



# **Flechten und Luftqualität in Baden: Erfolgskontrolle 2014**

im Auftrag des Kantons Aargau, Baudepartement, Abteilung für Umwelt  
und der Stadtökologie Baden

6. März 2015

## **Umweltberatung**

Dr. Martin Urech  
Mühlemattstrasse 45  
CH-3007 Bern  
Tel. +41 (0)31 372 20 28  
[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, 1995, 2003 und 2014.....	9
6. Differenzkarten 1989-2014 und 2003-2014.....	14
7. Acidoindex.....	16
8. Nitroindex .....	21
9. Emissions- und Immissionsdaten.....	26
10. Schlussfolgerungen.....	33
11. Glossar .....	36
12. Literatur .....	38
13. Anhang.....	53

Projektbearbeitung:

Dr. Martin Urech

Nora Rychen

Pascale Affolter



# 1. Zusammenfassung

Die Flechtenindikationsmethode wird im Kanton Aargau als Instrument der Erfolgskontrolle der vorgenommenen Luftreinemassnahmen und deren Auswirkungen eingesetzt. Im westlichen Limmattal wurde 1989 die Luftqualität erstmals mit dieser biologischen Methode erfasst, 1995 erfolgte die zweite Untersuchung (erste Erfolgskontrolle) und 2003 die dritte Untersuchung (zweite Erfolgskontrolle).

Es ist vorgesehen, eine erneute Wiederholungsuntersuchung in diesem Gebiet vorzunehmen. Da im Raum Baden für 2015 grössere Bauvorhaben geplant sind (Projekte Brückenkopf Ost, Schulhausplatz und Schadenmühle), wurde die Untersuchung dieses Gebietes bereits 2014 durchgeführt: Die heutige Luftbelastung wurde erfasst und die Entwicklung, bezogen auf die Kernzone Baden, der letzten 25 Jahre aufgezeigt.

## **Flechten als Zeiger der Luftbelastung**

Flechten bilden eher unscheinbare, krusten-, blatt- oder strauchförmige Polster auf Baumrinden, Steinen und dem Boden. 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 städtischen Zentrum von Baden wurde eine kritische Luftbelastung (rote Zone) festgestellt (Abb. 2). Die orange Zone der starken Gesamtbelastung erfasst die restliche Fläche mit Ausnahme von Baden Allmend und einer kleinen Fläche nördlich von Wettingen, welche in der gelben Zone liegen.

## **Luftgüte 1995**

Eine kritische Gesamtbelastung (rote Zone) wurde wiederum im Zentrum von Baden gefunden (Abb. 3). Im Gegensatz zu 1989 zieht sich diese etwas weiter in Richtung Wettingen. Die starke Gesamtbelastung (orange Zone) um-

schliesst die rote Zone. Wiederum in der mittleren Gesamtbelastung (gelbe Zone) liegen die Flächen Baden Allmend und Reb- und Waldflächen nördlich von Wettingen.

### **Luftgüte 2003**

Die rote Zone mit der kritischen Gesamtbelastung ist 2003 zugunsten der orangen Zone (starke Gesamtbelastung) ganz aus dem Untersuchungsgebiet verschwunden (Abb.4). Deutlich zugenommen hat die gelbe Zone (mittlere Gesamtbelastung). Diese erstreckt sich nun im westlichen Untersuchungsgebiet von Baden Allmend über Meierhof bis Baregg. Im östlichen Untersuchungsgebiet reicht die gelbe Zone von Wettingen bis Ennetbaden. Auch eine kleine Fläche im südöstlichen Untersuchungsgebiet (Wettingen) zählt neu zur gelben Zone.

### **Luftgüte 2014**

Die orange Zone mit der starken Gesamtbelastung ist 2014 deutlich zurückgegangen (Abb 5). Sie bedeckt hauptsächlich noch das Zentrum von Baden und westliche Teile von Ennetbaden. Dominant ist die mittlere Gesamtbelastung (gelbe Zone) welche die orange Zone U-förmig umschliesst.

