzentrum Richtung Westen nach Rohr. Das Zentrum von Suhr war ebenfalls stark belastet. Anschliessend an die orange Zone folgen grössere Gebiete mit einer mittleren Gesamtbelastung (gelbe Zone). Eine recht grosse Fläche war gering belastet. So war die Gegend von Buchs, Teile von Biberstein, das Dorf Küttigen, der Aarauer Schachen, sowie Oberholz und Gönert in der grünen Zone. Eine Zone mit sehr geringer Gesamtbelastung (blaue Zone) befand sich im Norden des Gebiets zwischen Küttigen und Biberstein.

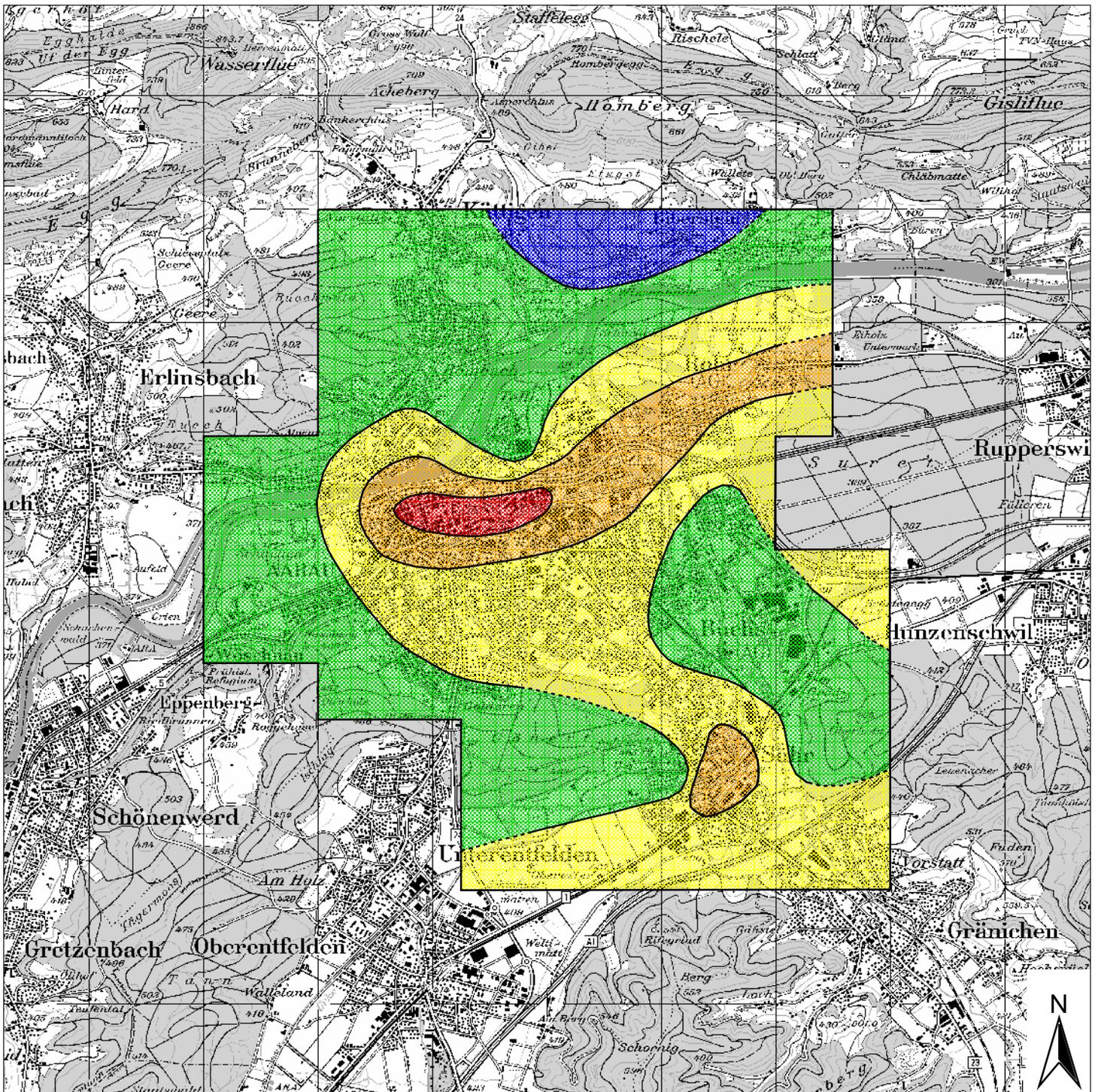
### **... und 17 Jahre später 2006**

Abbildung 3 (übernächste Seite) enthält die Luftgütekarte von 2006. Der Perimeter des Untersuchungsgebietes wurde gegenüber 1989 Richtung Staffelegg erweitert, da momentan eine neue Staffeleggstrasse gebaut wird. Der Verkehr vom und ins Fricktal soll in Zukunft die Stadt Aarau und das Dorf Küttigen entlasten und wird über die neue Aarebrücke und den neuen Tunnel direkt auf die Staffeleggstrasse geführt werden (Strassenbauprojekt Ostumfahrung Aarau).

Wiederum kamen alle fünf Zonen mit unterschiedlicher Luftqualität vor. Aber das Bild der Luftgütekarte hat sich in den letzten 17 Jahren stark verändert.

# Luftgütekarte 1989

## Bioindikation mit Flechten - Region Aarau



### Flechtenzonen

Flechtenwüste  
IAP18: 0 - 18



Innere Kampfzone  
IAP18: 19 - 31



Äussere Kampfzone  
IAP18: 32 - 44



Übergangszone  
IAP18: 45 - 57



Normalzone  
IAP18: > 58



### Gesamtluftbelastung

kritisch

stark

mittel

gering

sehr gering

1000 0 1000 Meter

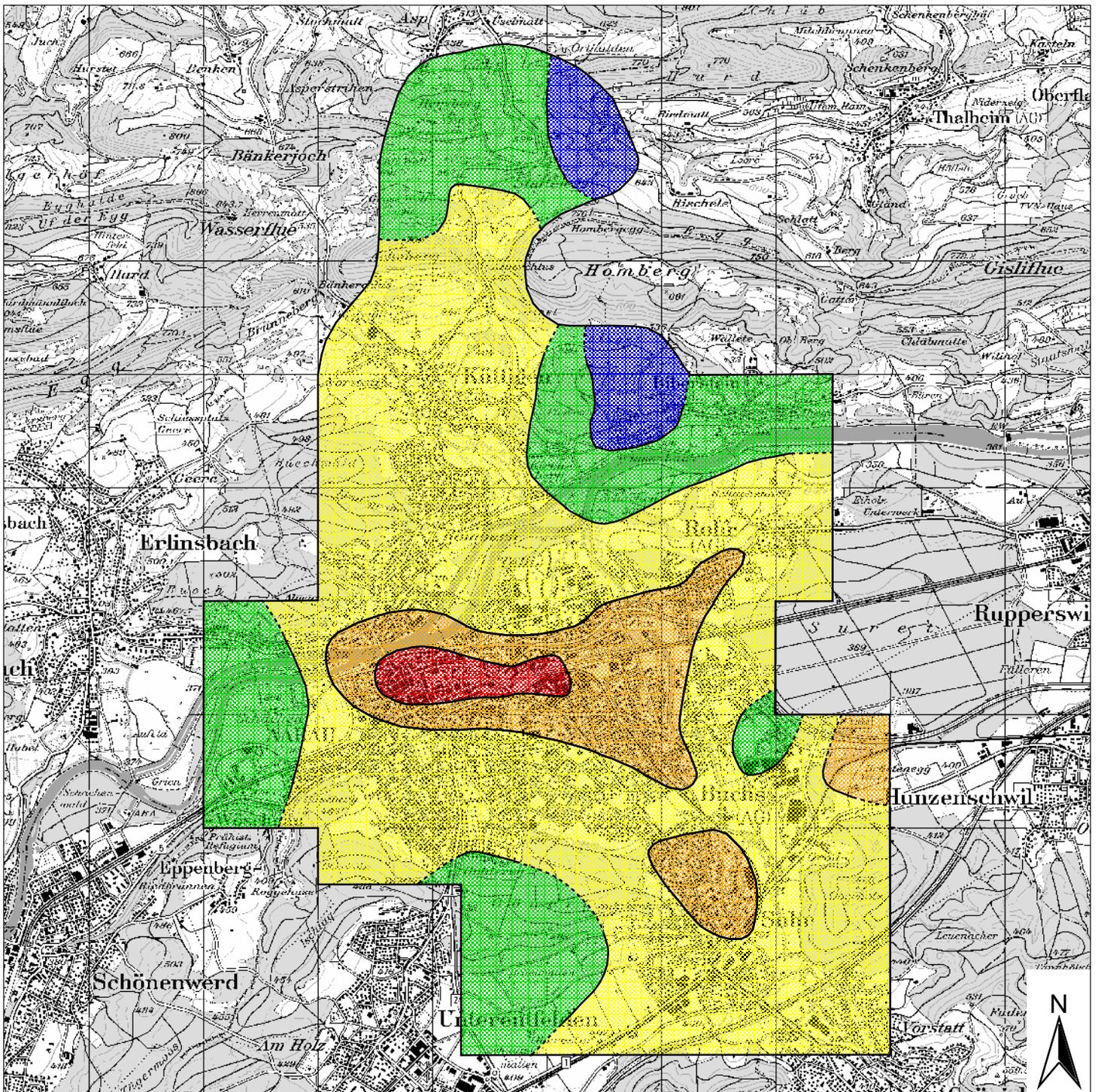


puls, Mühlemattstrasse 45, 3007 Bern

Kartendaten: PK50, 2004 swisstopo (DV642.4)

# Luftgütekarte 2006

## Bioindikation mit Flechten - Region Aarau



Flechtenzonen	Gesamtluftbelastung
Flechtenwüste IAP18: 0 - 18	 kritisch
Innere Kampfzone IAP18: 19 - 31	 stark
Äussere Kampfzone IAP18: 32 - 44	 mittel
Übergangszone IAP18: 45 - 57	 gering
Normalzone IAP18: > 58	 sehr gering

1000      0      1000 Meter



puls, Mühlemattstrasse 45, 3007 Bern

Kartendaten: PK50, 2004 swisstopo (DV642.4)

Das Stadtzentrum von Aarau liegt immer noch in der roten Zone mit kritischer Gesamtbelastung. Die Zone ist von vergleichbarer Grösse wie 1989.

Daran anschliessend liegt die Zone starker Belastung. Die Zentren von Rohr, Buchs, der nördliche Teil von Suhr und die Umgebung der Kehrichtverbrennungsanlage Buchs sind ebenfalls stark belastet.

Die gelbe Zone mit mittlerer Gesamtbelastung dominiert. Die Zonen mit geringer und sehr geringer Belastung sind an den Rand gedrängt worden. Es gibt jedoch noch blaue Zonen mit sehr geringer Gesamtbelastung auf der Staffelegg und zwischen Küttigen und Biberstein. Daran angrenzend, im Aarauer Schachen, Gönertwald und Brüelmatten sowie in Buchs befinden sich Gebiete mit geringer Belastung.

### Flächenanteil der einzelnen Zonen

Die Flächenanteile der einzelnen Zonen sind in Abbildung 4 tabellarisch und in Abbildung 5 grafisch dargestellt. Das Untersuchungsgebiet 2006 ist wegen der Erweiterung Staffelegg grösser.

Es fällt auf, dass es eine Verschiebung von der grünen zu der gelben Zone stattgefunden hat. 1989 dominierte die grüne Zone mit 48.3 % der gesamten Fläche, 2006 ist es die gelbe mit 58 %. Die kritisch belastete Zone hat um 0.2 km<sup>2</sup>, resp. 0.4 %, zugenommen. Die blaue Zone hat sich ebenfalls ein wenig ausgedehnt, wie auch die orange Zone.

Gesamtbelastung	Fläche 1989		Fläche 2006	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
kritisch	0.4	1.5	0.6	1.9
stark	2.9	10.2	4.0	11.8
mittel	10.1	36.0	19.5	58.0
gering	13.6	48.3	8.0	23.9
sehr gering	1.1	4.1	1.5	4.4
Total	28.1	100	33.5	100

Abb. 4:  
Absolute und relative  
Flächenanteile der  
einzelnen Belastungs-  
zonen.

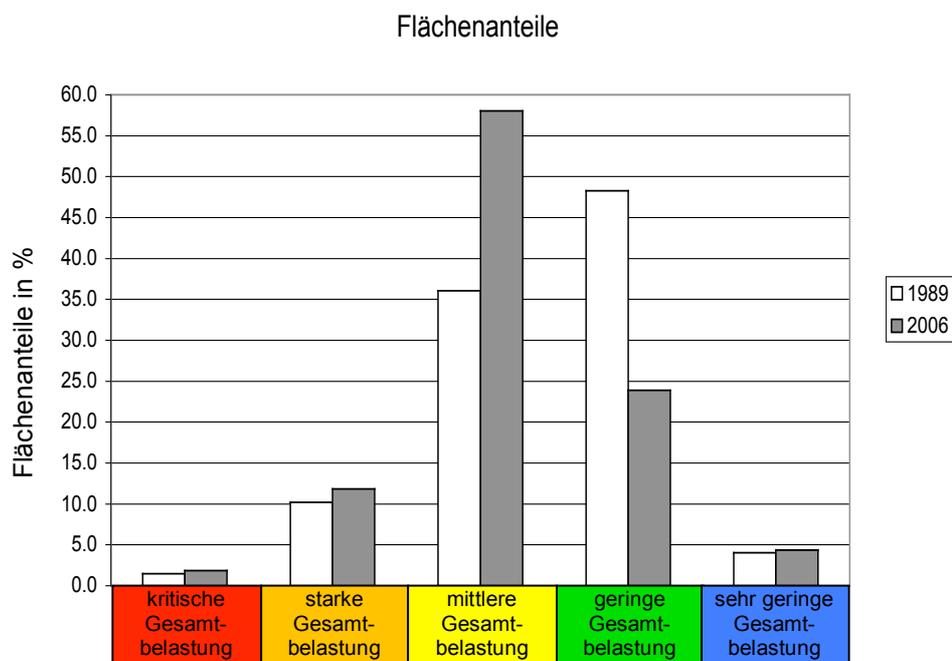


Abb. 5:  
Entwicklung der  
Flächenanteile der  
einzelnen Zonen.

### Artenzahl und Artenvielfalt

Die Luftbelastung äussert sich deutlich im Erscheinungsbild der Flechtenvegetation. So ist die Artenzusammensetzung, die Artenzahl (siehe Abb. 6), die Frequenz (siehe Kap. 7) und die Vitalität der Flechten in den fünf Zonen verschieden.

Die durchschnittliche Artenzahl pro Trägerbaum steigt regelmässig und fast linear mit zunehmend besserer Luftgütezone an (Abb. 6 und 7). Der kontinuierliche Anstieg entspricht der Definition des IAP18-Wertes: je mehr verschiedene Arten an einem Baum vorkommen und je höher ihr durchschnittlicher Frequenzwert ist, desto höher liegt der IAP18-Wert.

Eine weitere Information liefert die Artenvielfalt (Abb. 8). Diese Grösse gibt Auskunft darüber, wie viele verschiedene Flechtenarten auf den Trägerbäumen innerhalb einer Luftgütezone vorkommen. Man kann deutlich erkennen, dass in stark belasteten Zonen nur wenige Flechtenarten vorkommen. Mit der Verbesserung der Luftqualität nimmt auch die Anzahl vorkommender Flechtenarten zu. Das Maximum wird in der Übergangszone erreicht.

24 untersuchte Bäume weisen einen IAP18-Wert über 58 auf, d.h. sie gehören der Zone sehr geringer Gesamtbelastung an. An diesen Bäumen nimmt die Artenvielfalt wieder ab. Hier wirkt sich aus, dass dieses Kollektiv nur 24 Bäume umfasst: Die Artenvielfalt ist auch abhängig von der Anzahl Bäume einer Zone.

Gesamtbelastung	Artenzahl	Artenvielfalt	
	durchschnittliche Artenzahl pro Baum	Gesamtartenzahl pro Zone	Anzahl Bäume
kritisch	2.7	17	28
stark	5.1	21	31
mittel	7.0	26	49
gering	8.6	31	45
sehr gering	10.1	29	24

Abb. 6:  
Das Flechtenvorkommen in den einzelnen Luftgüte-zonen des Untersuchungsgebietes.

Abb. 7:  
Zeigt die durchschnittliche Artenzahl pro Baum in den fünf Belastungszonen.

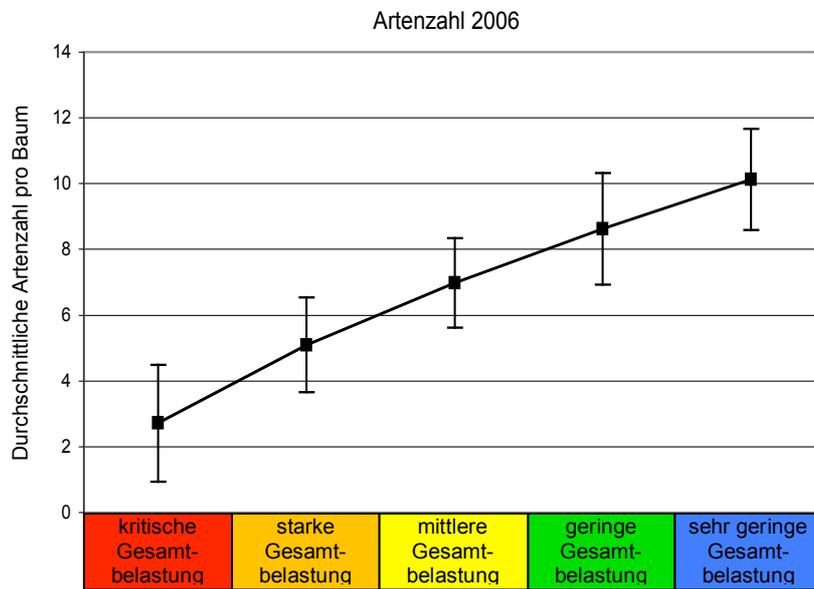
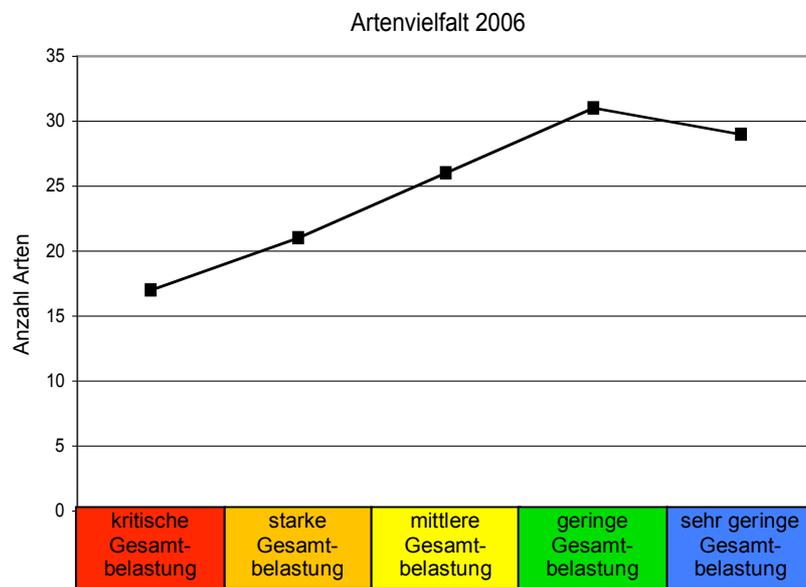


Abb. 8:  
Die Artenvielfalt beschreibt, wie viele Arten innerhalb jeder Zone vorkommen.



## 6. Differenzkarte 1989 bis 2006

Differenzkarten visualisieren die räumlichen Veränderungen der Luftbelastung zwischen den einzelnen Untersuchungsjahren. Verbesserungen der Luftqualität sind blau, Verschlechterungen rot dargestellt. Zonen mit unwesentlichen Veränderungen sind grau eingefärbt.

Für die Erstellung der Differenzkarte werden die alten IAP-Werte pro Georäum von den neuen subtrahiert. Verschlechterungen der Luftqualität manifestieren sich durch negative Differenzen, Verbesserungen durch positive. Die Daten der einzelnen Georäume sind im Anhang aufgelistet.

Die Differenzen werden in fünf Klassen unterteilt, damit Zonen gleicher Veränderung gebildet werden können. Die Differenzkarte ist, wie die Luftgütekarte, eine Isolinienkarte und wird durch lineare Interpolation der Zonengrenzen konstruiert. Gebiete gleicher IAP-Differenzen befinden sich in der gleichen Zone. Alle randlich liegenden Zonierungsverläufe sind mit Vorsicht zu interpretieren, da die fehlende Information im angrenzenden Gebiet eine gut abgestützte Linienführung erschwert. Linien, welche weniger präzise abgesichert sind, werden in den Karten durch Strichelung gekennzeichnet.

Die Klassenbreite der Differenzkarte entspricht einer halben Klassenbreite der Luftgütekarte. Dies führt dazu, dass die Differenzkarte Veränderungen des IAP-Wertes sehr differenziert aufzeichnet, mehrere Zonengrenzen können räumlich nahe beieinander liegen.

### Differenzkarte 1989 bis 2006

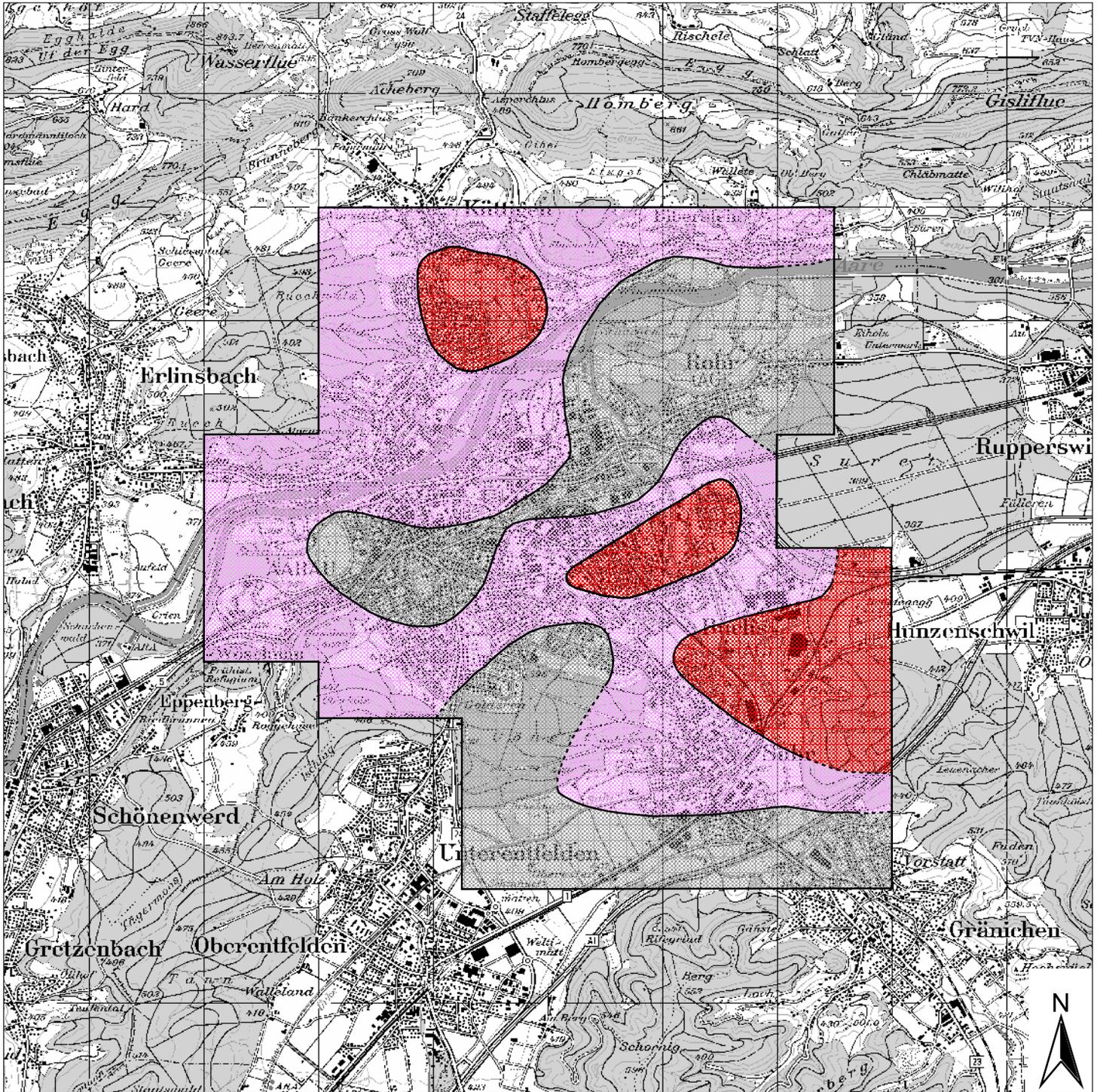
Die Differenzkarte 1989 bis 2006 (Abb. 9, folgende Seite) kann innerhalb des Projektperimeters von 1989 erstellt werden.

Die Karte wird von den Farben grau (Zonen mit keiner Veränderung der Luftbelastung) und hellrot (Zonen mit Verschlechterung der Luftqualität) dominiert.

Hellblau und dunkelblau gefärbte Flächen fehlen, es gibt keine Gebiete mit Verbesserungen der Luftqualität. Die graue Zone mit unveränderter Luftqualität nimmt rund 33% der Fläche ein. Sie zieht vom Aarauer Stadtzentrum in einem schmalen Korridor nach Rohr und wird dort wieder breiter. Eine weitere graue Fläche zieht im Süden des Untersuchungsgebietes vom Gönertwald bis Gränichen. Der grösste Anteil entfällt auf die hellrote Zone (rund 52%) mit einer Verschlechterung der Luftqualität. Die dunkelroten Zonen mit starker Verschlechterung (Flächenanteil ca. 15%) befinden sich in Rombach-Küttigen, im Siedlungsgebiet von Aarau südlich der Bahnlinie und im Industriegebiet von Buchs.

# Differenzkarte 1989 - 2006

## Bioindikation mit Flechten - Region Aarau



Veränderung der Luftbelastung  
1989 - 2006

IAP18-Differenz

	starke Verbesserung	> 9.8
	Verbesserung	3.3 - 9.8
	keine wesentliche Veränderung	-3.3 - 3.3
	Verschlechterung	-9.8 - -3.3
	starke Verschlechterung	< -9.8

1000 0 1000 m

puls, Mühlemattstrasse 45, 3007 Bern

Kartendaten: PK50, 2004 swisstopo (DV642.4)

## 7. Auswertung einzelner Flechtenarten

Anhand der Beschreibung einzelner, repräsentativer Flechtenarten und ihrer ökologischen Charakterisierung ergibt sich ein Bild der Flechtenvegetation in den verschiedenen Zonen der Flechtenkarte.

Die Betrachtung von Einzelarten kann Zusatzinformationen zu Gesamtbelastungssituation liefern. Ausserdem ist die Dokumentation des Verhaltens von Einzelarten interessant im Hinblick auf Veränderungen in den vergangenen 17 Jahren.

Die Flechtenarten haben unterschiedliche Ansprüche an ihre Umwelt. Je nach vorherrschenden Bedingungen wird die eine Art häufiger oder weniger häufig gefunden. Wichtige Kenngrössen für die ökologische Charakterisierung einer Flechtenart und –artengruppe sind die relative Häufigkeit im Gebiet, das räumliche Verbreitungsmuster, die Ansprüche bezüglich Säuregrad des Substrates (=pH-Schwerpunkt), die Nährstoffversorgung (Nitrotoleranz) und die Schadstoffempfindlichkeit (Toxitoleranz).

Abbildung 10 gibt Auskunft über die im Untersuchungsgebiet gefundenen 36 Flechtenarten und –gruppen. Für die Häufigkeit wird jede Flechtenart bezüglich ihres Vorkommens oder Fehlens in der gesamten Aufnahmefläche beurteilt.

Die häufigste vorkommende Art im Untersuchungsjahr 2006 ist die Runzelflechte *Parmelia sulcata*, welche auf rund 81% aller untersuchten Bäume zu finden ist, gefolgt von der Wimpernflechte *Physcia adscendens* auf ca. 76% der Bäume. Nur 16 Arten kommen auf mehr als 10% der Bäume vor: Die Flechtenvegetation wird von wenigen Arten dominiert, was in einem urbanen Raum nicht aussergewöhnlich ist.

Die Kategorien der Roten Liste bedeuten:

- EN: endangered            stark gefährdet,
- VU: vulnerable            verletzlich,
- NT: near threatened      potenziell bedroht,
- LC: least concern        nicht gefährdet.

Die Gefährdungskategorien wurden für den Naturraum Mittelland angegeben. Die häufigsten Flechtenarten gehören fast ausschliesslich zu den nicht gefährdeten Arten.

Flechtenart	relative Häufigkeit in %		Differenz	Kategorie Rote Liste	Tendenz
	1989	2006			
<i>Parmelia sulcata</i>	83.0	80.8	-2.2	LC	↘
<i>Physcia adscendens-Gr.</i>	56.9	75.7	18.8	LC	↑
<i>Parmelia subrudecta</i>	61.4	68.4	7.0	LC	↗
<i>Parmelia glabrata-Gr.</i>	67.3	65.0	-2.3	LC, VU	↘
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	16.3	59.3	43.0	LC	↑
<i>Candelariella xanthostigma</i>	43.8	58.8	15.0	LC	↑
<i>Phlyctis argena-Gr.</i>	52.3	49.2	-3.1	LC	↘
<i>Xanthoria parietina</i>	8.5	35.6	27.1	LC	↑
<i>Parmelia tiliacea</i>	42.5	34.5	-8.0	LC	↘
<i>Hypogymnia physodes</i>	69.9	31.6	-38.3	LC	↓
<i>Parmelia exasperatula</i>	39.2	30.5	-8.7	LC	↘
<i>Pertusaria albescens</i>	25.5	29.9	4.4	LC	↗
<i>Evernia prunastri</i>	37.9	22.0	-15.9	LC	↓
<i>Lecanora argentata-Gr.</i>	22.9	16.9	-5.9	VU	↘
<i>Parmelia caperata</i>	16.3	14.1	-2.2	LC	↘
<i>Lecanora carpinea-Gr.</i>	17.7	13.0	-4.7	--	↘
<i>Parmelia acetabulum</i>	4.6	9.0	4.4	NT	↗
<i>Parmelia saxatilis</i>	9.2	7.3	-1.8	LC	↘
<i>Hypogymnia tubulosa</i>	20.9	5.1	-15.8	LC	↓
<i>Physconia grisea</i>	1.3	4.5	3.2	NT	↗
<i>Cladonia sp.</i>	0.7	3.4	2.7	--	↗
<i>Pseudevernia furfuracea</i>	36.6	3.4	-33.2	LC	↓
<i>Ramalina pollinaria</i>	7.2	2.8	-4.4	NT	↘
<i>Xanthoria fallax</i>	1.3	2.8	1.5	VU	↗
<i>Physcia aipolia-Gr.</i>	0.7	2.3	1.6	LC, VU	↗
<i>Physconia distorta</i>	2.0	2.3	0.3	LC	→
<i>Parmelia subargentifera</i>	3.9	2.3	-1.7	LC	↘
<i>Graphis scripta</i>	0.7	1.7	1.0	LC	↗
<i>Physconia perisidiosa</i>	0.7	1.7	1.0	NT	↗
<i>Parmelia flaventior</i>	2.6	1.7	-0.9	VU	→
<i>Ramalina fraxinea</i>	0.0	1.7	1.7	EN	↗
<i>Cetrelia cetrarioides-Gr.</i>	1.3	1.1	-0.2	LC, VU	→
<i>Parmeliopsis ambigua</i>	0.0	0.6	0.6	LC	→
<i>Parmelia exasperata</i>	0.0	0.6	0.6	VU	→
<i>Ramalina farinacea</i>	0.7	0.6	-0.1	VU	→
<i>Usnea sp.</i>	5.9	0.6	-5.3	--	↘

Abb. 10:

Absolute und relative Häufigkeit der vorkommenden Flechtenarten und -gruppen. Kategorien der Roten Liste nach Scheidegger et al. 2002 (Naturraum Mittelland).

*Parmelia sulcata* (Abb. 11) war in beiden Untersuchungsjahren die häufigste Art. Am stärksten zugenommen hat *Phaeophyscia orbicularis*, eine Art, die sehr toxitolerant und mittel acidophil bis mittel basiphil ist. Sie hat sich vor allem in Gebieten, die 2006 basisch geprägt sind, ausgebreitet.

Auch *Xanthoria parietina* ist viel häufiger geworden, sie kommt 2006 auf knapp 36% aller Bäume vor (1989: 8.5%). Auch die Gelbblatflechte ist ziemlich toxitolerant und mässig bis ziemlich nitrophil.

Die beiden säureliebenden Arten *Hypogymnia physodes* (-38%) und *Pseudevernia furfuracea* (-33%) sind sehr stark zurückgegangen.

Die Lindenflechte *Parmelia tiliacea* ist um 8% zurückgegangen. Sie kommt 2006 an 34.5% (1989: 42.5%) aller Bäume vor.



Abb. 11: Flechtenarten, von links oben im Uhrzeigersinn:  
*Parmelia sulcata*, Runzelflechte; *Parmelia tiliacea*, Lindenflechte;  
*Physconia distorta*, Pulver-Physconie; *Xanthoria parietina*, Gelbblatflechte.

### Mittlere Frequenz und Verbreitungskarten

Jede Flechtenart für sich weist ein ganz artspezifisches Verhalten auf bezüglich der Gesamtbelastung der Luft: So gibt es Arten, welche wenig empfindlich sind und bereits in der Flechtenwüste stellenweise auftreten, ein Maximum in der äusseren Kampfzone aufweisen, in der Normalzone jedoch durch andere Arten verdrängt werden. Empfindliche Arten dagegen erreichen ihr Verbreitungsoptimum erst in der Übergangs- oder Normalzone.

Dieses Verhalten wird mit der mittleren Frequenz dargestellt. Dazu wird von jeder Flechtenart der Mittelwert ihrer Frequenzen über ein bestimmtes Trägerbaum-Kollektiv gebildet. Dieses Kollektiv besteht aus Bäumen der gleichen Luftgütezone, die erhaltenen Werte werden in Abhängigkeit vom Flechtenindex IAP18 dargestellt.

Zur besseren Beschreibung des Verhaltens der Flechtenarten gegenüber der Gesamtbelastung werden die fünf Zonen der Luftgütekarte in je zwei Kollektive halbiert, so dass insgesamt zehn Kollektive resultieren (Abb. 12).

Gesamtbelastung	Kollektiv	IAP18-Bereich	Anzahl Bäume 2006
kritisch	1	0 - 9.3	10
	2	9.3 - 18.6	18
stark	3	18.6 - 25.2	17
	4	25.2 - 31.7	14
mittel	5	31.7 - 38.3	22
	6	38.3 - 44.8	27
gering	7	44.8 - 51.3	29
	8	51.3 - 57.8	16
sehr gering	9	57.8 - 67.1	21
	10	> 67.1	3

Abb. 12:  
Trägerbaumkollektive zur Berechnung der Mittleren Frequenzen.

Eine für die Bioindikation ideale Zeigerart weist mit steigendem IAP18-Wert eine mehr oder weniger linear steigende mittlere Frequenz auf.

Es werden im Folgenden die mittleren Frequenzen von vier typischen Flechtenarten vorgestellt und diskutiert.

Als gute Zeiger der Luftverschmutzung und häufig aufgetretene Art wurde *Parmelia sulcata* ausgewählt. Die *Physcia adscendens*-Gruppe stellt ein Beispiel einer sehr häufigen, ziemlich toxitoleranten und weit verbreiteten Flechtenart dar. *Parmelia tiliacea* ist etwas empfindlicher und tritt deshalb

im Gebiet weniger häufig auf. Als Zeiger der Acidität (Ansäuerung) einzelner Standorte ist *Hypogymnia physodes* aufgeführt.

Neben den Angaben zur Ökologie und Systematik werden die Verbreitungskarten und die mittleren Frequenzen der einzelnen Arten kurz diskutiert.

## Parmelia sulcata

### Ökologie

Ziemlich tolerant gegenüber Luftverschmutzung. Bevorzugt neutrale bis mässig saure Rinden und mässige bis ziemlich gute Nährstoffversorgung. *P. sulcata* hat eine ziemlich breite ökologische Amplitude und ist eine der häufigsten baumbewohnenden Flechten im Schweizer Mittelland.

### Verbreitung

Die Blattflechte *Parmelia sulcata* ist im ganzen Untersuchungsgebiet weit verbreitet und tritt oft mit hohen Frequenzen auf. Da sie ziemlich toxitolerant ist, kommt sie nur in stärker belasteten Gebieten kaum mehr vor, so in der roten Zone im Stadtzentrum von Aarau. Der Vergleich zwischen den zwei Aufnahmejahren (Abb. 14) zeigt, dass *P. sulcata* in der Gegend rund um Suhr ein wenig seltener geworden ist. Sonst zeigt sich keine grosse Verschiebung der Verteilung und der Frequenzen (Abnahme von 83% [1989] auf 80% [2006]).

### Mittlere Frequenz

Die relativ hohe Toxitoleranz von *P. sulcata* führt dazu, dass diese Flechtenart bereits in Zonen mit starker Belastung hohe mittlere Frequenzwerte erreicht. In sehr gering belasteten Gebieten erreicht sie sehr hohe Werte. Nur im Kollektiv 1 weist *P. sulcata* tiefe Werte auf. Sie eignet sich also gut als Indikatorart in sehr stark belasteten Gebieten (Abb. 13).

Die mittleren Frequenzen 2006 liegen leicht tiefer als im Jahr 1989. Es werden aber die gleichen Minimum- und Maximumwerte erreicht.

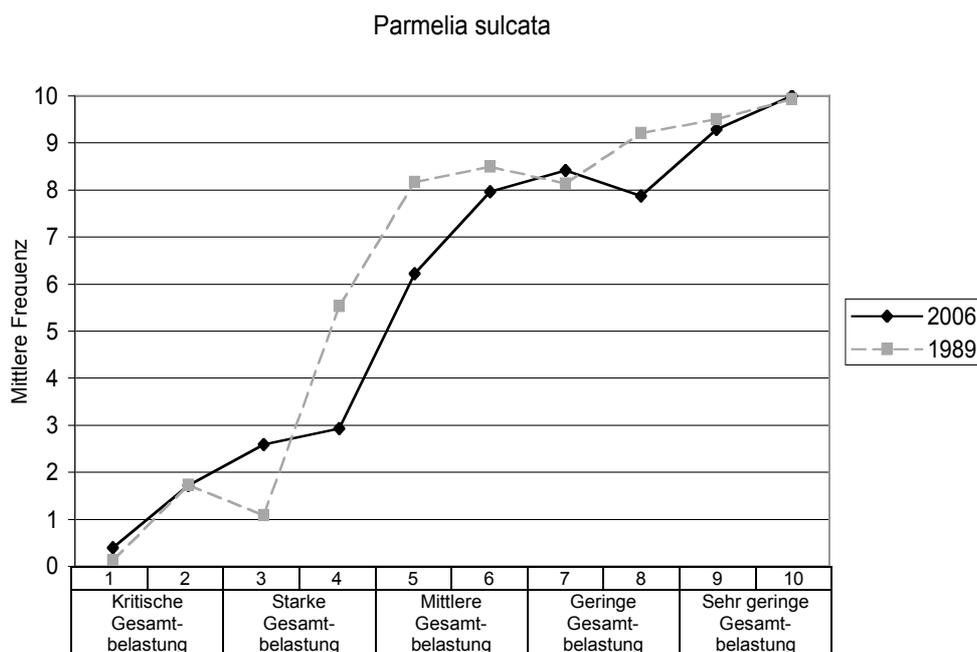
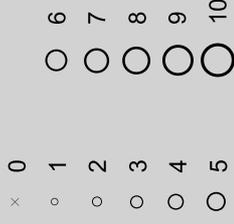


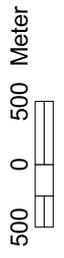
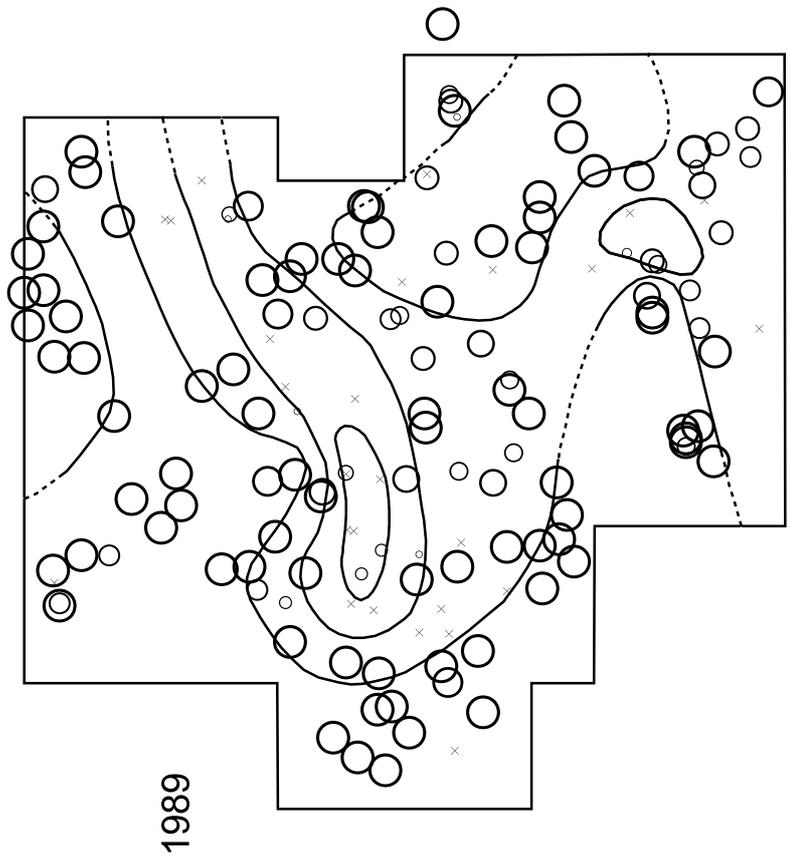
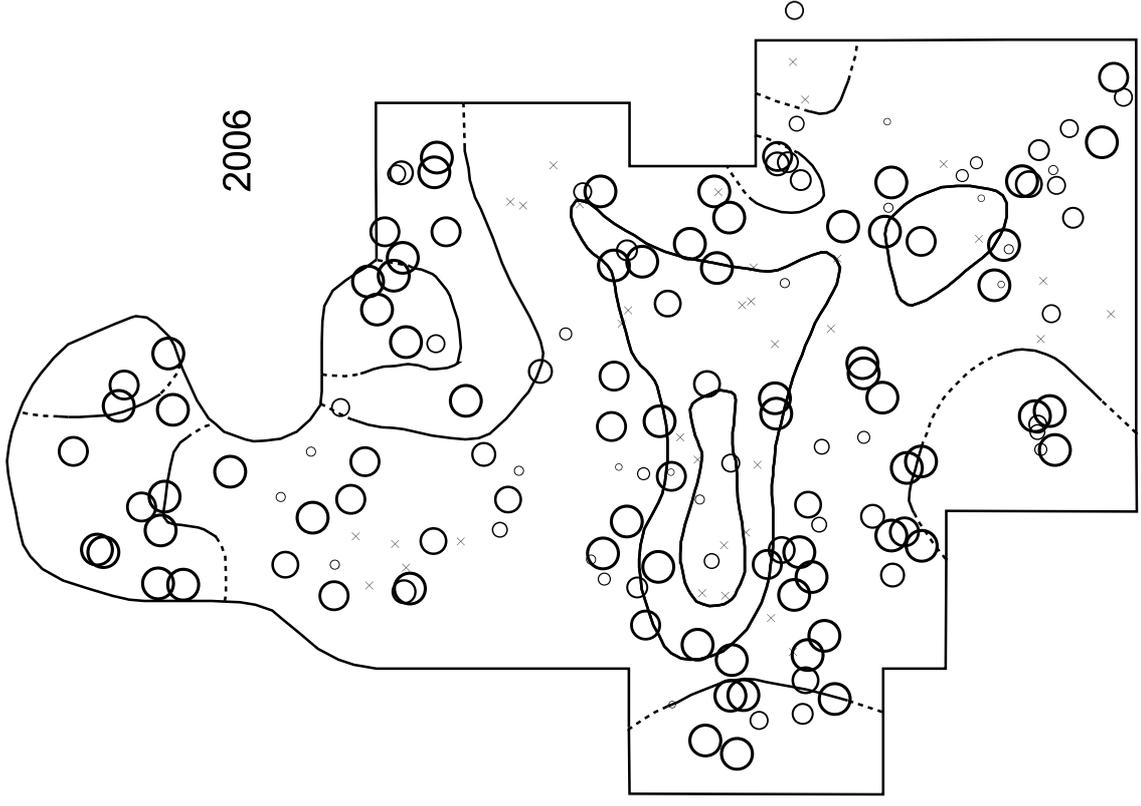
Abb. 13: Immissionsökologisch ideales Verhalten der ziemlich toxitoleranten Runzelflechte bei zunehmendem Flechtenindex und steigender Luftqualität.