### **Differenzkarte 1989 bis 2014**

Die Differenzkarte visualisiert die räumlichen Veränderungen der Luftbelastung zwischen den Untersuchungsjahren. In den letzten 25 Jahren hat sich die Luftbelastung im Untersuchungsgebiet Baden flächendeckend verbessert. Eine starke Verbesserung findet sich im nördlichen Stadtteil von Baden.

### **Differenzkarte 2003 bis 2014**

Diese Differenzkarte zeigt, dass sich in den letzten elf Jahren die Luftbelastung in Wettingen verbessert hat (Abb. 9). Keine wesentliche Veränderung zeigt das restliche Gebiet, nämlich das Zentrum von Baden inkl. Teile von Ennetbaden, Baden Allmend, Meierhof und Brunnmatt.

### **Acidoindex**

Der Acidoindex zeigt, dass die Immissionen in den letzten 25 Jahren im ganzen Untersuchungsgebiet basischer geworden sind, die Anteile an sauren Immissionen also abgenommen haben (Abb. 10 bis 13). Diese Veränderung des Acidoindex ist gleichläufig mit dem Anstieg des pH-Wertes im Regen.

### **Nitroindex**

Von 1989 bis 2014 ist die Stickstoffbelastung im Raum Baden stark gestiegen (Abb. 17 bis 20). Die erhöhten Stickstoffdepositionen zeigen sich in einer Verschiebung des Artenspektrums zugunsten nitrophiler Arten.

### **Vergleich mit Emissions- und Immissionsdaten**

Die Emissionen verschiedener wichtiger Schadstoffe sind im Kanton Aargau in den letzten Jahren zurückgegangen. Diese Emissionsreduktionen widerspiegeln sich in der Verbesserung der Luftqualität, wie sie die Flechtenuntersuchungen nachweisen.

Auch die kontinuierlichen Immissionsmessungen weisen diese Verbesserungen nach: Die Belastungen durch verschiedene gemessene Einzelschadstoffe haben insgesamt abgenommen, stagnieren aber in den letzten paar Jahren. Zudem übersteigt der mit Passivsammlern gemessene Schadstoff  $\text{NO}_2$  am Schulhausplatz und an der Brugger-Haselstrasse immer noch den LRV-Grenzwert. An der Messstation Schönaustrasse liegen die Ozon-Werte seit Messbeginn über dem Luftreinhalte-Grenzwert und die  $\text{PM}_{10}$ -Werte bewegen sich im Grenzwertbereich.

### **Schlussfolgerungen**

Die positive Entwicklung der Luftqualität im Raum Baden, wie sie die Flechtenuntersuchungen aufzeigen, ist als direkte Folge der lufthygienischen Sanierungsmassnahmen inklusive dem Wegfall einzelner Grossemittenten interpretierbar.

Trotz der wesentlichen Reduktion der Belastung in den letzten 25 Jahren weist der Raum Baden–Wettingen immer noch eine mittlere bis starke Gesamtbelastung auf. Das Ziel der Luftreinhalteverordnung, die Luftbelastung auf ein verträgliches Mass für Mensch, Tier und Pflanze zu senken, ist somit auf gutem Wege, aber noch nicht erreicht. Diese Zielsetzung auf die Flechtenuntersuchungen umgesetzt, könnte heissen, dass die heute noch vorhandene starke Gesamtbelastung weiter abnimmt und sich der Anteil der mittleren Gesamtbelastung zugunsten der geringen Gesamtbelastung verschiebt.

Die erzielten Ergebnisse sind geeignet für die Information der Behörden und der Öffentlichkeit über den Erfolg der bisherigen Luftreinhaltepolitik und die Notwendigkeit weiterer Massnahmen. Zur systematischen Überwachung der Luftqualität bietet sich baldmöglichst eine Flechtenerhebung des übrigen westlichen Limmattals an. Die Wirkung der bisherigen Luftreinhaltepolitik und eventuell weitere zu treffende Massnahmen liessen sich so besser beurteilen.