# Verbreitung von *Parmelia sulcata* Vergleich 1989 und 2006

Frequenz



— Perimeter



## Physcia adscendens-Gruppe

### Ökologie

Ziemlich tolerant gegenüber Luftverschmutzung. Bevorzugt mässig saure bis mässig basische Rinden und ziemlich gute Nährstoffversorgung.

### Systematik

*Physcia adscendens* (Fr.) Oliv., *Physcia tenella* (Scop.) DC., *Physcia dubia* (Hoffm.) Lettau, *Physcia vitii* Nadv.

### Verbreitung

*Physcia adscendens* ist hinter *Parmelia sulcata* die zweithäufigste Art im Untersuchungsgebiet. Sie tritt in allen Teilen des Gebiets mehr oder weniger gleich häufig auf. *Physcia adscendens* hat sich in den letzten 17 Jahren stark ausgebreitet. 1989 kam sie nur auf 57% aller untersuchten Bäume vor 2006 75% (Abb. 16).

### Mittlere Frequenz

Das Diagramm (Abb. 15) zeigt, dass die Flechtenartengruppe 1989 in den wenig belasteten Gebieten weniger stark vertreten war. Bei zunehmender Luftqualität wird sie möglicherweise durch andere empfindlichere und konkurrenzstärkere Arten verdrängt. Bei sehr kritischer Luftbelastung ist sie selten, ihre Frequenz steigt dann aber steil an und erreicht schon in der Zone der starken Belastung hohe Werte. Der starke Abfall im Kollektiv 10 beruht wahrscheinlich auf der Tatsache, dass man mit nur drei Bäumen keine aussagekräftigen Mittelwerte erreicht.

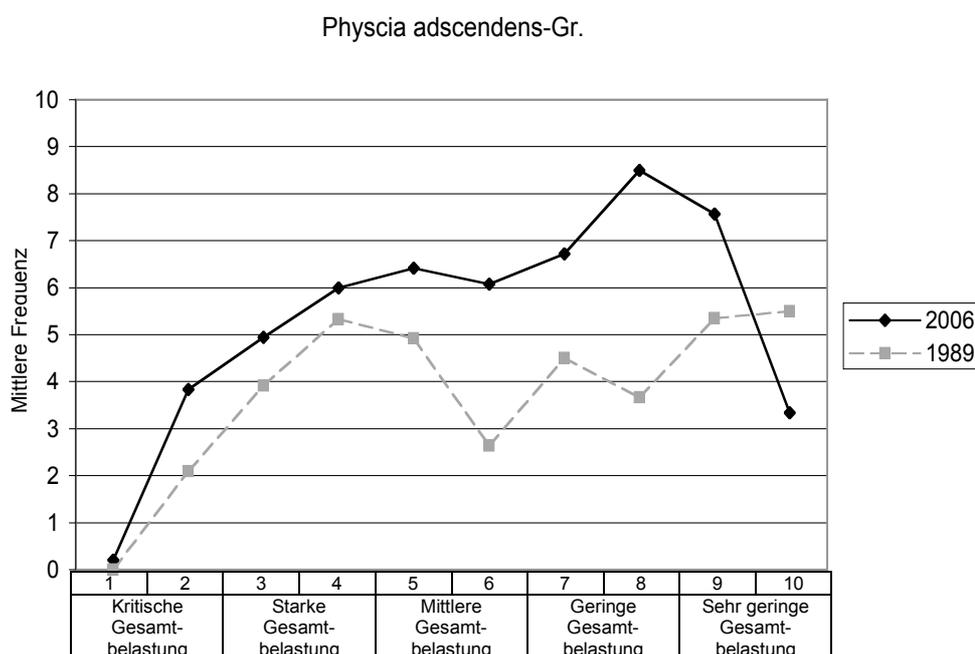
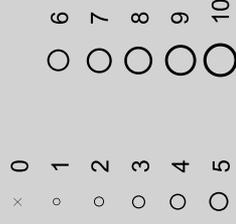


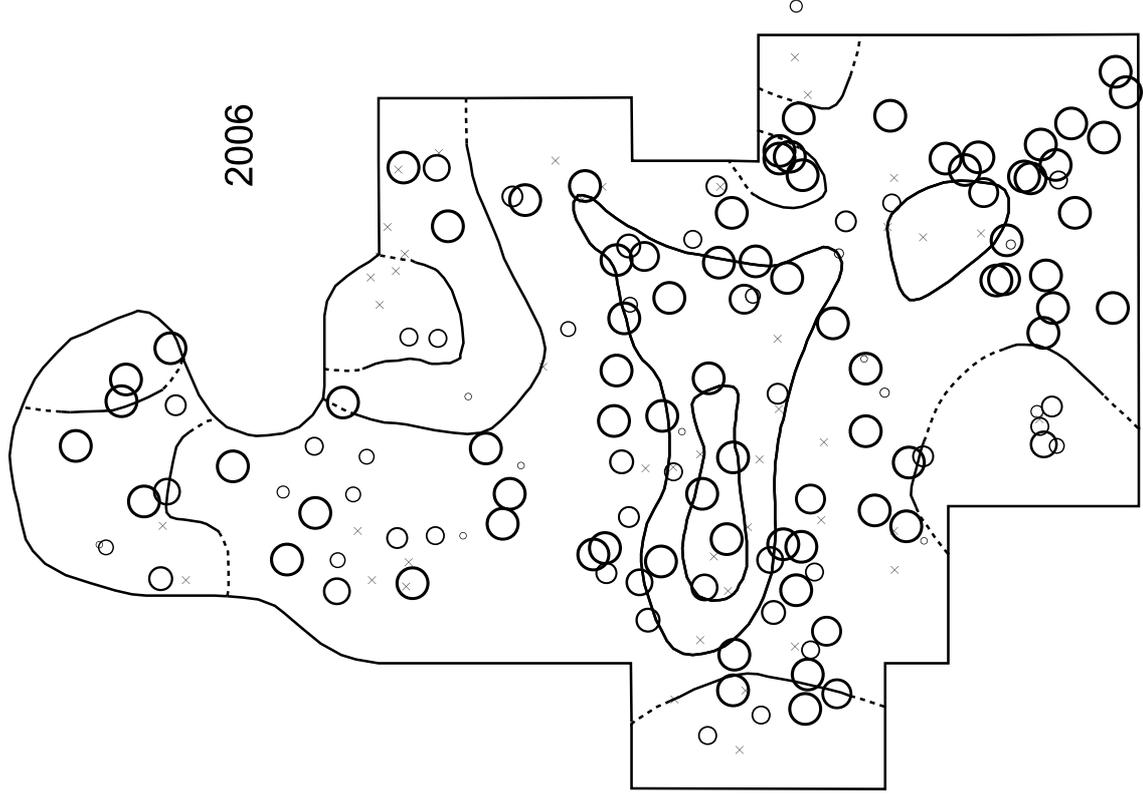
Abb. 15:  
Die Wimpernflechte zeigt nicht ein einheitliches Verhalten in den zwei Aufnahmejahren. Sie ist ziemlich toxitolerant und kommt auch bei hoher Belastung häufig vor.

# Verbreitung von Physcia adscendens Vergleich 1989 und 2006

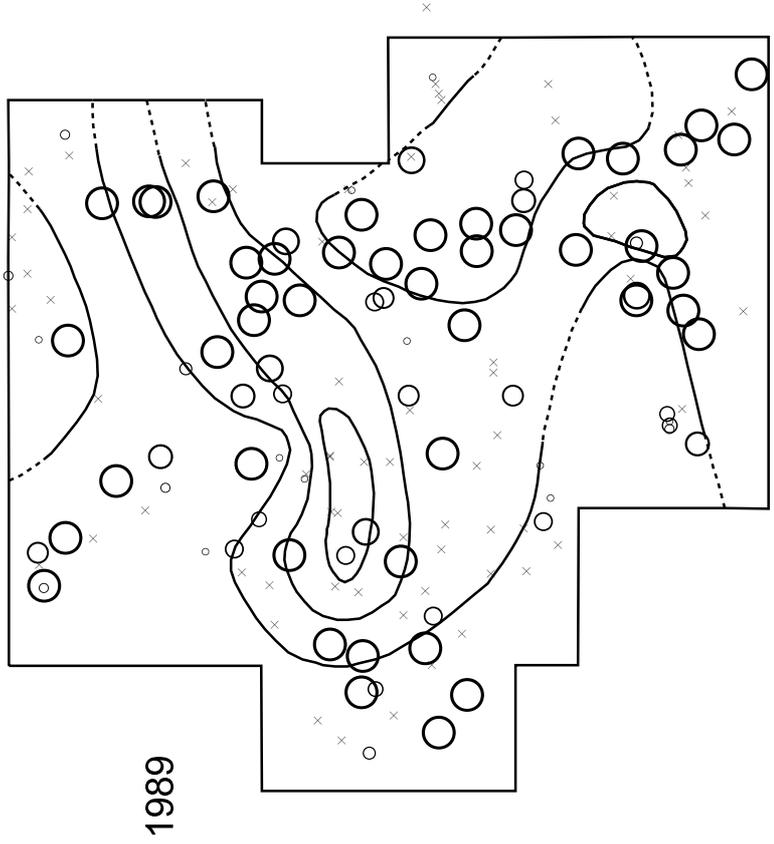
Frequenz



— Perimeter



2006



1989



## Parmelia tiliacea

### Systematik

In der Literatur wird unterschieden zwischen *Parmelia tiliacea* (Hoffm.) Ach. und *Parmelia pastillifera* (Harm.) Schub. & Klem. In dieser Untersuchung wurden die beiden Typen unter *Parmelia tiliacea* zusammengefasst.

### Ökologie

Ziemlich empfindlich gegenüber Luftverschmutzung. Bevorzugt neutrale bis mässig saure Rinden und mässige bis ziemlich gute Nährstoffversorgung.

### Verbreitung

Die Lindenflechte ist in der Region Aarau nur punktuell und mit unterschiedlichen Frequenzen vertreten. Mit hohen Frequenzen kommt sie fast nur in gering belasteten Gebieten vor, z.B. 1989 in Biberstein und 2006 auf der Staffelegg. Aufgrund ihrer hohen Empfindlichkeit fehlt sie in stark belasteten Gebieten fast vollständig (Abb. 18). Die Lindenflechte ist in den vergangenen 17 Jahren um 8% zurückgegangen

### Mittlere Frequenz

*Parmelia tiliacea* fehlt in den Zonen mit kritischer und sehr starker Belastung fast vollständig. Ab der Zone mittlerer Belastung nimmt die Frequenz langsam zu. Erst in der Zone mit geringer und sehr geringer Luftbelastung steigt die Kurve stark an. *Parmelia tiliacea* erreicht ihr Maximum in der Normalzone (Abb. 17). Dieses Verhalten ist typisch für empfindliche Flechtenarten.

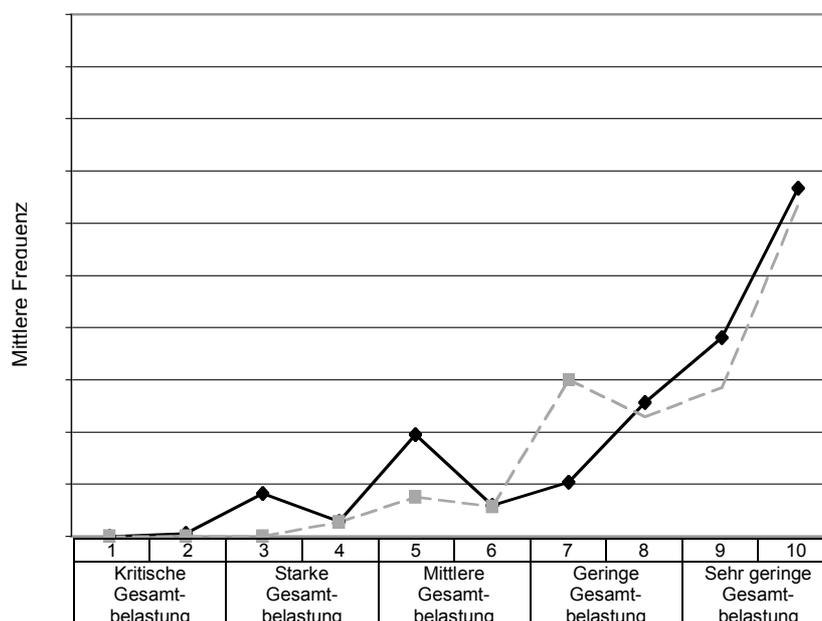
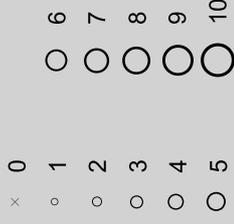


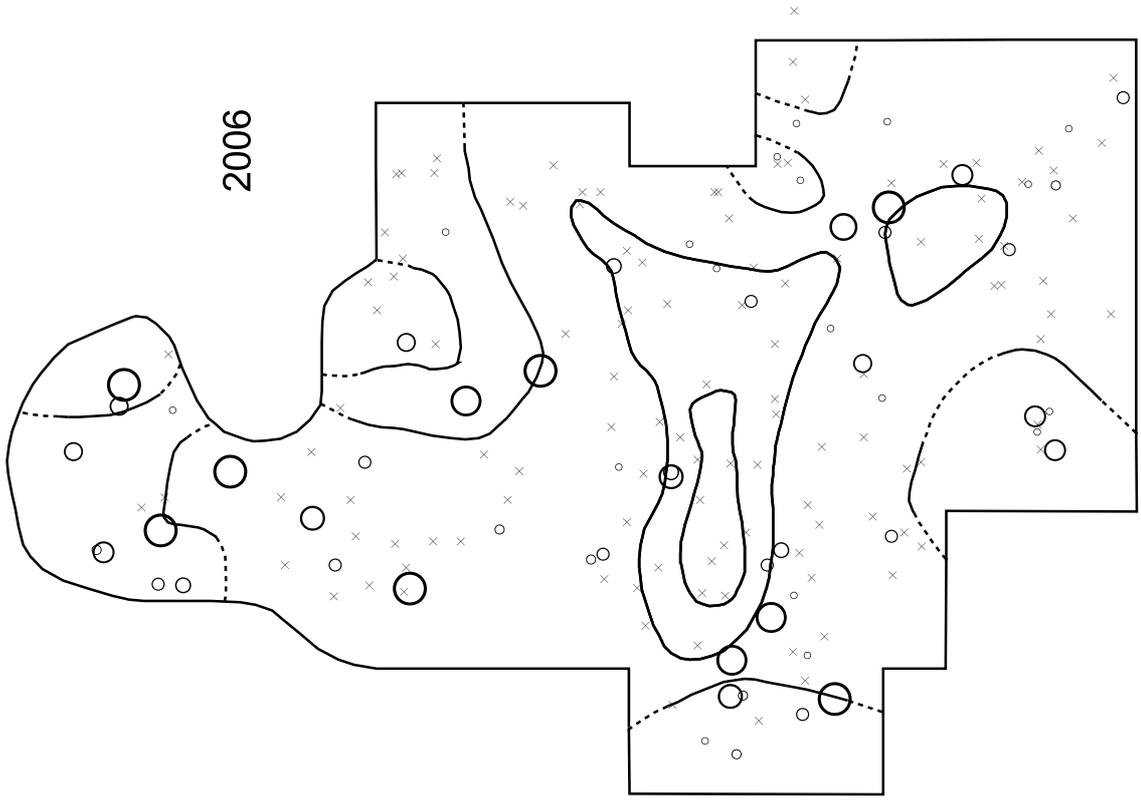
Abb. 17:  
Typisches Verhalten der ziemlich empfindlichen Lindenflechte. Sie ist bei hoher Luftbelastung selten und ihre Frequenz bei geringer Belastung steil an.

# Verbreitung von *Parmelia tiliacea* Vergleich 1989 und 2006

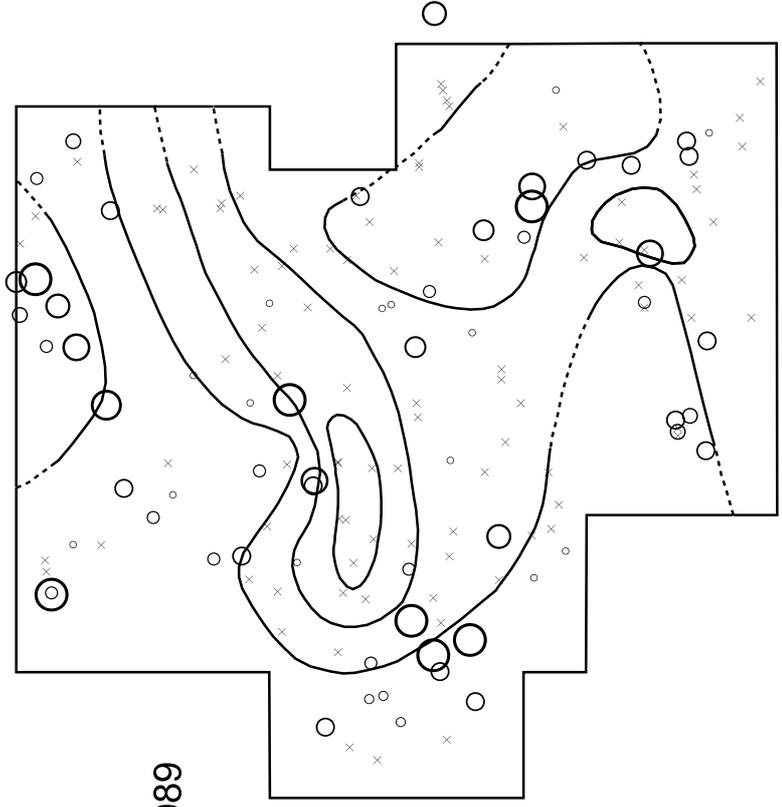
Frequenz



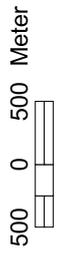
— Perimeter



2006



1989



## Hypogymnia physodes

### Ökologie

Ziemlich tolerant gegenüber Luftverschmutzung. Bevorzugt sehr saure bis mässig saure Rinde und arme bis mässig reiche Nährstoffversorgung.

### Verbreitung

Die Blasenflechte tritt 2006 an 32% der Bäume auf. Was sehr schnell auffällt ist der starke Rückgang. 1989 war sie vor allem in den städtisch geprägten Gebieten vertreten. In städtischen Gebieten sind die Immissionen sauer geprägt, was der säureliebenden Art entgegenkommt. Heute kommt sie nur noch vereinzelt vor, ohne in bestimmten Zonen häufiger vorzukommen (Abb. 20). *H. physodes* ist seit 1989 sehr stark zurückgegangen, vor 17 Jahren trat sie an 70% aller Bäume auf.

### Mittlere Frequenz

In stark belasteten Gebieten tritt *H. physodes* heute nur in geringen Frequenzen auf. Mit abnehmender Luftbelastung nimmt ihr Vorkommen zu und sie erreicht in der Normalzone ihr Maximum. (Abb. 19). Anders war das Bild 1989, da war *H. physodes* auch in stark belasteten Gebieten ziemlich häufig, da das gesamte Gebiet sehr sauer geprägt war.

Hypogymnia physodes

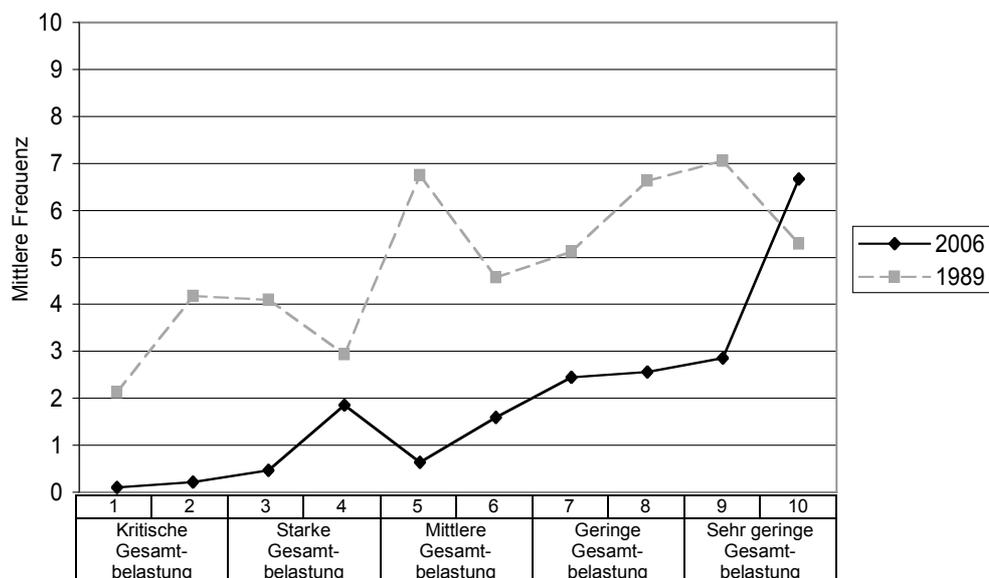
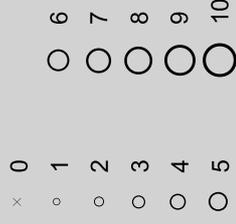


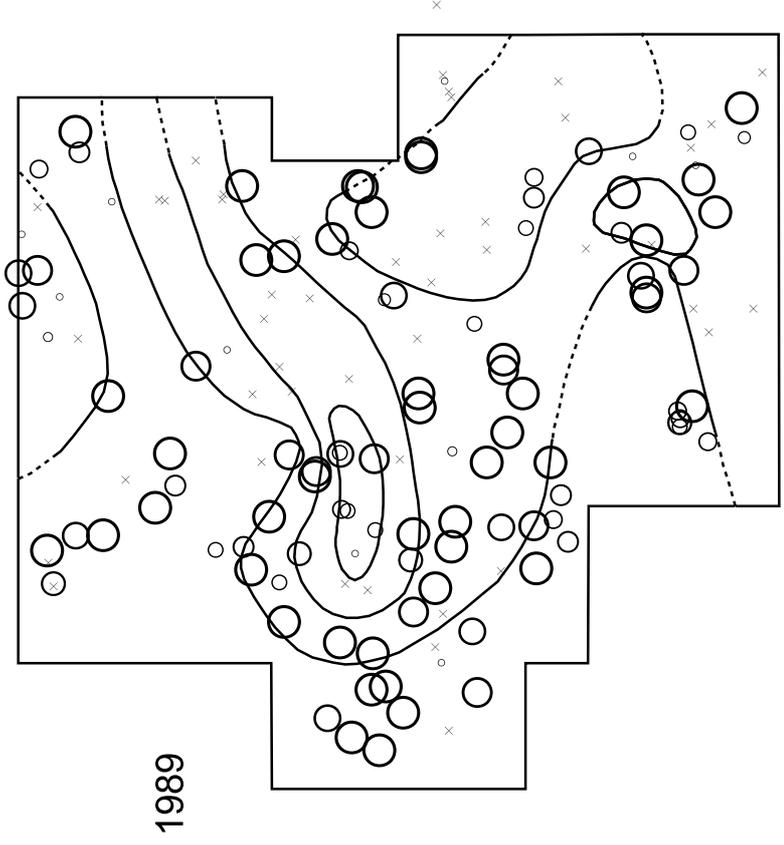
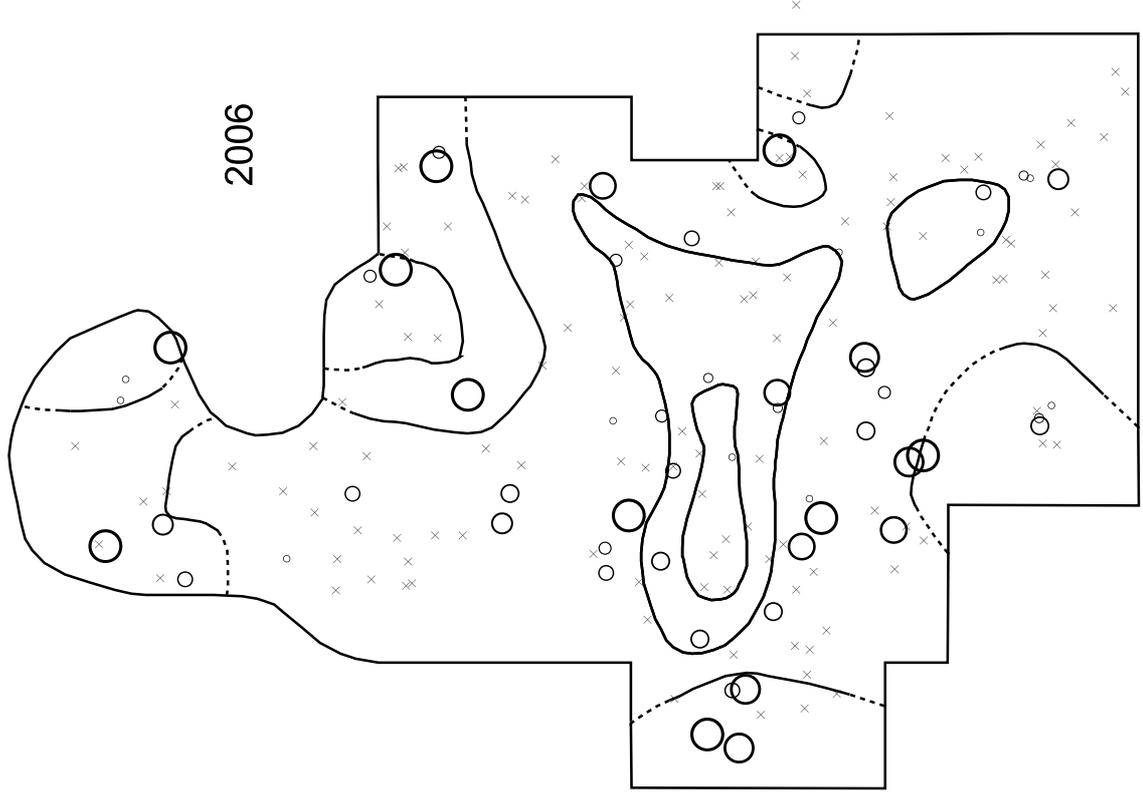
Abb. 19:  
*H. physodes* erreichte 1989 schon in stark belasteten Zonen ihr Maximum. 2006 steigt die Frequenz erst bei geringerer Belastung an.

# Verbreitung von Hypogymnia physodes Vergleich 1989 und 2006

Frequenz



— Perimeter



## 8. Acidoindex und Nitroindex

### Acidoindex

Die 36 verschiedenen Flechtenarten, die in der vorliegenden Untersuchung gefunden und für den IAP18-Wert berücksichtigt wurden, stellen unterschiedliche Ansprüche an die Umwelt. Gewisse Arten reagieren sehr sensibel auf verschmutzte Luft und sind entsprechend selten; andere sind robuster und dringen bis ins Siedlungs- oder Industriegebiet vor.

Nebst dieser Schadstoff-Anzeige liefern die Flechten zusätzlich Hinweise auf saure oder basische Verhältnisse; daraus lassen sich Vermutungen über den Ursprung der Luftbelastung ableiten. Basische Verhältnisse findet man beispielsweise in landwirtschaftlich geprägten Regionen, wo Ammoniak aus Dünger und natürlichen Stäuben basische Immissionen liefern. Arten, die sich auf saure Rinden spezialisiert haben, verschwinden aus Gebieten, wo die Baumrinden durch Immissionen basisch werden. Saure Immissionen sind das Resultat von Verbrennungsprozessen, insbesondere  $\text{NO}_x$  und  $\text{SO}_2$  führen zu sauren Luftbelastungen. Entsprechend treten saure Immissionen primär in Industrie- und Siedlungszentren sowie in verkehrsbelasteten Gebieten auf. Hier findet man Flechtenarten, die saure Substrate bevorzugen.

Der Massstab für saure oder basische Immissionsverhältnisse ist der Acidoindex. Basis des Acidoindex' bilden die Artenzusammensetzung und die spezifischen Reaktionsweisen von Flechtenarten auf den Säuregrad ihres Habitats. Der Wert des Acidoindex' basiert zum einen auf den Frequenzwerten der fünf acidophilen Flechtenarten *Hypogymnia physodes*, *Hypogymnia tubulosa*, *Pseudevernia furfuracea*, *Evernia prunastri* und der Artengruppe *Parmelia glabratula-Gr.*, zum andern auf jenen der fünf basiphilen Arten *Xanthoria parietina*, *Physconia distorta*, *Parmelia subargentifera*, *Phaeophyscia orbicularis* und der Artengruppe *Physcia adscendens-Gr.* Die Frequenzsumme der fünf basiphilen Arten wird von der Frequenzsumme der fünf acidophilen Arten subtrahiert. Der Acidoindex wird jeweils pro Georaum gemittelt.

Jeder Kreis auf den Acidokarten (Abb. 21 und 22) entspricht einem Georäummittelpunkt. Rote Kreise stehen für einen positiven Acidoindex, sie geben Hinweise auf das Überwiegen der sauren Immissionen in der Gesamtbelastung. Grüne Kreise bezeichnen basische Immissionen, der Acidoindex ist negativ. Die Kreisgrösse entspricht dem Wert des Acidoindex', je grösser der Wert desto grösser der Kreis. Der Acidoindex ist ein relatives Mass, eine Zuordnung zu einem absoluten Säurewert wie z.B. der pH-Wert des Regens ist nicht möglich. Die Entwicklungen von Acidoindex und pH-Wert können aber gut miteinander verglichen werden (vgl. Kap. 10, Seite 49).

**Acidoindex 1989**

Im Jahr 1989 präsentierte sich die Lage in der Region Aarau überwiegend sauer geprägt (Abb. 21). Nur vereinzelte grüne Kreise wiesen auf basische Verhältnisse hin.

Der grösste Hinweis auf basische Verhältnisse zeigt ein Georaum an der Suhre zwischen Aarau und Rohr. Drei weitere „grüne“ Georäume befinden sich in der Region Buchs – Suhr.

**Acidoindex 2006**

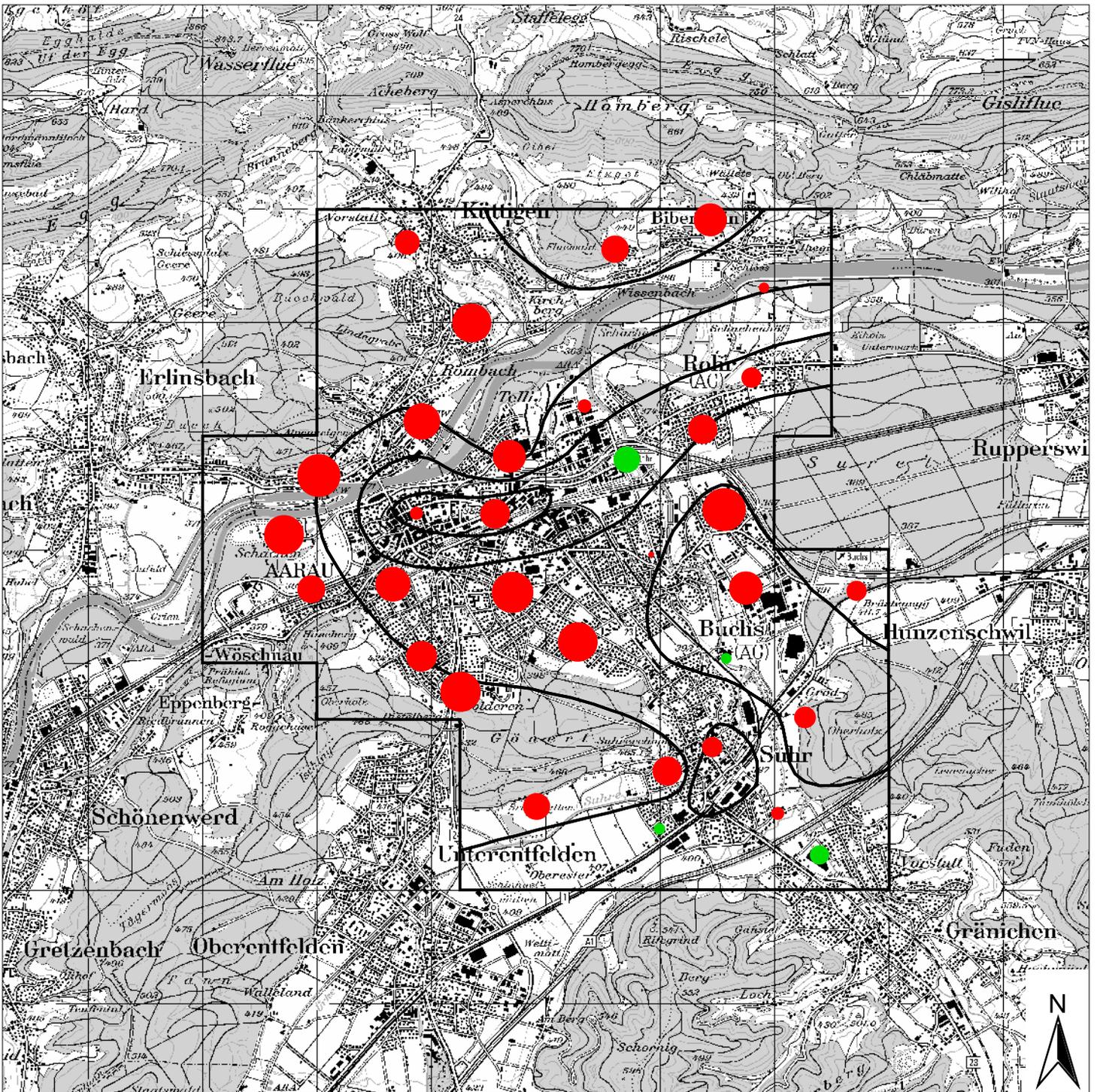
Seit 1989 hat sich das Bild komplett gewendet (Abb. 22). Die grünen Kreise mit Hinweisen auf basische Immissionen prägen nun die Karte. Die grössten basischen Immissionen sind in Suhr, zwischen Autobahn und Autobahnzubringer und auf der Achse Aarau – Rohr, entlang der Bahnlinie, zu finden. Hinweise auf saure Immissionen finden sich auf der Staffelegg, in Biberstein, entlang der Aare nördlich von Aarau und nördlich und südlich des Gönertwaldes.

**Acidoindex-Differenz 1989 bis 2006**

Die Differenzkarte (Abb. 23) zeigt sich in einem einheitlichen Grün, das bedeutet, dass das gesamte Untersuchungsgebiet basischer geworden ist. Die grösste Veränderung gab es in Suhr und Buchs.

# Acidoindex 1989

## Bioindikation mit Flechten - Region Aarau



Acidoindex



Hinweis auf saure Immissionen



Hinweis auf basische Immissionen

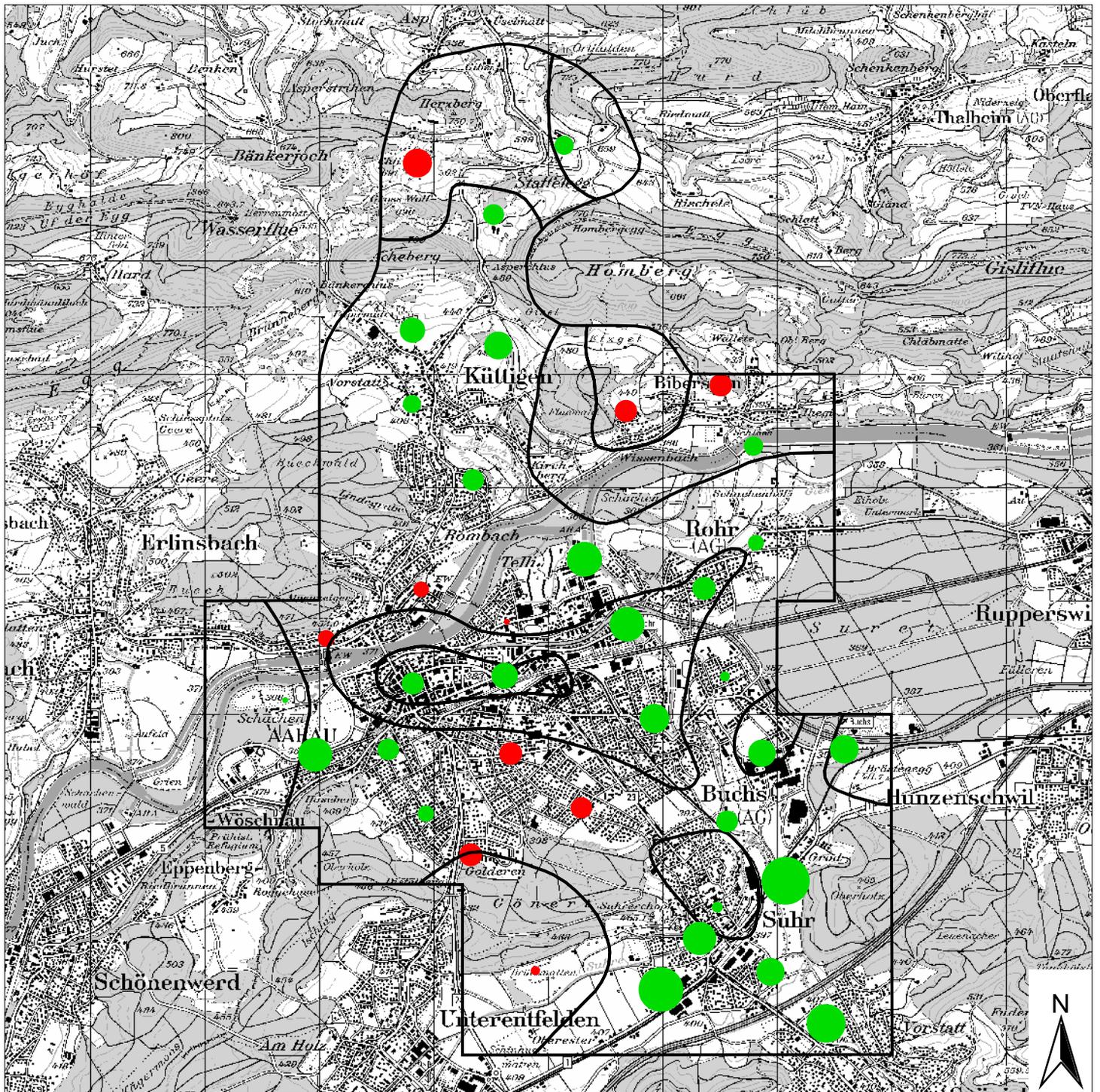
1000 0 1000 Meter

puls, Mühlemattstrasse 45, 3007 Bern

Kartendaten: PK50, 2004 swisstopo (DV642.4)