## 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 mit fast kahler Rinde.

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

### **Bisherige Untersuchungen**

Der Kanton Aargau hat eine langjährige Erfahrung mit Flechten als Bioindikatoren zur Beurteilung der Luftbelastung im Kanton.

1989 wurden die ersten Flechtenuntersuchungen in den Regionen Aarau, Rheinfelden und im westlichen Limmattal durchgeführt (AGB 1990).

Als erste Erfolgskontrolle im Kanton Aargau ist die Untersuchung im westlichen Limmattal im Jahr 1995 wiederholt worden (puls 1995).

2003 erfolgte die zweite Erfolgskontrolle für das Untersuchungsgebiet westliches Limmattal (puls 2004). Nun ist vorgesehen, im westlichen Limmattal eine weitere Erfolgskontrolle durchzuführen.

### **Untersuchung 2014: dritte Erfolgskontrolle im Raum Baden**

In Baden werden im Jahr 2015 die grossen Bauprojekte Brückenkopf Ost, Schulhausplatz und Schadenmühle gestartet. Da die erneute Wiederholung der Flechtenuntersuchung vor Baubeginn erfolgen sollte, wurden die Flechtenerhebungen für den Raum Baden bereits 2014 vorgenommen. Der vorliegende Bericht beinhaltet diese Untersuchung und zeigt die Entwicklung der Luftbelastung seit 1989 räumlich und zeitlich für den Raum Baden auf.

Das untersuchte Gebiet Baden beinhaltet 6.76 km<sup>2</sup> und reicht von den Rebbergen im nördlichen Wettingen (Grafequet) bis Guggelori in Ennetbaden weiter bis Rieden in Obersiggenthal und von dort zum Martinsberg nach Baden Allmend (ohne Münzlishausen). Von Baden Allmend führt die Grenze weiter in südlicher Richtung nach Meierhof bis kurz vor das westliche Tunnelportal Baregg. Von dort führt die Grenze Richtung Osten nach Friedhof Liebefels, Bahnhof Wettingen bis zur Tödistrasse, um von dort in nördlicher Richtung beim Grafequet den Untersuchungsperimeter wieder zu schliessen.

Die Erhebung 2014 und die Analyse sind nach derselben Methode wie die Untersuchungen von 1989, 1995 und 2003 erfolgt, wodurch die Resultate direkt vergleichbar werden.

### **Bisherige Massnahmen**

1991 erstellte der Kanton Aargau den ersten Massnahmenplan zur Luftreinhaltung (Kanton Aargau 1991). Die dadurch ausgelösten Massnahmen führten zu Verbesserungen der Luftqualität. Diese Verbesserungen wurden auch durch die genannten Flechtenuntersuchungen nachgewiesen. Da noch nicht alle Grenzwerte der eidgenössischen Luftreinhalteverordnung eingehalten wurden, erstellte der Kanton im Jahr 2002 einen weiteren Massnahmenplan Luft (Kanton Aargau 2002). Darin wurde beschlossen, die Emissionswerte der Schadstoffe NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> und PM10 weiter zu reduzieren (Kanton Aargau 2002). Dieser Massnahmeplan wurde 2009 ergänzt. Zusätzliches Ziel ist es, den Schadstoffausstoss von Ammoniak (NH<sub>3</sub>) um 45% zu reduzieren (Kanton Aargau 2009).

### **Erfolgskontrolle**

Wiederholungsuntersuchungen mit Flechten sind ein Instrument der Erfolgskontrolle von lufthygienischen Massnahmen, wie sie die genannten Massnahmenpläne vorsehen. Durch die Flechtenmethode können die Auswirkungen der Massnahmen auf die Luftqualität anschaulich und flächendeckend dargestellt werden. Wiederholte Flechtenuntersuchungen erlauben eine langfristige Wirkungskontrolle.