# Acidoindex 2006

## Bioindikation mit Flechten - Region Aarau



Acidoindex



Hinweis auf saure Immissionen



Hinweis auf basische Immissionen

1000 0 1000 Meter

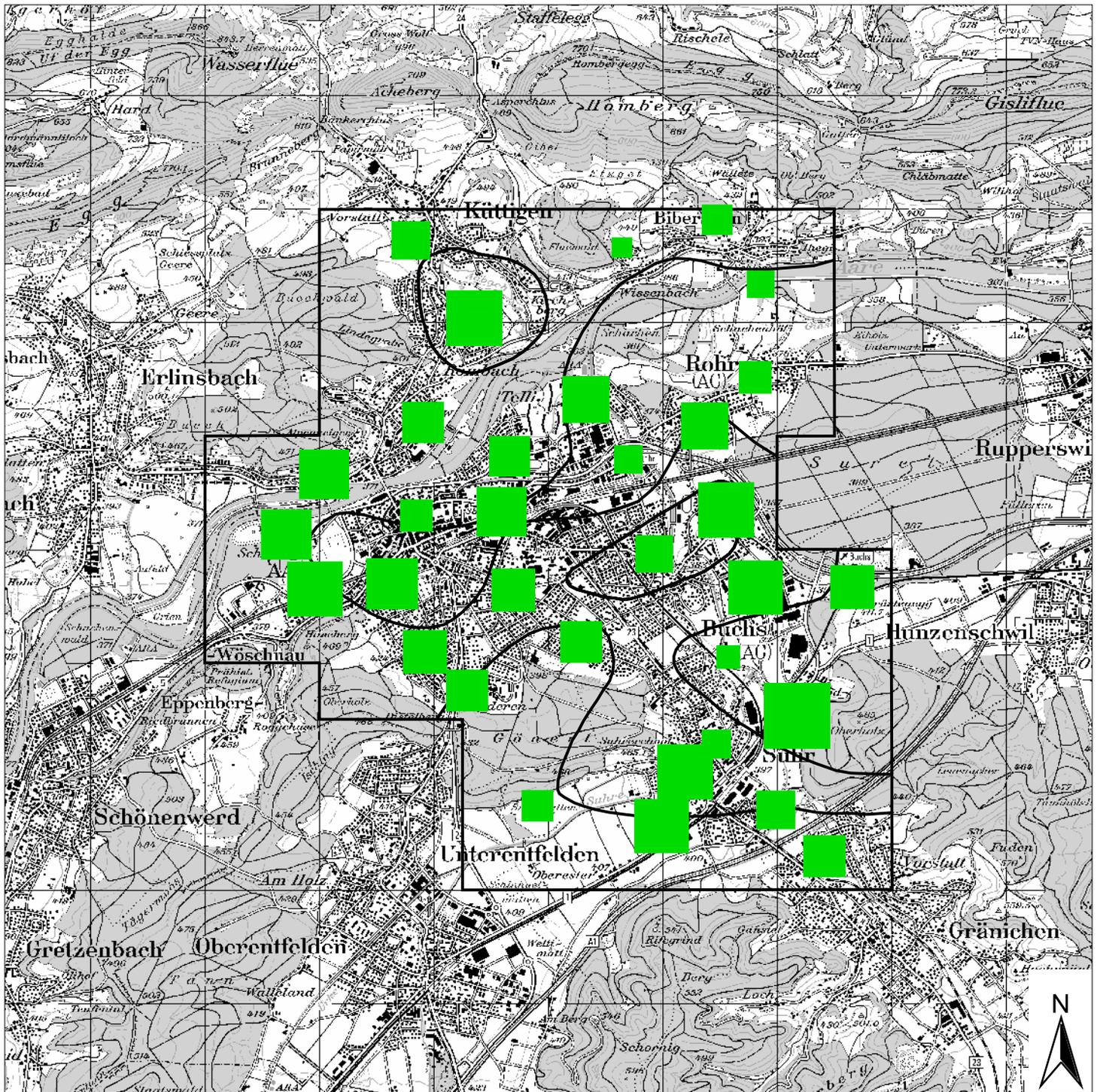


puls, Mühlemattstrasse 45, 3007 Bern

Kartendaten: PK50, 2004 swisstopo (DV642.4)

# Acidoindex-Differenz 1989 bis 2006

Bioindikation mit Flechten - Region Aarau



Acidoindex



Immissionen sind saurer geworden



Veränderung unbedeutend



Immissionen sind basischer geworden

1000 0 1000 Meter



puls, Mühlemattstrasse 45, 3007 Bern

Kartendaten: PK50, 2004 swisstopo (DV642.4)

Abbildung 24 zeigt den mittleren Acidoindex über alle Georäume der beiden Untersuchungen. Der Acidoindex ist seit 1989 stark zurückgegangen. Im Jahr 1989 lag der Acidoindex in Aarau bei 7.1 ( $\pm 6.2$ ), 2006 betrug er  $-4.1$  ( $\pm 6.5$ ).

Dieser Rückgang des Acidoindex' ist gleichläufig mit dem Anstieg des pH-Wertes im Regen (siehe dazu S. 49).

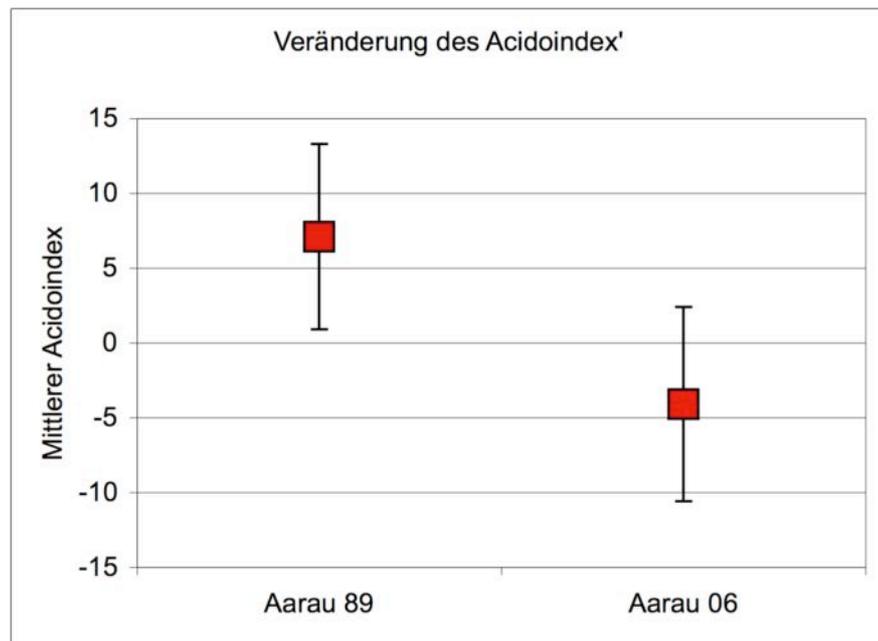


Abb. 24:  
Mittelwert und Standardabweichung des Acidoindex' aller Georäume der verschiedenen Untersuchungen.

### Nitroindex

Flechten zeigen die zunehmende Eutrophierung durch Ammoniak eintrag differenziert an. Das Artenspektrum verschiebt sich in Richtung nitrophiler Arten und geht einher mit einer Artenverarmung.

Eutrophierung durch Ammoniak führt zuerst zu verstärktem Wachstum, welches längerfristig eine Destabilisierung der Flechten zu Folge hat. Der N-Überschuss in unmittelbarer Nähe von Ammoniakquellen ist basisch und wirkt schleichend. Die Deposition von Ammonium ist weiträumig und am höchsten in niederschlagsreichen Gebieten. Ammoniakemissionen können sowohl zur Versauerung wie zur Eutrophierung beitragen.

Die sauren (oxidierten) N-Depositionen sind ebenfalls in niederschlagsreichen Regionen sowie in städtischen Regionen am höchsten (FAL 1996).

Die Messgrösse für den Eutrophierungsgrad durch Ammoniak ist der Nitroindex. Er ist speziell im Rahmen der Flechtenuntersuchung im Kanton Zug (puls, 2004b) entwickelt worden. Bei weiteren Auswertungen (puls 2006) wurde der Index verfeinert, die Artengruppen sind leicht anders zusammengesetzt. Basis des Nitroindex' bilden die Artenzusammensetzung und die spezifischen Reaktionsweisen von Flechtenarten auf den N-Überschuss in ihrem Lebensraum (nach Wirth, 1980).

Der Wert des Nitroindex' rechnet sich zum einen auf den Frequenzwerten der fünf nitrophilen Flechtenarten *Xanthoria parietina*, *Xanthoria fallax*-Gr. *Physconia grisea*, *Phaeophyscia orbicularis*-Gr. und *Physcia adscendens*-Gr. Die Häufigkeit dieser Arten hat in den letzten 17 Jahren um 19 % zugenommen.

Zum andern die anitrophilen Arten *Hypogymnia physodes*, *Pseudevernia furfuracea*, *Evernia prunastri* und *Parmelia saxatilis*, Die Häufigkeit dieser Arten hat im Durchschnitt um 22% abgenommen.

Der Nitroindex ist die Summe der Veränderung beider Flechtengruppen jeweils pro Georaum.

Die Veränderung dieser beiden Flechtengruppen einander gegenübergestellt, ergibt ein differenziertes Bild über die zunehmende Eutrophierung in der Region Aarau durch Ammoniakemissionen.

Jeder Kreis auf den Nitroindexkarten (Abb. 26 und 27) entspricht einem Georaummittelpunkt. Braune Kreise stehen für nitrophile Immissionen, d.h. für Hinweise auf eine Eutrophierung. Blaue Kreise stehen für anitrophile Immissionen. Je grösser die Kreise, desto deutlicher die Hinweise auf die jeweiligen Immissionen.

### Veränderung des Eutrophierungsgrades

Die Stickstoffverhältnisse in der Schweiz sind das Resultat aus einem Gemisch verschiedener N-Immissionen. 1995 bestanden die N-Verbindungen etwa zu 40% aus oxydierten N-Depositionen ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ), welche vorwiegend aus Verbrennungsprozessen stammen und etwa zu 60% aus reduzierten N-Verbindungen ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_4^+$ ), hauptsächlich aus Quellen der Landwirtschaft (FAL 1996).

In Abbildung 26 ist der Nitroindex 1989 dargestellt. Die Hinweise auf anitrophile Immissionen waren leicht in der Überzahl. Rund um das Stadtzentrum von Aarau, den Zentren von Küttigen und Suhr, sowie in Buchs waren die Immissionen anitrophil.

Im Jahr 2006 (Abb. 27) gibt es nur noch drei Georäume, die auf anitrophile Immissionen hinweisen. Das ganze Gebiet ist nitrophil geprägt. Dementsprechend präsentiert sich auch die Differenzkarte (Abb. 28): die Immissionen sind praktisch überall nitrophiler geworden. Die grössten Verschiebungen gab es in stark überbauten, städtischen Gebieten.

Abb. 25 zeigt die Entwicklung des Nitroindex' der vergangenen Jahre in der Region Aarau. Der Nitroindex hat stark zugenommen von  $-1.8 (\pm 6.4)$  auf  $8.9 (\pm 6.6)$ .

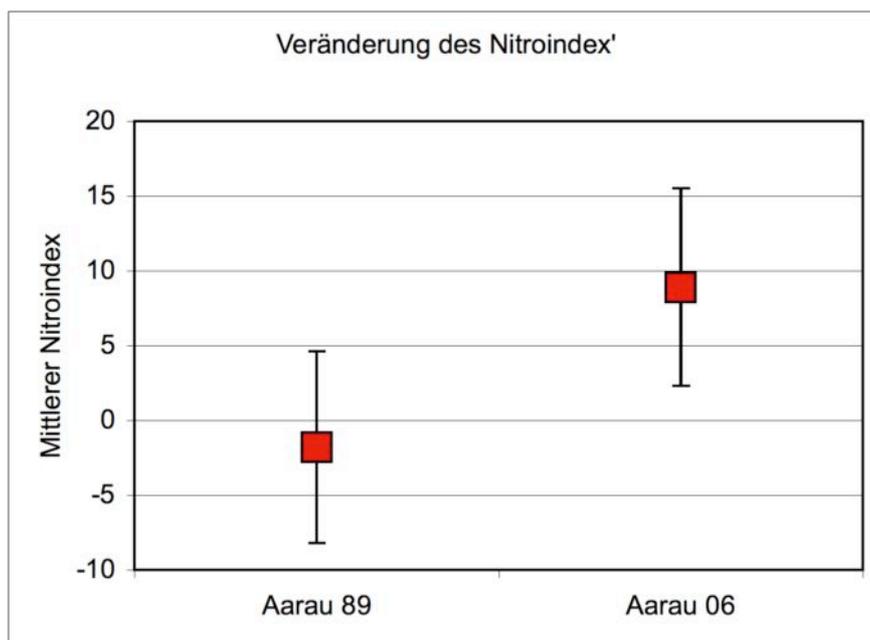


Abb. 25:  
Mittelwert und Standardabweichung des Nitroindex' aller Georäume der beiden Untersuchungen.

# Nitroindex 1989

## Bioindikation mit Flechten - Region Aarau



### Nitroindex



Hinweis auf nitrophile Immissionen



Hinweis auf antitrophile Immissionen

1000 0 1000 Meter



puls, Mühlemattstrasse 45, 3007 Bern

Kartendaten: PK50, 2004 swisstopo (DV642.4)

# Nitroindex 2006

## Bioindikation mit Flechten - Region Aarau



Nitroindex



Hinweis auf nitrophile Immissionen



Hinweis auf anthropile Immissionen

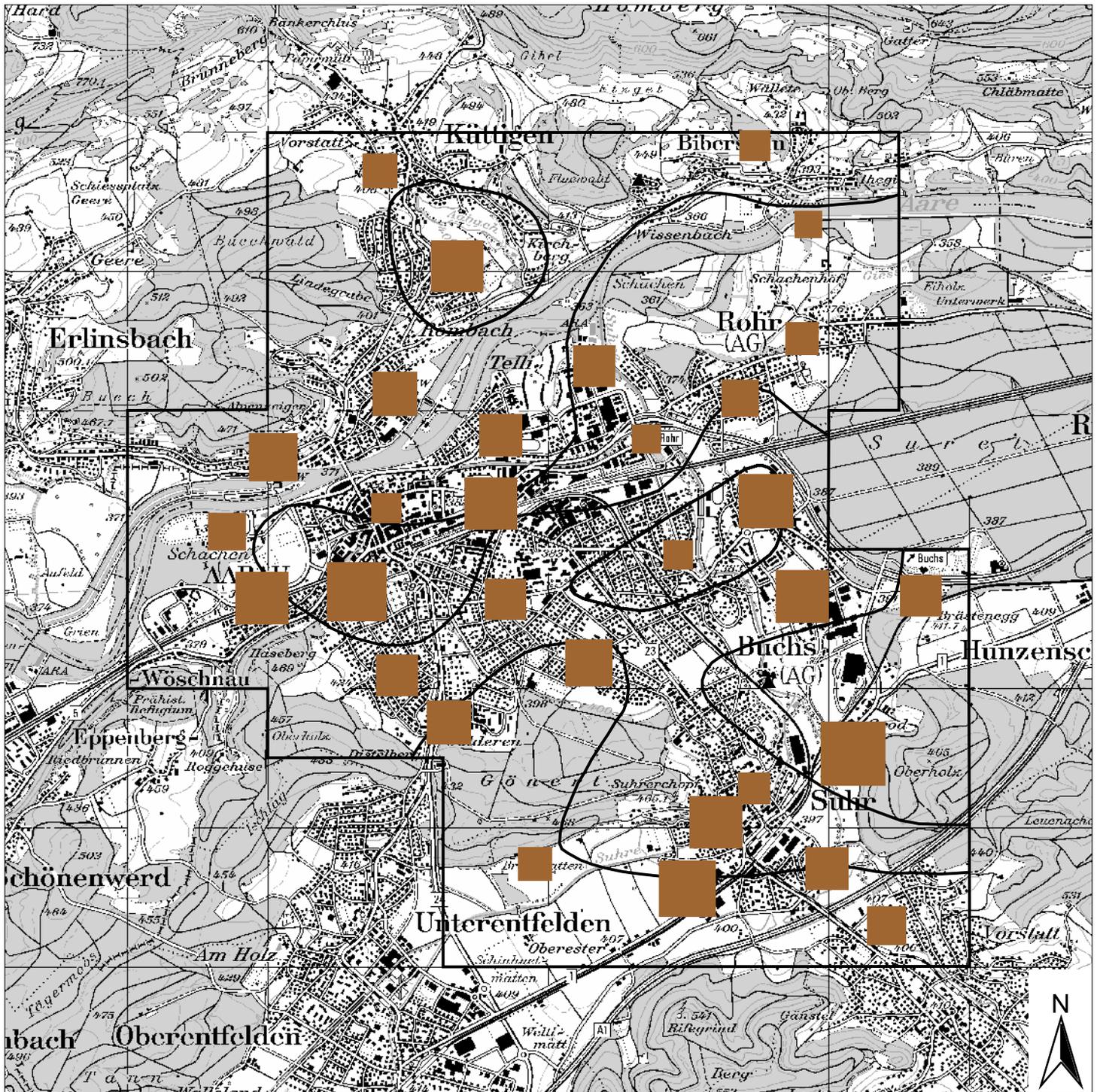
1000 0 1000 Meter

puls, Mühlemattstrasse 45, 3007 Bern

Kartendaten: PK50, 2004 swisstopo (DV642.4)

# Nitroindex-Differenz 1989 bis 2006

Bioindikation mit Flechten - Region Aarau



Acidindex



Immissionen sind nitrophiler geworden



Veränderung unbedeutend



Immissionen sind anitrophiler geworden

1000 0 1000 Meter

puls, Mühlemattstrasse 45, 3007 Bern

Kartendaten: PK50, 2004 swisstopo (DV642.4)

## 9. Vergleich mit dem Limmattal

Die ersten Flechtenuntersuchungen im Kanton Aargau wurden 1989 durchgeführt, unter anderen auch in der Region Aarau und im westlichen Limmattal (AGB, 1990). Im westlichen Limmattal wurden 1994/1995 und 2003 die Untersuchungen wiederholt (puls 1995 und 2004a). In diesem Kapitel werden die Untersuchungen von 1989 mit den Wiederholungsuntersuchungen 2003 und 2006 verglichen.

Im Jahr 1989 zeigten sich die beiden Gebiete recht unterschiedlich. Das westliche Limmattal war in grossen Teilen kritisch oder stark belastet. Die Region Aarau hingegen war nur im Zentrum der Stadt Aarau kritisch belastet. Grosse Gebiete waren gering oder gar sehr gering belastet.

Bei den Wiederholungsuntersuchungen sind die Unterschiede geringer, beide sind ähnlich stark belastet. Eine mittlere Gesamtbelastung (gelbe Zone) dominiert die Karten.

Die Entwicklung, die zu diesen Ergebnissen geführt hat, ist unterschiedlich. Im Limmattal hat sich die Gesamtluftbelastung verbessert, in der Region Aarau hat sie sich verschlechtert. Diese beiden gegenläufigen Entwicklungen führen zu einer Nivellierung der Luftbelastung.

Diese Nivellierung zeigt auch Abbildung 29. Georäume, die in der Ersterhebung einen hohen IAP-Wert hatten, zeigen eine negative Veränderung, Georäume die 1989 einen niedrigen IAP-Wert hatten, verbesserten sich. Ausnahme bilden die zwei stark belasteten Georäume im Zentrum von Aarau. Diese Entwicklung haben wir auch bei diversen anderen Untersuchungen im Mittelland beobachtet (s. Kap. 10.6, S. 51).

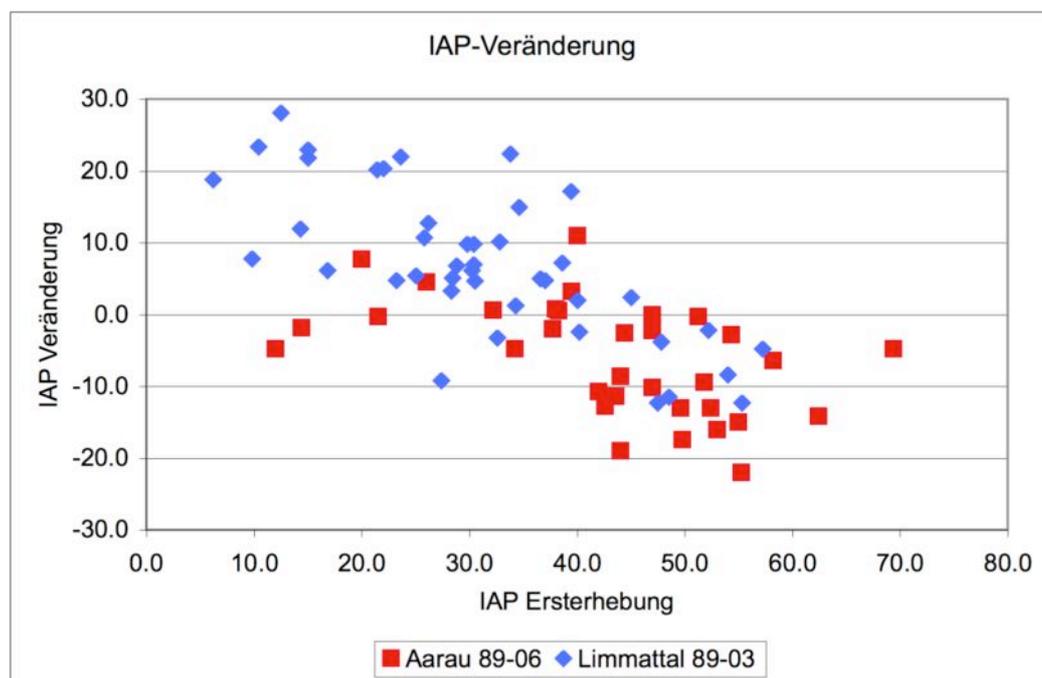
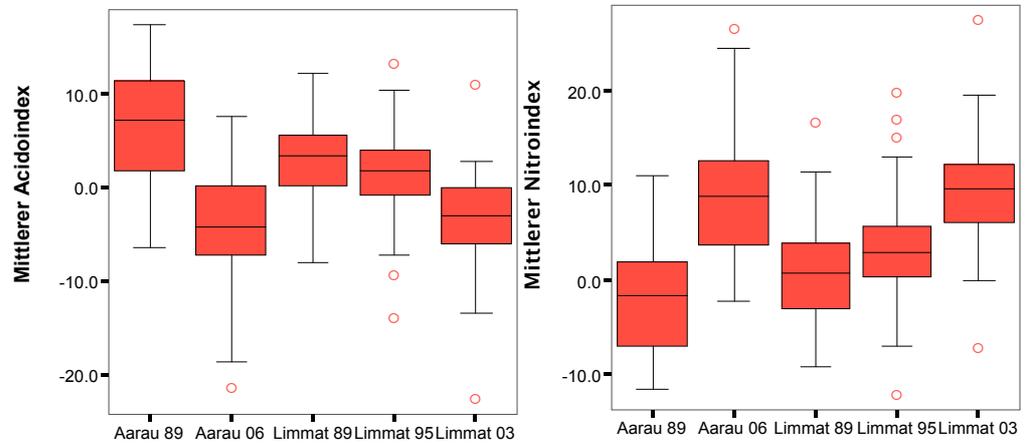


Abb. 29:  
IAP-Veränderung in  
Abhängigkeit des  
IAP18-Wertes der  
Ersterhebung.

Abb. 30:  
Mittelwert und Streuung des Acido- bzw. Nitroindex' aller Georäume der verschiedenen Untersuchungen.



Auch der Acidoindex und der Nitroindex zeigen in beiden Gebieten die gleiche Tendenz. Der Acidoindex nimmt ab, die sauer geprägten Immissionen sind weniger gross als früher. Der Nitroindex nimmt zu, die Eutrophierung der Luft wird grösser und somit nehmen die nitrophilen Flechtenarten zu.

# 10. Analyse der Veränderungen

## 10.1 Einleitung

Die Resultate der Flechtenkartierung 2006 in Aarau zeigen deutliche Unterschiede gegenüber denjenigen von 1989 (vgl. vorangehende Kapitel). Die auffälligsten Veränderungen gegenüber 1989 sind:

- Die Zone der geringen Gesamtbelastung ist 2006 stark zurückgegangen.
- Die Zonen der mittleren Gesamtbelastung haben sich auf Kosten der Zonen der geringen und sehr geringen Gesamtbelastung deutlich ausgedehnt.
- Auf starke Verschlechterungen der Luftqualität weisen die Flechten in Küttigen, Buchs und Suhr hin; das sind alles Gebiete, welche 1989 grösstenteils gering belastet waren.
- Die Auswertungen zu Acido- und Nitroindex zeigen, dass heute eine wesentlich basiphilere und nitrophilere Flechtenvegetation anzutreffen ist als vor 17 Jahren.

Welches sind die Gründe für diese Veränderungen? Die Flechtenbioindikation geht davon aus, dass diese Veränderungen durch Änderungen in der Luftqualität bedingt sind – die Flechtenmethode wurde mit dem Ziel der Luftqualitätsanzeige entwickelt und mit technischen Immissionsmessungen geeicht.

Im Folgenden werden die Resultate der Flechtenkartierung verglichen mit den technischen Daten zur Luftqualität. Zum Vollzug der Luftreinhalteverordnung erstellte der Kanton Aargau unter anderem einen Emissionskatalog und nimmt kontinuierliche technische Immissionsmessungen vor.

## 10.2 Emissionsdaten

In Abbildung 31 sind die Emissionsdaten der Schadstoffe Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ), Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC), Feinstaub  $\text{PM}_{10}$  und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) für den ganzen Kanton Aargau und für verschiedene Jahre aufgetragen (Kt. Aargau, 2002 und schriftliche Mitteilung von M. Schenk). Für den Vergleich mit den Flechtendaten werden diese gesamtkantonale Zahlen verwendet, da für einzelne Regionen des Kantons keine ähnlichen Daten zur Verfügung stehen. Die Situation in der Region Aarau kann vom gesamten Kanton abweichen.

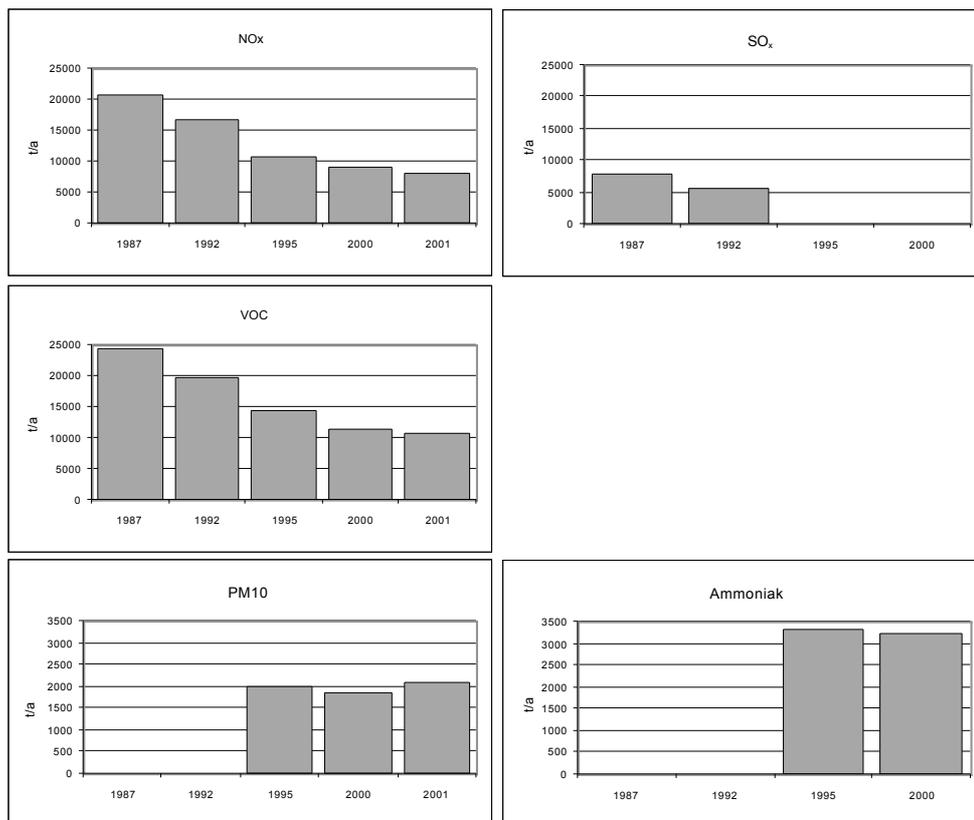


Abb. 31:  
Emissionsdaten für  
den Kanton Aargau.  
Die Datenreihen für  
SO<sub>x</sub>, PM10 und NH<sub>3</sub>  
sind unvollständig.

Stickstoffdioxide NO<sub>x</sub> entstehen bei Verbrennungsprozessen. Hauptemittenten sind der Verkehr (2001: rund 60%) und Industrie und Gewerbe (rund 35%). Die Emissionen von Stickstoffdioxid haben im Zeitraum von 1987 bis 2001 um insgesamt 61% abgenommen.

Die flüchtigen Kohlenwasserstoffe VOC stammen im Kanton Aargau zu 66% aus Industrie und Gewerbe, 20% aus dem Verkehr und 12% aus den Haushaltungen. Auch diese Emissionen sind zwischen 1987 und 2001 stark zurückgegangen, die Abnahme betrug rund 57%.

Hauptemittenten von Schwefeldioxid SO<sub>2</sub> sind Industrie und Gewerbe (rund 75%). Für diese Schadstoffe liegen nur Emissionszahlen von 1987 und 1992 vor. In dieser vergleichsweise kurzen Zeitspanne haben die Emissionen um 30% abgenommen.

Es ist davon auszugehen, dass die SO<sub>2</sub>-Emissionen seit 1992 weiter abgenommen haben, wenn auch nicht ganz im selben Umfang wie vor 1992 (BUWAL 1995 und 2003).

Für PM10 und Ammoniak liegen Emissionsdaten ab 1995 vor. Bei PM10 sind Verkehr sowie Industrie und Gewerbe zu je rund 40%, Land- und Forstwirtschaft zusammen zu rund 20% an den Emissionen beteiligt. Ammoniak stammt fast ausschliesslich aus der Land- und Forstwirtschaft. Bei beiden Schadstoffen haben sich die Emissionen seit 1995 nicht wesentlich verändert.

Diese Emissionsreduktionen sind auf die vielen lufthygienischen Massnahmen zurück zu führen, welche in dieser Zeit von Bund, Kanton und Gemeinden realisiert wurden. Zu erwähnen sind insbesondere: Einführung des Katalysators, Entbleiung des Benzins, verschärfte Abgasvorschriften für alle Fahrzeugkategorien, Sanierungen von Industrieanlagen, obligatorische Ölfeuerungskontrollen, Entschwefelung des Heizöls, Lenkungsabgaben auf Heizöl, Lenkungsabgaben auf flüchtigen organischen Verbindungen und Öffentlichkeitsarbeit.

### 10.3 Immissionsmessungen

Der Kanton Aargau erfasst die Luftbelastung anhand von verschiedenen Immissionsmessungen. Messstandorte, Messumfang, Messmethodik und gemessene Parameter haben sich aufgrund geänderter Rahmenbedingungen (z.B. neuer Parameter PM10 mit LRV-Grenzwert, kantonale Finanzen) im Verlauf der Zeit teilweise verändert. Im Folgenden werden die Resultate der Immissionsmessungen in der Region Aarau dargestellt, welche über längere Zeit unverändert erfasst wurden und sich deshalb zum Vergleich mit den Flechtendaten eignen.

#### Immissionsmessungen

Die Messstation Suhr Bärenmatte liegt im Zentrum von Suhr an einer verkehrsreichen Kreuzung mit Lichtsignalanlage. Die Station ist seit 2000 in Betrieb und löste die damalige Station Suhr Distelmatte ab, die von 1987 bis 2001 in Betrieb war. Die Station Distelmatte lag ausserhalb des Zentrums auf einer Wiese. Daten der Messstation Aarau stammen aus den Jahren 1984 bis 1998.

#### Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub>

Die Stickstoffdioxid-Immissionen (Abb. 32) sind an den Standorten Distelmatt und Aarau seit Ende 80er-Jahre bis ca. 1998 kontinuierlich zurückgegangen, danach sind sie gleich geblieben. Seit rund zehn Jahren sind keine Überschreitungen des Immissionsgrenzwertes (IGW) von 30 µg/m<sup>3</sup> (Jahresmittelwert) mehr vorgekommen. Die Werte von der Station Bärenmatte liegen seit Messbeginn 2000 über dem IGW.

NO<sub>2</sub>-Passivsammler-Daten wurden an einigen Orten im Untersuchungsgebiet erhoben. In Abb. 33 sind diejenigen dargestellt, welche eine Zeitreihe enthalten. Die Belastung mit NO<sub>2</sub> nimmt bis ca. 1998 kontinuierlich ab. Danach bleibt die Belastung etwa gleich. Die Werte bleiben über dem Immissionsgrenzwert. Die Referenzmessung in Suhr Distelmatte zeigt auch einen Rückgang der NO<sub>2</sub>-Belastung an und bleibt unter dem Grenzwert.

Am Messpunkt Aarau Mühlemattstrasse steigt die Belastung mit NO<sub>2</sub> leicht an.

Andere Standorte mit geringerer NO<sub>2</sub>-Belastungen sind: Biberstein, Küttigen, Rombach, Buchs Styfeli, Aarau Säulenhaus. Ihre Jahresmittelwerte (2000 oder 2001) liegen unter dem Grenzwert, wenn z. T. auch nur knapp. Belastungen über dem Grenzwert wurden in Aarau und in Suhr gemessen.

Abb. 32:  
Die Stickstoffdioxid-Werte in Suhr, Bärenmatte und Distelmatte und Aarau. Der Immissionsgrenzwert liegt bei 30 µg/m<sup>3</sup>.

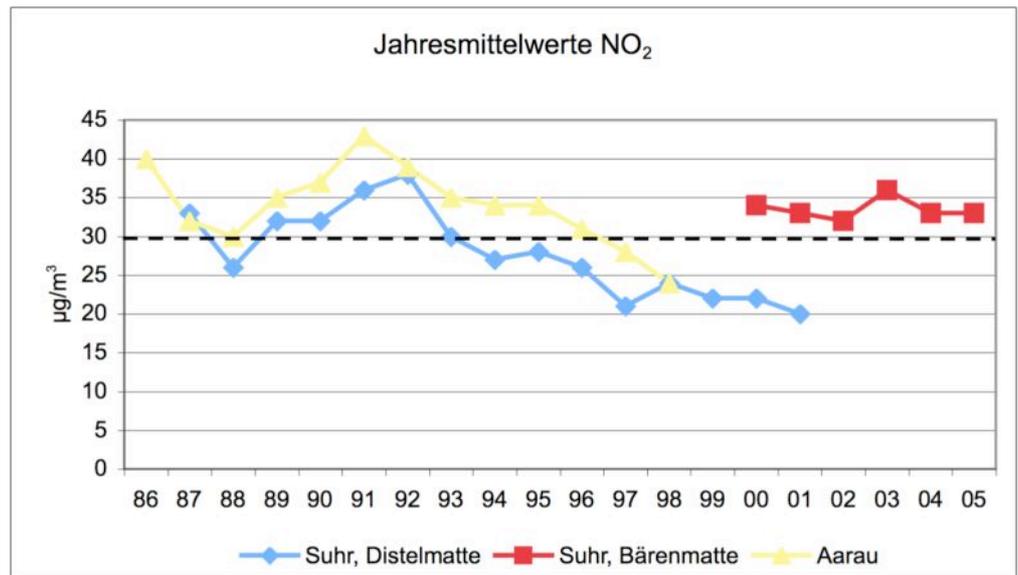
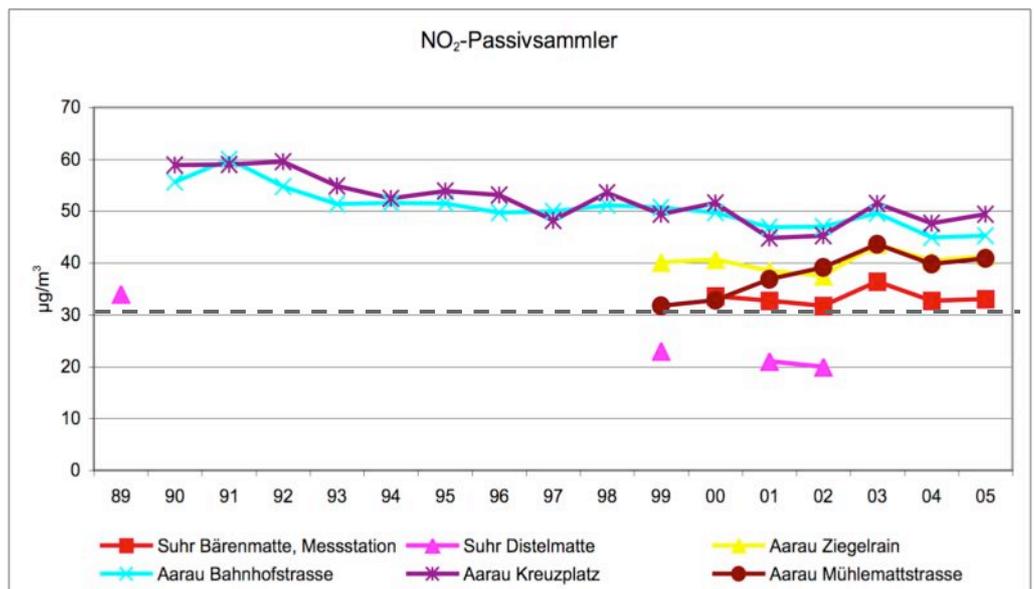


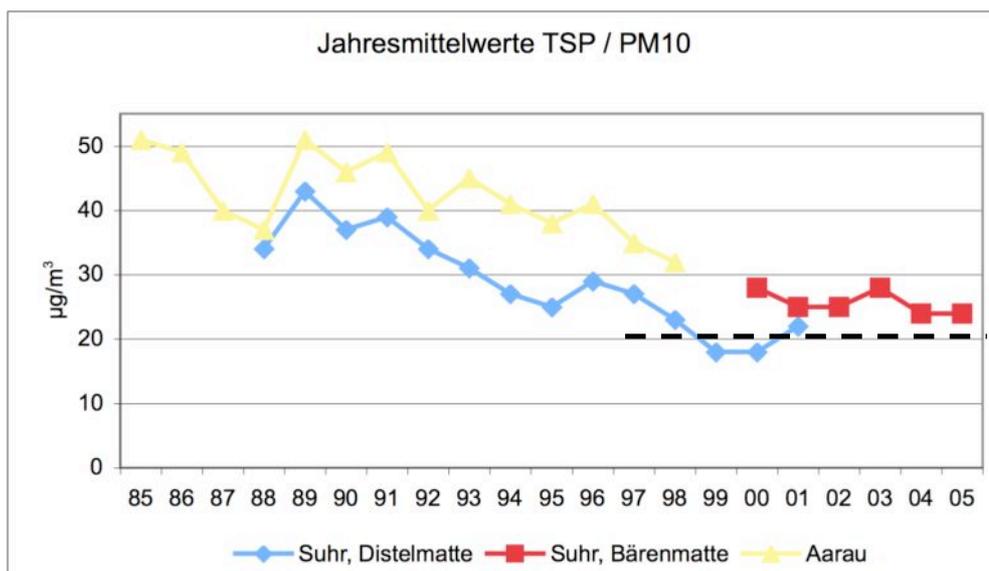
Abb. 33:  
Die Daten von verschiedenen NO<sub>2</sub>-Passivsammlern. Der Immissionsgrenzwert liegt bei 30 µg/m<sup>3</sup>.



### Schwebestaub und PM10

TSP (Schwebestaub) wurde bis 1996 gemessen, 1997 wurde auf PM10-Messungen umgestellt und der Immissionsgrenzwert von  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  eingeführt. Bei der Station Distelmatte sind die Werte ab Anfang der 90er-Jahre gesunken, und haben sich dann um den Grenzwert eingependelt. Die Messwerte an der Station Bärenmatte liegen seit Messbeginn über dem Grenzwert (Abb. 34).

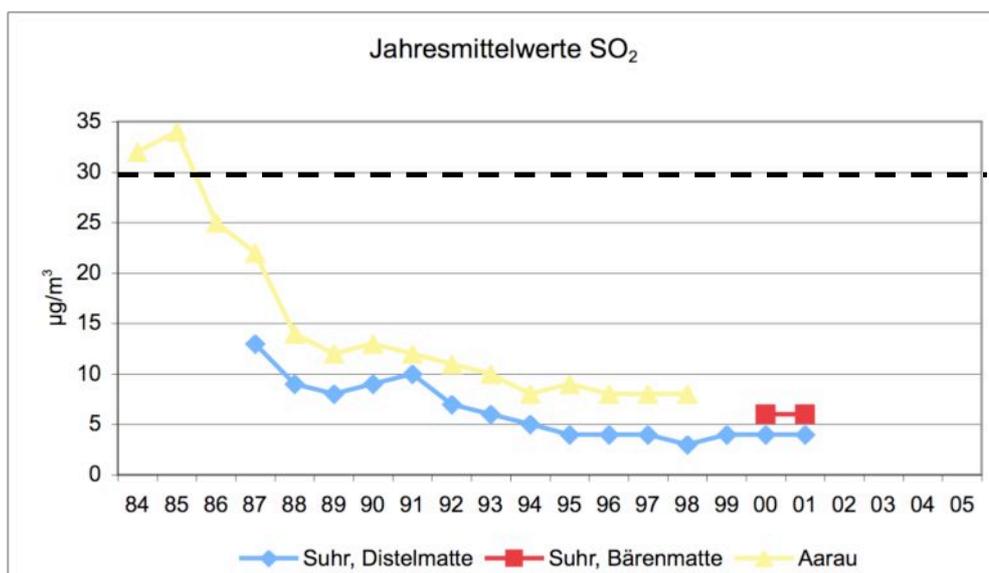
Abb. 34:  
Die Feinstaub-Werte in Suhr, Bärenmatte und Distelmatte und Aarau. Der Immissionsgrenzwert für PM10 (ab 1997) liegt bei  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



### Schwefeldioxid SO<sub>2</sub>

Die Schwefeldioxid-Immission ist in den 80er-Jahren sehr stark zurückgegangen, danach war der Rückgang langsamer. Es gibt keine neuen Messwerte mehr (Abb. 35). Die Werte liegen ab 1987 deutlich unter dem Grenzwert.

Abb. 35:  
Die Schwefeldioxid-Immissionen in Suhr, Bärenmatte und Distelmatte und Aarau. Der Immissionsgrenzwert für SO<sub>2</sub> liegt bei  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



### Ozon O<sub>3</sub>

Die Ozon-Belastung hat sich in den letzten 20 Jahren nicht wesentlich verändert, ausser dass Spitzenwerte von über 200 µg/m<sup>3</sup> Im Hitzesommer 2003 gab es eine überdurchschnittlich hohe Belastung durch Ozon (Abb. 36).