## 3. Ziele

Die Flechtenindikationsmethode wird im Kanton Aargau als Instrument der Erfolgskontrolle der vorgenommenen Luftreinemassnahmen und deren Auswirkungen eingesetzt. Folgende Teilziele sollen die Wirkung der durchgeführten lufthygienischen Massnahmen in Baden aufzeigen:

- a) Die Flechtenkartierungen von 1989, 1995 und 2003 sollen für den Raum Baden wiederholt werden, die Daten analog zu den früheren Untersuchungen erhoben und ausgewertet werden.
- b) Diese Untersuchung soll die heutige lufthygienische Gesamtbelastung in Baden charakterisieren.
- c) Anhand des Vergleichs mit den Erhebungen von 1989, 1995 und 2003 soll die Entwicklung der Luftqualität in den letzten 25 Jahren erfasst und interpretiert werden. Diese Entwicklung soll in Differenzkarten dargestellt werden.
- d) Der Vergleich zwischen Flechtenkarten und kontinuierlichen Emissions- und Immissionsdaten soll zur Interpretation der biologischen Ergebnisse beitragen.
- e) Durch die Auswertung der vorkommenden Flechtenarten sollen Aussagen über den Säuregrad (AcidoindeX) und den Stickstoffgehalt (Nitroindex) der Immissionen und deren Veränderungen gewonnen werden.
- f) Die Untersuchungsergebnisse sollen so dokumentiert werden, dass eine Erweiterung des 2014 untersuchten Gebietes Baden auf das gesamte westliche Limmattal problemlos möglich ist.
- g) 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.

## 4. Methode

### Kalibrierte Flechtenindikationsmethode

Die Flechten-Bioindikation bildete Teil des Nationalen Forschungsprogramms 14, Lufthaushalt und Luftverschmutzung in der Schweiz<sup>4</sup>: 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 sogenannten 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 Aufnahme- fläche 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 Aufnahme- fläche 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 Aufnahme- fläche ist also umso grösser, je dicker der Trägerbaum ist. Das Frequenzgitter unterteilt die Aufnahme- fläche in 10 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.

\* Bei der Entwicklung wurden 20 Versionen getestet (IAP01 bis IAP20). Die Version IAP18 hat die grösste Übereinstimmung mit den technischen Messungen gezeigt.

Abb. 1:  
Trägerbaum mit  
Frequenzgitter



Der IAP18-Wert eines Trägerbaumes ist die Summe der Frequenzen aller berücksichtigten Flechtenarten. Dieser Flechtenwert charakterisiert die Luftgüte aufgrund der Häufigkeit von 49 verschiedenen Flechtenarten und –artengruppen in der Aufnahme­fläche an den untersuchten Bäu­men. Einige wenige Flechtenarten stören die IAP-Aussage und werden für die Berechnung des IAP18-Wertes grundsätzlich ausgeschlossen.

#### Flechtenuntersuchung 2014

Die Flechtenuntersuchung 2014 wurde analog zu den Erhebungen von 1989, 1995 und 2003 durchgeführt. Das Gebiet umfasst eine Fläche von 6.76 km<sup>2</sup>. Davon sind rund 2 km<sup>2</sup> randliche Waldgebiete, welche zwar durch die Luftgütekarte abgedeckt sind, in denen aber keine Flechtenerhebungen vorgenommen wurden. Die Flechtenuntersuchung erfolgte im Herbst 2014.

Im Untersuchungsgebiet wurde möglichst an den gleichen Bäumen mit der identischen Methode der Flechtenluftgütwert IAP18 bestimmt.

Pro km<sup>2</sup>-Rasterflächen des Landeskartenkoordinatennetzes wurden jeweils sechs Trägerbäume zur Analyse der baumbewohnenden Flechtenvegetation ausgewählt. 2014 wurden insgesamt 42 Bäume kartiert. 25 Bäume (60%) mussten ersetzt werden, da sie entweder gefällt wurden (15 Bäume) oder sich nicht mehr für die Methode eigneten, da der Stamm vermoost oder mit Efeu oder Sträuchern zugewachsen ist. Seit 1989 wurden 33 Bäume ersetzt, das entspricht 79 Prozent aller Bäume. Die Daten der einzelnen Bäume befinden sich im Anhang.

Die Flechtenwerte der einzelnen Bäume wurden in Gruppen von 5 bis 6 Bäumen zu einem Mittelwert verrechnet. Diese Baumgruppen stehen in geographisch einheitlichen Räumen, sogenannten **Georäumen**.