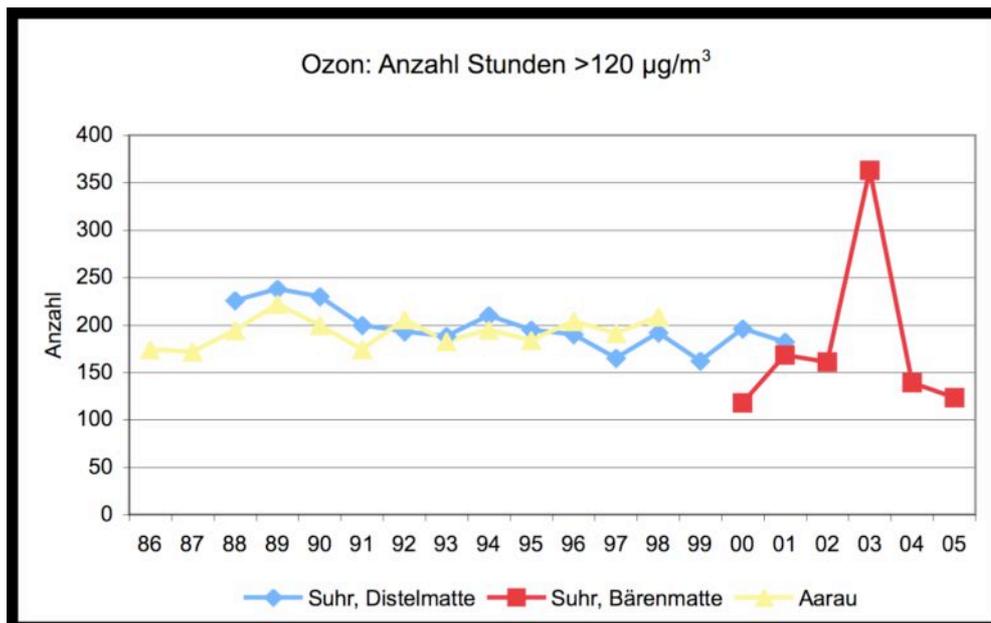


Abb. 36:  
Die Anzahl Stunden mit Ozonkonzentrationen über 120 µg/m<sup>3</sup> in Suhr Bärenmatte und Distelmatte und Aarau. Grenzwert: 1 Stunde > 120 µg/m<sup>3</sup>.

### pH-Wert des Regens

Neben der trockenen Deposition in Staub- und Gasform spielt die nasse Deposition über Regen und Nebel für die Ökosysteme eine wichtige Rolle. Hier gibt die Analyse des Regenwassers Aufschluss über den Schadstoffeintrag. Im NABEL-Messnetz wird seit 1985 der pH-Wert des Regenwassers bestimmt. Dieser Wert hat seither stetig zugenommen, d.h. die Acidität des Regens hat abgenommen. Grund dafür ist primär die Abnahme des Sulfatgehaltes (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, gebildet aus SO<sub>2</sub>) und in geringerer Masse die Reduktion der Nitrat- (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, gebildet aus NO<sub>x</sub>) und Chloridgehaltes (BUWAL 2003).

Dieser Rückgang des Säureeintrages manifestiert sich deutlich in der Flechtenvegetation: Der Acidoindex ist in der Region Aarau sehr deutlich gestiegen, die basischen Immissionen haben gegenüber den sauren für die Flechten an Bedeutung gewonnen (siehe Kap. 8).

### 10.4 Flechten-Differenzkarte und technische Messdaten

Abbildung 37 zeigt eine Gegenüberstellung der Entwicklung der Emissionen im Kanton Aargau, der Immissionen in der Region Aarau und der Gesamtbelastung, die durch die Flechten angezeigt wird. Die NO<sub>x</sub>-, VOC- und SO<sub>2</sub>-Emissionen haben abgenommen, die Ozon- und Staubemissionen sind ungefähr gleich geblieben.

Die NO<sub>2</sub>- und Staubbemissionen zeigten früher eine Abnahme, seit ein paar Jahren bleiben sie auf dem gleichen Niveau. Die Ozonbelastung ist gleich geblieben, die SO<sub>2</sub>-Immissionen haben stark abgenommen. Die durch die Flechten ausgewiesene Gesamtbelastung dagegen hat sich erhöht.

Veränderungen	Region Aarau	Kt. Aargau
<b>Emissionen:</b>		
NO <sub>x</sub> , VOC, SO <sub>2</sub>		↓
Staub, Ammoniak		→
<b>Immissionen:</b>		
NO <sub>2</sub> , Staub	↘→	
Ozon	→	
SO <sub>2</sub>	↓	
Gesamtbelastung	↗	

Abb. 37: Trends der Emissionen, Immissionen und Gesamtbelastung in der Region Aarau und im gesamten Kanton.

Es ist kein offensichtlicher Zusammenhang zwischen der Verschlechterung der Gesamtbelastung und den Emissions- und Immissionsdaten erkennbar. Auffallend ist, dass diese Verschlechterungen fast ausschliesslich in Gebieten aufgetreten sind, welche in der Ersterhebung 1989 gering belastet waren.

### 10.5 Flechten und technische Messungen: Zwei Messsysteme

Flechtenuntersuchungen, technische Messungen und Berechnungen (zu Emission und Immission) weisen meistens eine Gleichläufigkeit auf, da sie beide das Phänomen Luftbelastung erfassen. Die beiden Messsysteme unterscheiden sich aber in einigen wichtigen Punkten, eine vollständige Übereinstimmung der Messgrössen ist nicht zu erwarten. Welches sind die hauptsächlichsten Unterschiede dieser beiden Messsysteme?

Auf der einen Seite erfassen die Flechten die Luftqualität als biologisches System, das heisst, ihre Anzeige beinhaltet die Wirkung der Luftbelastung auf ein Lebewesen. Als solches reagieren die Flechten auf das gesamte

Schadstoffgemisch, die Auswirkungen aller Schadstoffe werden angezeigt. Sie zeigen die Gesamtbelastung der Luft an, direkte Rückschlüsse auf Einzelschadstoffe sind nicht möglich. Durch die Erfassung von ca. 177 Einzelbäumen wird die Belastung flächendeckend charakterisiert.

Auf der andern Seite geben die technischen Messungen präzise Auskunft über Einzelschadstoffe. Die Messergebnisse sind rechtlich direkt relevant, da über Grenzwerte in der Luftreinhalteverordnung die maximal zulässigen Belastungen definiert sind. Die Immissionsmessungen beziehen sich eng auf den gewählten Messstandort. Je nach Distanz des Messpunktes zu einer relevanten Emissionsquelle (z.B. Strassenabstand) kann der Immissionswert sehr unterschiedlich ausfallen.

Aus diesen Unterschieden der beiden Messsysteme können durchaus unterschiedliche Resultate der Luftbelastung entstehen, wie dies in der Region Aarau der Fall ist.

### **10.6 Vergleich mit Flechtenuntersuchungen im Mittelland**

Die Diskrepanzen zwischen Veränderung der Flechtenvegetation und Veränderung von Emissionen und Immissionen sind fast ausschliesslich in Gebieten aufgetreten, welche 1989 eine geringe Gesamtbelastung aufwiesen.

Dieser Rückgang in Gebieten mit ehemals verhältnismässig reicher Flechtenvegetation ist auch in allen andern untersuchten Gebieten des Schweizer Mittellandes feststellbar.

In Abbildung 38 ist der Zusammenhang zwischen dem IAP18-Wert der Ersterhebung und der IAP18-Veränderungen für jeden untersuchten Georaum aufgetragen. Enthalten sind neben der Untersuchung von Aarau auch diejenigen von Zug (1993-2003), Luzern (1987-1997), Winterthur (1989-1996) und vom Limmattal AG (1989-2003).

Es gibt einen klaren Trend, der allen Untersuchungen gemeinsam ist: In ehemals belasteten Gebieten (tiefe IAP18-Werte der Ersterhebung) sind die Veränderungen der IAP18-Werte durchwegs positiv, das heisst die Gesamtbelastung hat abgenommen. Im Gegensatz dazu sind in ehemals gering belasteten Gebieten fast ausschliesslich negative Veränderungen festzustellen, das heisst die Gesamtbelastung hat zugenommen. Die Grafik bestätigt die klare Nivellierung der Gesamtbelastung.

Vergleichbare Phänomene wurden auch in Wiederholungsuntersuchungen im Fürstentum Liechtenstein und im Bündner Rheintal festgestellt. Da dort eine an die speziellen klimatischen Verhältnisse angepasste Flechtenmethode angewendet wird, werden die Resultate nicht in die Abbildung 38 integriert.

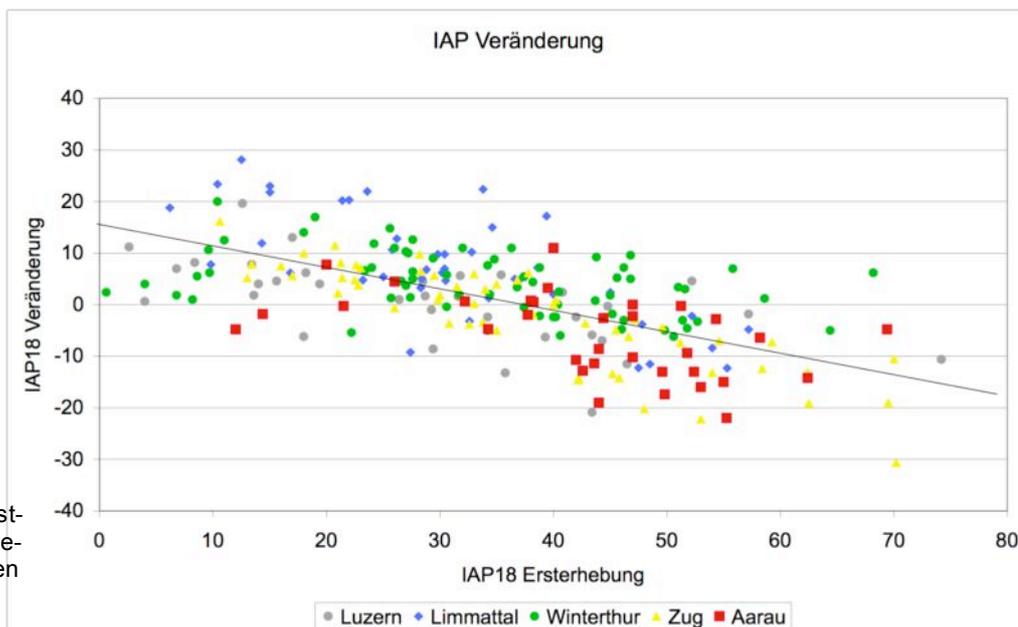


Abb. 38:  
IAP-Veränderung in  
Abhängigkeit des I-  
AP18-Wertes der Erst-  
erhebung für verschie-  
dene Untersuchungen  
im Schweizer Mittel-  
land.

Vergleicht man die Streuung der Aarauer Georäume mit denjenigen der andern Untersuchungen, so fällt auf, dass in der Region Aarau mehr Georäume mit einer ehemals geringen Belastung erfasst wurden und dass deren negative Veränderungen tendenziell stärker ausgefallen sind als bei den andern Untersuchungen (Ausnahmen bilden zwei Georäume im Zentrum von Aarau). Im unteren IAP18-Wertebereich dagegen sind die Veränderungen der Aarauer Georäume mit denjenigen der andern Untersuchungen vergleichbar.

**Fazit:** Die Nivellierung der durch die Flechten ausgewiesenen Gesamtbelastung ist in allen Untersuchungen im Schweizer Mittelland feststellbar, die Verschlechterung der Gesamtbelastung in ehemals gering belasteten Gebieten ist kein spezifisches Aarauer Phänomen.

### 10.7 Weitere mögliche Gründe für den Flechtenrückgang

Der Flechtenrückgang in ehemals unbelasteten Gebieten kann vorläufig nicht schlüssig beantwortet werden. Die Analyse der Veränderungen lässt sich bezüglich dieses Phänomens wie folgt zusammenfassen:

- In Gebieten, welche in der Ersterhebung 1989 gering belastet waren, weisen die Flechten auf eine Verschlechterung der Luftqualität hin und weichen damit von den Resultaten der technischen Messungen ab.
- Abweichungen zwischen Flechtenuntersuchung und technischen Messungen sind aus messtechnischen Gründen möglich.
- Ein Rückgang der Flechtenvegetation in ehemals gering belasteten Gebieten wurde in allen Wiederholungsuntersuchungen im Schweizer Mittelland festgestellt.

Bleibt die Frage nach den Gründen für den festgestellten Rückgang der Flechten in unbelasteten Gebieten. Offensichtliche Ursachen konnten bisher keine gefunden werden. Die folgenden möglichen Gründe sind deshalb als Thesen zu verstehen:

- Nebelgrenze: Es ist denkbar, dass ein Ansteigen der Nebelgrenze zu höheren Belastungen in den ehemals nebelfreien und geringer belasteten Gebieten führt.
- Inversionslage Winter 2006: Hohe PM10-Belastung während längerer Zeit können Flechten zum Absterben bringen. Während der Kartierung im Sommer 2006 wurden aber nicht auffällig viele abgestorbene Flechten oder Flechtenteile beobachtet.
- Schadstoffe: Möglicherweise beeinträchtigen bisher unbekannt oder nicht gemessene Luftschadstoffe die Flechten. Denkbar sind unter anderem Sekundärschadstoffe, deren Wirkungsgebiet in einiger Distanz zu den Quellen liegt.
- Kombinationswirkungen: Nicht auszuschliessen ist die kombinierte Wirkung von mehreren Einzelwirkungen (Schadstoffe, Klima etc), welche bisher nicht bekannt sind.
- Nährstoffzusammensetzung: Der Nitroindex weist darauf hin, dass sich die Zusammensetzung des Nährstoffangebotes für Flechten in Teilen des Untersuchungsgebietes erhöht hat.  
Bautätigkeit: Die Bautätigkeit führt zu erhöhten Emissionen, insbesondere die Staubbelastung nimmt markant zu. Es wäre denkbar, dass erhöhte Bautätigkeit zum Flechtenrückgang geführt hat. Direkte Angaben zur Bautätigkeit und zu Veränderungen im Bauvolumen liegen nicht vor.
- Langzeitwirkung: Denkbar ist, dass die Flechtenvegetation durch die seit Jahrzehnten anhaltende Belastung mit Luftschadstoffen einer chronischen Schädigung unterliegt. Manifestieren würde sich diese Schädigung

gung in einer bisher nicht erkannten Verarmung der Flechtenvegetation vor allem in Gebieten, welche vor einigen Jahren noch eine gute ausgebildete Flechtenvegetation aufwiesen, wie dies in mehreren Untersuchungsgebieten im Schweizer Mittelland festgestellt werden konnte.

Theoretisch können solche Veränderungen auch andere Ursachen haben. Neben der Luftqualität lassen sich drei weitere mögliche Gruppen von Einflussgrößen unterscheiden:

- Methodische Ursachen: Faktoren methodischer und erhebungstechnischer Art wie BearbeiterInneneinfluss, Baumqualität etc.
- Natürliche Prozesse: Dynamische Veränderungsprozesse in der Natur, welche zu Veränderungen der Flechtenvegetation führen wie Artendominanzen, Artenverschiebungen etc.
- Standortfaktoren: Physikalisch-chemische Veränderungen am Standort, wie pH-Verschiebungen im Niederschlag, klimatische Faktoren wie Nebelhäufigkeit etc.

Bisher konnten keine Hinweise gefunden werden, dass eine dieser Größen einen entscheidenden Beitrag zur Veränderung der Flechtenvegetation in Aarau geleistet hätte.

## 11. Schlussfolgerungen

Die Flechtenindikation erfasst die Gesamtbelastung der Luft wirkungsbezogen und flächendeckend. Sie ergänzt damit die technischen Immissionsmessungen und ermöglicht eine regelmässige Überwachung und Erfolgskontrolle von lufthygienischen Massnahmen.

Seit der Ersterhebung von 1989 realisierten Bund, Kanton und Gemeinden aufgrund der eidgenössischen Luftreinhalteverordnung und der kantonalen Massnahmenplanung Luft (Kanton Aargau, 1991 und 2002; [www.ag.ch/umwelt](http://www.ag.ch/umwelt)) viele lufthygienische Massnahmen. Zu erwähnen sind insbesondere: Einführung des Katalysators, Entbleiung des Benzins, verschärfte Abgasvorschriften für alle Fahrzeugkategorien, Sanierungen von Industrieanlagen, obligatorische Ölfeuerungskontrollen, Entschwefelung des Heizöls, Lenkungsabgaben auf Heizöl, Lenkungsabgaben auf flüchtigen organischen Verbindungen und Öffentlichkeitsarbeit.

Grosse Teile des Untersuchungsgebietes sind aber nach wie vor stark bis mittel belastet. Diese Belastung wird auch durch die technischen Immissionsmessungen bestätigt, welche für das Zentrum von Aarau Grenzwertüberschreitungen von NO<sub>2</sub> und Ozon und für das Zentrum in Suhr zusätzlich PM10 nachweisen.

Die Luftreinhalteverordnung setzt als Ziel, die Luftbelastung auf ein verträgliches Mass für Mensch, Tier und Pflanze zu senken. Aus biologischer Sicht bedeutet diese gesetzliche Vorgabe, dass die Zonen mit kritischer und starker Gesamtbelastung gänzlich zu eliminieren sind und die Zone geringer Belastung weiter auszudehnen ist.

Dieses Ziel ist noch nicht erreicht. Für das untersuchte Gebiet könnte das heissen, dass die heute noch vorhandene kritische und starke Gesamtbelastung wegfällt und der Anteil der geringen und sehr geringen Gesamtbelastung zusammen mindestens 50% (heute 28.3%) der Fläche beträgt.

Die Sanierung der wichtigsten Einzelemittenten und Emittentengruppen ist erfolgt. Eine weitere Senkung der Luftbelastung macht die Kombination von vielen kleineren Massnahmen insbesondere auch im Verkehrsbereich notwendig.

Die Differenzkarte zeigt auch einen Trend zur Verschlechterung der Luftqualität auf. In Gebieten, welche 1989 eine geringe Gesamtbelastung aufwiesen wie Küttigen und Buchs, hat sich die Luftqualität trotz der getroffenen Massnahmen verschlechtert. Die Analyse der Veränderungen konnte keine klaren Ursachen für dieses Phänomen, welches auch in allen andern Flechtenuntersuchungen im Schweizer Mittelland festgestellt wurde, finden.

Mögliche Gründe sind ein Ansteigen der Nebelgrenze, die Inversionslage im Februar 2006, der Einfluss bisher nicht erkannter Schadstoffe, die

Kombinationswirkung von Schadstoffen, eine Mehrbelastung durch nährstoffhaltige Schadstoffe, eine erhöhte Bautätigkeit und eine Langzeitwirkung durch chronische Schädigung der Flechten. Gut denkbar ist auch, dass eine Kombination von verschiedenen dieser Ursachen zum festgestellten Flechtenrückgang geführt hat.

Die Flechten als hochempfindliches Frühwarnsystem geben uns einen Hinweis auf eine Beeinträchtigung der Artenvielfalt, auf eine Abnahme der Biodiversität in Gebieten mit ehemals reicher Flechtenvegetation. Dieser Hinweis sollte unbedingt weiterverfolgt werden, auch oder gerade weil die Ursachen dafür nicht klar sind.

Die Flechten eignen sich zur Erfolgskontrolle der lufthygienischen Massnahmen, auch wenn nicht alle Ergebnisse in einen direkten Bezug zu den technischen Daten zur Luftqualität gebracht werden konnten. Gerade hier liegt ihr Wert als biologische Indikatoren: Sie ergänzen die technischen Messungen mit Aussagen zur Wirkung der Luftbelastung auf Lebewesen. Zur systematischen Überwachung der Luftqualität bietet sich die erneute Wiederholung der Flechtenuntersuchung in einigen Jahren an. Zu diesem Zeitpunkt wird auch die Ostumfahrung Aarau vollumfänglich in Betrieb sein und allfällige Auswirkungen können erfasst werden. Die Grundlage dazu ist mit den vorgenommenen standardisierten Erfassungen und Auswertungen der Flechtendaten geschaffen.

Die vorliegenden Ergebnisse können für die Information der Behörden und der Öffentlichkeit über die Wirkung der bisherigen Luftreinhaltepolitik und die Notwendigkeit weiterer Massnahmen verwendet werden. Das Hauptgewicht kann dabei auf die Wirkungsanzeige der Luftbelastung durch die Flechten und auf die heutige Belastungssituation gelegt werden. Die Untersuchung muss dazu in einer leicht verständlichen und ansprechenden Form aufbereitet und präsentiert werden.

## 12. Glossar

**Acidoindex**

Flechtenindex, welcher qualitative Aussagen über die Art der Immission liefert; der Index charakterisiert, ob die Immission vorwiegend basisch oder sauer geprägt ist.

**Bioindikation**

Anzeige von Umweltveränderungen mit Hilfe von Lebewesen oder lebenden Systemen. Bioindikatoren sind Organismen, die auf Schadstoffbelastungen mit Veränderungen ihrer Lebensfunktion antworten oder den Schadstoff messbar akkumulieren.