Das untersuchte Gebiet umfasst acht Georäume. Aus einem angrenzenden weiteren Georaum ist noch ein zusätzlicher Baum kartiert worden, welcher nicht in die Auswertung der Georäume fließt. Es wird davon ausgegangen, dass die Flechten innerhalb eines Georaumes einer vergleichbaren Gesamtluftbelastung ausgesetzt sind.

## 5. Flechtenkarten 1989, 1995, 2003 und 2014

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 metergenaue 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.

### **Luftgütekarte 1989**

Die Abbildung 2 zeigt die Luftgütekarte von 1989 für den Raum Baden.

Die rote Zone der kritischen Luftbelastung war im Zentrum von Baden und nördlich davon dominant.

Die orange Zone der starken Gesamtbelastung erstreckte sich von Ennetbaden nach Wettingen bis nach Meierhof und umgab die rote Zone.

Nur westlich von Baden (Baden Allmend) und in einer kleinen Fläche nördlich von Wettingen, fanden sich gelbe Zonen mit geringer Gesamtbelastung.

### **Luftgütekarte 1995**

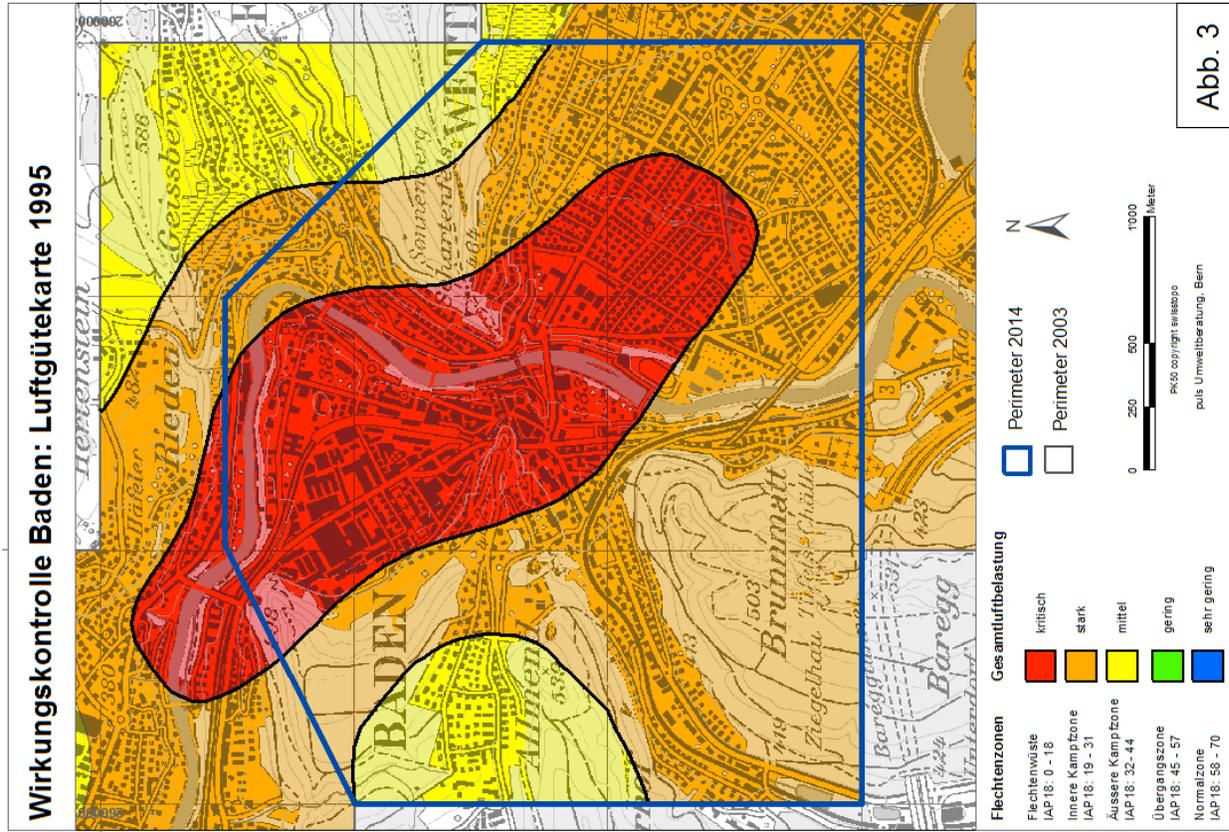
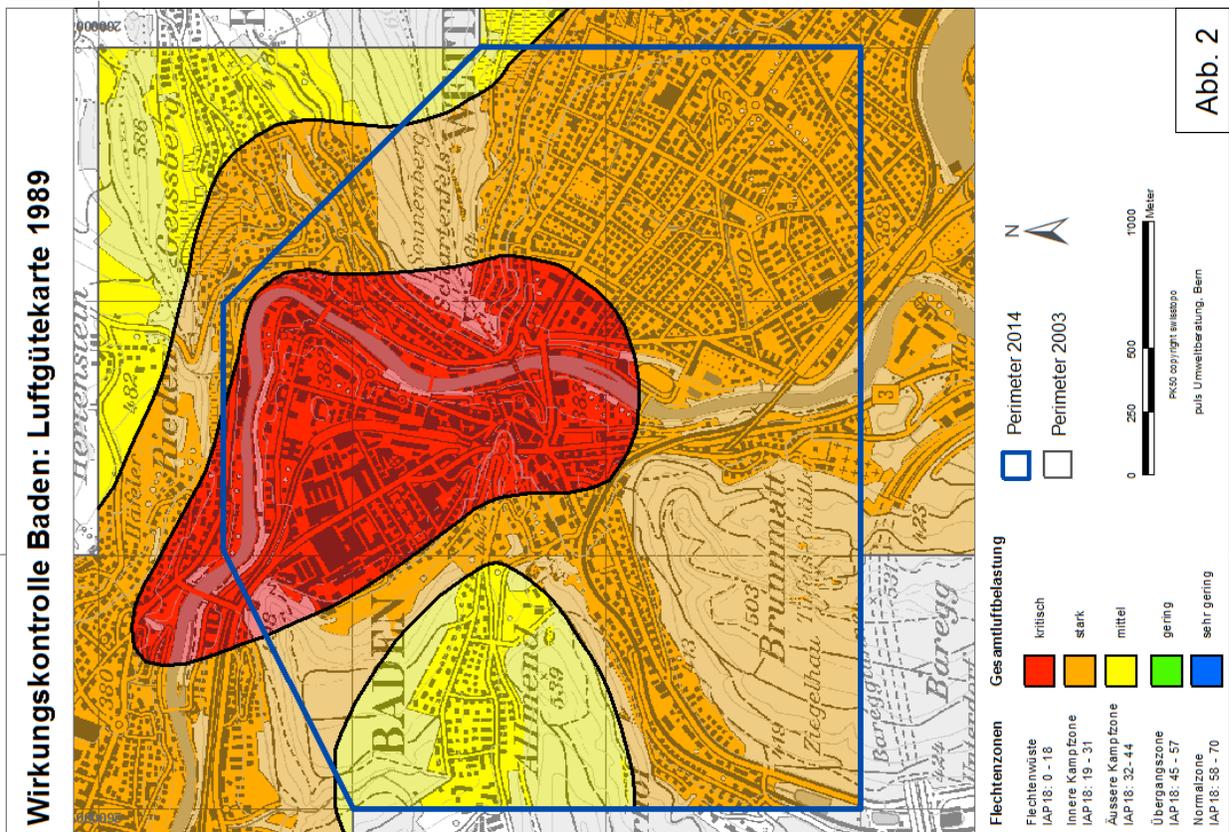
In der Abbildung 3 sieht man die Luftgütekarte von 1995 für den Raum Baden.

Der Flächenanteil mit kritischer Gesamtbelastung (rote Zone) hatte sich gegenüber 1989 in Richtung Wettingen etwas vergrößert.