**Differenzkarte**

Visualisiert die räumliche Veränderung der Luftbelastung zwischen zwei Untersuchungszeitpunkten.

**Emission**

Ausstoss von Schadstoffen an der Quelle.

**Epiphyt**

Baumbewohnende Flechte, Pflanze oder Pilz.

**Frequenz**

Häufigkeitsmass; bezeichnet die Anzahl von 10 Teilfeldern des Frequenzgitters, in welchen eine Flechtenart vorkommt.

**Frequenzgitter**

Aufnahmegerät zur Bestimmung der Frequenz der Flechtenarten; das Gitter ist 50 cm hoch und umfasst den halben Stammumfang eines Trägerbaums; es ist in 10 gleich grosse Teilfelder unterteilt.

**Georaum**

Kollektiv von meist fünf benachbarten Trägerbäumen in einem geographisch einheitlichen Raum mit homogener Immissionssituation. Die Georäume sind die Grundeinheit für die Konstruktion der IAP-Luftgütekarte und für weitere Auswertungen.

**Gesamtimmissionsbelastung**

Belastung der Luft durch verschiedene Einzelschadstoffe, deren Kombinationswirkung mit dem Indikator Flechte erfasst wird.

**IAP**

Index of atmospheric purity; Luftgütewert der Kalibrierten Flechtenindikationsmethode; Summe der Frequenzen aller berücksichtigten Flechtenarten an einem Trägerbaum.

**Immission**

Luftbelastung am Orte ihres Einwirkens auf die belebte und unbelebte Umwelt.

**Isolinie**

Verbindungsline (Kurve) gleicher Werte zur Konstruktion der Luftgütekarte und der Differenzkarte.

**Kalibrierte Flechtenindikationsmethode**

Mit technischen Luftschadstoffen geeichtes Erhebungsverfahren der Luftqualität auf der Basis der Verbreitung von Baumflechten. Entwickelt im Nationalen Forschungsprogramm 14.

**Nitroindex**

Der Nitroindex ist eine Messgrösse für den Eutrophierungsgrad durch Ammoniak.

**NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>**

Stickoxide, vorwiegend Primärschadstoffe, Hauptemittent Verkehr.

**O<sub>3</sub>, Ozon**

Sekundärschadstoff, gebildet aus den Vorläufersubstanzen NO<sub>x</sub> und VOC unter Sonneneinwirkung.

**Passivsammler**

Einfaches Messverfahren mit Absorptionsröhrchen für SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> mit begrenzter zeitlicher Auflösung (1 Tag bis einige Wochen).

**PM10**

Feine Staubpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 10 Mikrometer. Diese kleinen Partikel sind besonders gut lungengängig.

**Primärschadstoff**

Schadstoff, der an der Quelle entweicht.

**Rote Liste**

Rote Liste der Flechten im Sinne von Art. 14 Abs. 3 der NHGV: führt die gefährdeten, seltenen und geschützten Flechtenarten der Schweiz auf.

**SO<sub>2</sub>**

Schwefeldioxid; Hauptemittent sind Feuerungen (Ölverbrennung).

**Symbiose**

Enge Lebensgemeinschaft von Organismen, welche unter sich Stoffwechselprodukte austauschen. Flechten sind symbiotische Lebewesen, sie bestehen aus einer Pilz- und einer Algenart.

**Schwebestaub**

Feine Staubpartikel in der Luft; können durch Einatmung bis in die Lunge gelangen.

**Sekundärschadstoff**

Schadstoff, der aus Primärschadstoffen durch chemische Umwandlung in

der Atmosphäre gebildet wird; meist sind Sekundärschadstoffe erst fernab vom Emissionsort in höherer Konzentration vorhanden.

**Trägerbaum**

Ausgewählter freistehender Laubbaum (Linde, Esche, Eiche, Ahorn), welcher bestimmten Bedingungen genügen muss (Umfang, Rindenbeschaffenheit, Neigung etc.) und der Bestimmung des IAP-Wertes dient.

**Transmission**

Transport und Ausbreitung von Schadstoffen; Schadstoffe können in dieser Phase verdünnt und chemisch umgewandelt werden.

**VOC**

Flüchtige organische Verbindungen, entstehen vor allem beim Verdunsten von Lösungsmitteln und Treibstoffen und bei der unvollständigen Verbrennung.

## 13. Literatur

AGB, 1990. Flechten als Bioindikatoren der Luftverschmutzung im Kanton Aargau, Untersuchungen 1989; Baudepartement des Kantons Aargaus, Abteilung Umweltschutz, Aarau.

BUWAL, 1995. Nr. 256 Vom Menschen verursachte Luftschadstoff-Emissionen in der Schweiz von 1900 bis 2010. Schriftenreihe Umwelt Nr. 256. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

BUWAL, 2003. NABEL - Luftbelastung 2002. Schriftenreihe Umwelt Nr. 360. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

In-Luft, 2001. Luftbelastung in der Zentralschweiz und im Kanton Aargau. Detaillierte Messdaten 2000: Zentralschweizer Umweltschutzdirektionen in Zusammenarbeit mit dem Kanton Aargau.

In-Luft, 2002. Luftbelastung in der Zentralschweiz und im Kanton Aargau. Detaillierte Messdaten 2001: Zentralschweizer Umweltschutzdirektionen in Zusammenarbeit mit dem Kanton Aargau.

In-Luft, 2003. Luftbelastung in der Zentralschweiz und im Kanton Aargau. Detaillierte Messdaten 2002: Zentralschweizer Umweltschutzdirektionen in Zusammenarbeit mit dem Kanton Aargau.

In-Luft, 2004. Luftbelastung in der Zentralschweiz und im Kanton Aargau. Detaillierte Messdaten 2003: Zentralschweizer Umweltschutzdirektionen in Zusammenarbeit mit dem Kanton Aargau.

In-Luft, 2005. Luftbelastung in der Zentralschweiz und im Kanton Aargau. Detaillierte Messdaten 2004: Zentralschweizer Umweltschutzdirektionen in Zusammenarbeit mit dem Kanton Aargau.

In-Luft, 2006. Luftbelastung in der Zentralschweiz und im Kanton Aargau. Detaillierte Messdaten 2005: Zentralschweizer Umweltschutzdirektionen in Zusammenarbeit mit dem Kanton Aargau.

Kanton Aargau, 1991. Massnahmenplan Luftreinhaltung. Baudepartement des Kantons Aargau.

Kanton Aargau, 2002. Massnahmenplan Luft des Kantons Aargau. Abteilung für Umwelt, Kanton Aargau.

puls, 1995. Wiederholungsuntersuchung mit Flechten, 6-Jahrestrend der Luftbelastung im westlichen Limmattal. Baudepartement des Kantons Aargau, Abteilung Umweltschutz. Bern.

puls, 2004a. Flechten und Luftqualität im westlichen Limmattal: Erfolgskontrolle 2003. Kanton Aargau, Baudepartement, Abteilung für Umwelt. Bern.

puls, 2004b. Flechten und Luftqualität im Kanton Zug: Erfolgskontrolle 2003. Kanton Zug, Amt für Umweltschutz. Bern.

puls, 2006. Räumlicher und zeitlicher Zusammenhang zwischen Flechtenvegetation und Stickstoffbelastung. Projektbericht zuhanden des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Abteilung Luftreinhaltung und NIS, Sektion Luftqualität. Bern.

UMWELT AARGAU, Sondernummer 1, Juni 1998. Luftreinhaltung - Immissionsmessungen im Kanton Aargau - Resultate 1997. Abteilung Umweltschutz, Kanton Aargau

UMWELT AARGAU, Sondernummer 5, März 1999. „Luftbelastung im Kanton Aargau - Immissionsmessbericht 1998“, Abteilung Umweltschutz, Kanton Aargau.

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

Scheidegger, C. & P. Clerc, 2002. Rote Liste der gefährdeten Arten der Schweiz: Baum- und erdbewohnende Flechten. Hrsg. BUWAL, Bern und WSL, Birmensdorf und CJBG, Genf. BUWAL-Reihe Vollzug Umwelt. 124 S.

FAL, IUL, FAT, Oktober 1996: Ammoniakemissionen Schweiz, Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Landwirtschaft im Rahmen der Bundesratsbeschlüsse.

Wirth, V., 1980. Flechtenflora. Unitaschenbücher UTB 1062. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

# 14. Anhang

## Anhang 1: Daten der Einzelbäume

Für sämtliche 177 in dieser Untersuchung erfassten Trägerbäume sind folgende Angaben enthalten:

- Obj. 06: Objektnummer = Nummer des Trägerbaumes 2006
- Obj. 89: Objektnummer = Nummer des Trägerbaumes 1989
- X: horizontale Koordinate der Schweizer Landeskarte
- Y: vertikale Koordinate der Schweizer Landeskarte
- Geo: Nummer des Georaumes, welchem der Trägerbaum angehört
- IAP 89: IAP18-Wert des Trägerbaumes im Jahr 1989
- IAP 06: IAP18-Wert des Trägerbaumes im Jahr 2006

Ba 06.: Baumart

Es bedeuten:

- 1: einheimische Linde
- 2: ausländische Linde
- 3: Esche
- 4: Eiche
- 5: Spitzahorn
- 6: ausländischer Ahorn
- 7: Bergahorn
- 8: Feldahorn
- 9: Silberahorn

1 – 49: Frequenzwerte der 49 untersuchten Flechtenarten: Die Arten 1 bis 49 zählen zum IAP18-Wert.

- 1: *Bryoria fuscescens*
- 2: *Evernia prunastri*
- 3: *Pseudevernia furfuracea*
- 4: *Ramalina farinacea*
- 5: *Ramalina fastigiata*
- 6: *Ramalina fraxinea*
- 7: *Ramalina pollinaria*
- 8: *Usnea* sp.

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









Obj. 06	Obj. 89	X	Y	Geo	IAP 89	IAP 06	Ba 06	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
669	669	648790	250230	72	58	48	4	.	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	8	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
844	844	648680	250840	72	15	22	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1029	670	648790	250370	72	.	46	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	5	.	.	.	.	.	.	.	
640	640	648510	248310	73	68	60	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
641	641	649070	248830	73	24	55	5	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	10	2	.	.	.	.	.	9	.	.	.	.	.	.	.	
642	642	649010	248830	73	61	43	5	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	9	.	.	.	.	.	.	.	
1034	638	648880	248650	73	.	46	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	
626	626	648660	247950	74	68	33	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
627	627	648470	247980	74	60	36	3	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
637	637	648860	247930	74	56	45	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1035	639	648260	248360	74	.	19	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
614	614	648360	247040	75	37	42	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	10	.	.	.	.	.	.	.	.
622	622	648740	247220	75	12	28	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	4	.	.	.	.	.	.	10	.	.	.	.	.	.	.	.
623	623	648420	247240	75	18	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1040	625	648390	247700	75	.	14	5	.	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
613	613	648330	247000	76	51	33	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1036	624	648040	247120	76	.	49	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1038	612	648050	247060	76	.	19	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1039	611	648870	246900	76	.	59	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
10	10	647820	246670	77	28	33	6	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
610	610	647820	246200	77	15	29	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
616	616	648580	246500	77	35	54	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	10	.	.	.	.	.	.	.
1037	615	648080	246730	77	.	17	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1047	609	647620	246750	77	.	31	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
602	602	646880	246780	78	43	64	3	.	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	5	.	.	.	6	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
604	604	646940	246780	78	62	51	3	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	2	10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
605	605	647040	246680	78	52	54	3	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2
606	606	647000	246800	78	60	58	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1045	603	646740	246750	78	.	36	3	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1046	601	646730	246640	78	.	46	3	.	4	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1048	832	649020	247260	79	.	49	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	9	.	.	.	.	.	.	.	.
1049	829	649010	247520	79	.	30	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1050	831	649350	247960	79	.	34	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1059	830	648920	247370	79	.	35	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
617	617	648960	246650	80	14	38	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	8	.	.	.	.	.	.	.	.
619	619	648840	246630	80	22	21	9	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	6	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.
1041	618	649120	246770	80	.	45	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	3	.	.	.	.	.	.	.





Obj.	06	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
1042	4	8	1	.	.	.	.	10	.	2	.	.	.	.	1	2	.	.	.	.	.	.	.	.
621	2	5	1	.	.	.	.	10	.	9	.	.	.	.	.	9	.	.	2	5	.	8	.	.
833	3	10	.	.	.	.	.	10	.	8	.	1	.	.	.	4	.	.	2	.	.	5	.	.
1043	4	5	3	.	.	.	.	10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
1044	9	9	.	.	.	.	.	10	.	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	5
734	6	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1057	.	2	.	.	.	.	.	1	.	4	.	.	.	.	.	.	.	5	1	.	.	.	.	3
1065	.	8	.	.	.	.	.	10	.	6	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1066	5	4	2	.	.	.	.	10	.	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1067	10	7	.	.	.	.	.	10	.	10	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.
729	5	7	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	10
730	10	8	.	.	.	.	.	5	.	1	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	9
731	10	10	10	.	.	.	.	10	.	1	.	.	.	.	.	.	.	4	.	.	.	3	10	10
732	.	.	.	.	.	.	.	.	.	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	3	10	10
1063	.	.	.	.	.	.	.	6	.	9	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
728	10	10	9	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	3	.	.	10	.	10
736	5	5	.	.	.	.	.	5	.	10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	10	.	10
839	10	10	5	.	.	.	.	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	10	.	10
1068	10	10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	3	.	6	.	8
1070	10	10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	7	.	4	.	10
738	10	5	.	.	.	.	.	.	.	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	7	.	10
836	8	9	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	10
841	8	10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	3	.	10
1069	10	10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	10
1071	10	7	.	.	.	.	.	10	.	2	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.
695	9	10	.	.	.	.	.	1	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.
698	1	10	.	.	.	.	.	10	.	2	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
1010	3	9	.	.	.	.	.	10	.	10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.
1011	7	10	.	.	.	.	.	6	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
843	9	10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	4
1030	1	.	.	.	.	.	.	6	.	9	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	5	.	.	6
1072	8	10	.	.	.	.	.	8	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	4	.	7
1073	4	9	1	.	.	.	.	10	.	10	.	.	.	.	.	10	.	.	.	.	.	1	.	.
1051	2	5	.	.	.	.	.	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.
1052	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	2	.	10
1053	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1054	2	4	1	.	.	.	.	2	10	.	.	.	.	.	.	10	.	.	2	2	.	.	.	.





## Anhang 2: Daten der Georäume

In den folgenden Tabellen werden Mittelwerte pro Georaum (geographisch einheitliche Räume mit durchschnittlich fünf Trägerbäumen) aufgeführt:

Geo:	Nummer des Georaumes
X 89:	Mittelwert der horizontalen Koordinaten (Schweizer Landeskarte) der Trägerbäume von 1989
Y 89:	Mittelwert der vertikalen Koordinaten der Trägerbäume von 1989
IAP 89:	IAP18-Mittelwert im Jahr 1989
Ac 89:	Acidindex-Mittelwert 1989 (positive Werte stehen für saure Immissionen, negative Werte für basische)
Ni 89:	Nitroindex-Mittelwert 1989 (positive Werte stehen für nitrophile, Immissionen, negative Werte für anitrophile)
X 06:	Mittelwert der horizontalen Koordinaten der Trägerbäume von 2006
Y 06:	Mittelwert der vertikalen Koordinaten der Trägerbäume von 2006
IAP 06:	IAP18-Mittelwert im Jahr 2006
Ac 06:	Acidindex-Mittelwert 2006
Ni 06:	Nitroindex-Mittelwert 2006
X 89/06:	Mittelwert der horizontalen Koordinaten der Trägerbäume von 1989 und 2006
Y 89/06:	Mittelwert der vertikalen Koordinaten der Trägerbäume von 1989 und 2006
IAP Diff 89/06:	Differenz zwischen dem IAP18-Mittelwert von 1989 und dem IAP-Mittelwert von 2006
Ac Diff 89/06:	Differenz zwischen Acidindex 1989 und 2006
Ni Diff 89/06:	Differenz zwischen Nitroindex 1989 und 2006

GEO	X 89	Y 89	IAP 89	Ac 89	Ni 89	X 06	Y 06	IAP 06	Ac 06	Ni 06	X 89/06	Y 89/06	IAP Diff	Ac Diff	Ni Diff
57	644950	248646	51.8	7.3	-1.6	644962	248642	42.4	-10.7	14.8	644956	248644	-9.4	-18.0	16.4
58	644712	249124	58.2	14.6	-7.4	644701	249124	51.8	-0.3	1.0	644707	249124	-6.4	-14.9	8.4
59	645016	249646	43.6	17.2	-10.4	645058	249666	32.2	2.6	3.4	645037	249656	-11.4	-14.6	13.8
60	645665	248690	40.0	11.3	-10.5	645601	248687	51.0	-4.3	10.3	645633	248688	11.0	-15.7	20.8
61	645870	249316	12.0	1.6	1.0	645817	249269	7.2	-4.6	6.4	645844	249293	-4.8	-6.2	5.4
62	645918	250124	44.4	12.5	-6.6	645888	250100	41.8	2.3	5.0	645903	250112	-2.6	-10.2	11.6
63	645913	248055	42.0	8.8	-6.8	645930	248123	31.3	-2.5	3.5	645921	248089	-10.8	-11.3	10.3
64	646712	248618	44.0	15.9	-11.6	646672	248652	35.4	4.8	-1.6	646692	248635	-8.6	-11.1	10.0
65	646558	249310	14.4	8.2	-7.4	646618	249338	12.6	-6.4	8.8	646588	249324	-1.8	-14.6	16.2
66	646682	249818	49.6	10.1	-7.0	646638	249814	36.6	0.3	3.8	646660	249816	-13.0	-9.8	10.8
67	647338	250260	38.3	1.8	5.0	647315	250365	38.8	-11.3	15.3	647326	250313	0.5	-13.0	10.3
68	647282	248180	38.0	14.5	-10.2	647290	248174	38.8	4.2	2.8	647286	248177	0.8	-10.3	13.0
69	647922	248952	44.0	0.3	6.4	647928	248958	25.0	-8.0	11.6	647925	248955	-19.0	-8.3	5.2
70	648560	249346	52.4	17.4	-9.4	648542	249334	39.4	-0.9	8.0	648551	249340	-13.0	-18.3	17.4
71	648373	250055	34.3	8.0	1.0	648360	250108	29.5	-5.1	8.8	648366	250081	-4.8	-13.1	7.8
72	648800	250513	26.0	3.9	0.5	648815	250510	30.5	-2.4	7.0	648808	250511	4.5	-6.3	6.5
73	648750	248655	51.3	10.4	-2.5	648868	248655	51.0	-7.0	14.0	648809	248655	-0.3	-17.4	16.5
74	648578	248038	55.3	-1.1	8.8	648563	248055	33.3	-4.4	7.8	648570	248046	-22.0	-3.3	-1.0
75	648455	247255	21.5	3.9	-2.3	648478	247300	21.3	-1.1	3.8	648466	247278	-0.3	-5.0	6.0
76	648063	247043	55.0	7.9	0.8	648323	247020	40.0	-10.3	17.0	648193	247031	-15.0	-18.1	16.3
77	647994	246534	32.2	-1.2	5.8	647984	246570	32.8	-18.6	24.6	647989	246552	0.6	-17.4	18.8
78	646922	246730	54.3	6.8	-5.0	646888	246738	51.5	0.8	1.8	646905	246734	-2.8	-5.9	6.8
79	649268	247518	53.0	4.4	2.0	649075	247528	37.0	-21.4	26.5	649171	247523	-16.0	-25.8	24.5
80	649030	246670	37.8	1.6	2.8	648943	246725	35.8	-7.3	13.5	648986	246698	-2.0	-8.9	10.8
81	649395	246305	39.5	-3.5	9.5	649428	246270	42.8	-14.0	18.5	649411	246288	3.3	-10.5	9.0
82	646354	250992	49.8	14.1	-7.0	646344	251066	32.4	-4.4	9.0	646349	251029	-17.4	-18.5	16.0
83	645788	251704	47.0	5.7	0.2	645808	251734	36.8	-3.0	7.4	645798	251719	-10.2	-8.7	7.2
84	647608	251644	69.4	7.1	-1.0	647680	251672	64.6	4.6	-0.6	647644	251658	-4.8	-2.5	0.4
85	648438	251902	62.4	10.2	-5.0	648506	251898	48.2	4.7	0.6	648472	251900	-14.2	-5.5	5.6
86	646255	247740	47.0	15.1	-7.3	646320	247758	44.8	4.9	4.3	646288	247749	-2.3	-10.3	11.5
87	648910	251305	47.0	1.0	5.8	648795	251363	47.0	-3.5	10.3	648853	251334	0.0	-4.5	4.5
90	649720	248632	42.6	3.8	0.0	649587	248690	29.8	-7.6	10.2	649654	248661	-12.8	-11.4	10.2
108	647708	249788	20.0	-6.4	11.0	647688	249790	27.8	-11.1	16.0	647698	249789	7.8	-4.8	5.0
110						646564	252248	32.6	-7.3	12.0					
111						645812	252384	36.6	-6.0	12.6					
112						646522	253404	39.4	-4.1	10.8					
113						645856	253858	51.4	7.7	-2.2					
114						647138	254013	58.3	-3.4	10.8					