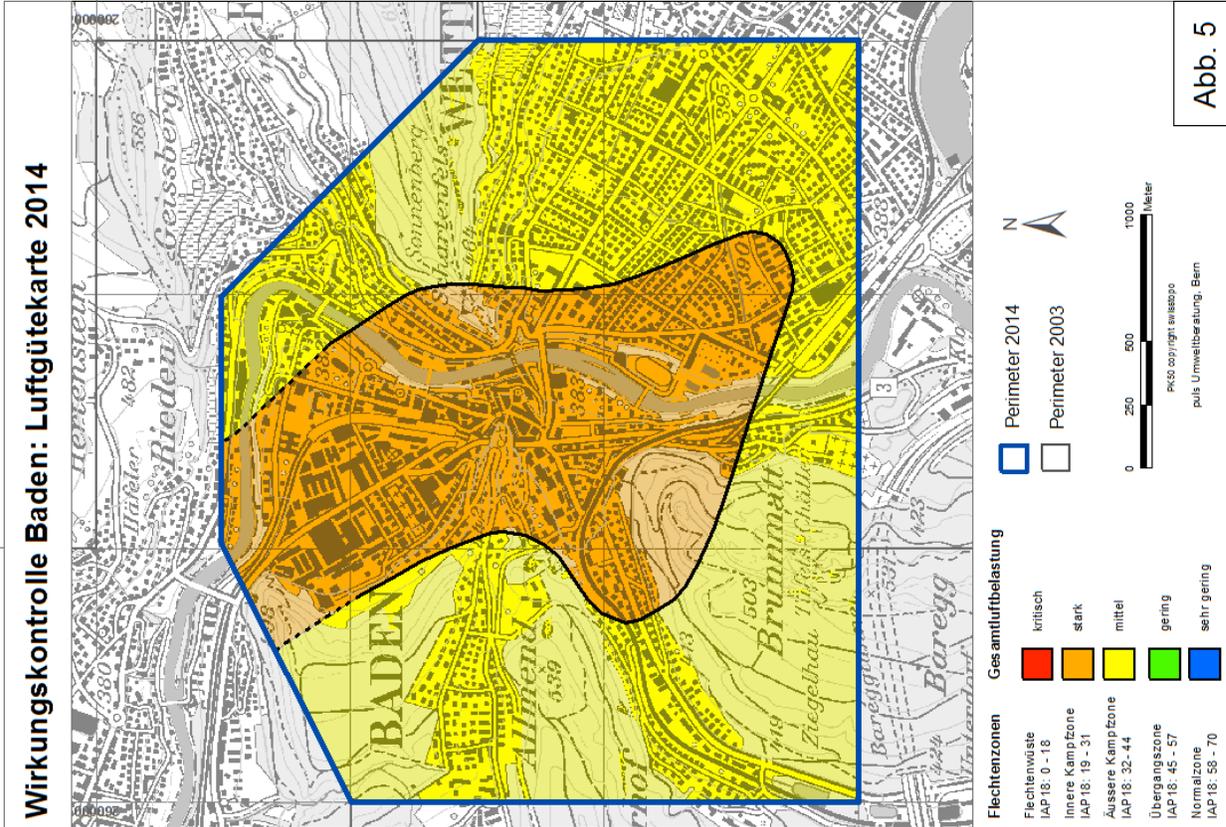
Die orange Zone der starken Gesamtbelastung zeigte ein ähnliches Bild wie 1989: Sie reichte von Ennetbaden nach Wettingen bis Meierhof. Aufgrund der Zunahme der roten Zone in Wettingen wurde hier die orange Fläche entsprechend kleiner.

Wie in der Luftgütekarte von 1989 fanden sich wiederum zwei gelbe Zonen mit geringer Gesamtbelastung, und zwar in Baden Allmend und nördlich von Wettingen. In Baden Allmend jedoch, hatte sich die Fläche im Osten etwas verringert, dafür war die Fläche in Wettingen gewachsen und grenzt bis ins nördlich gelegene Ennetbaden.

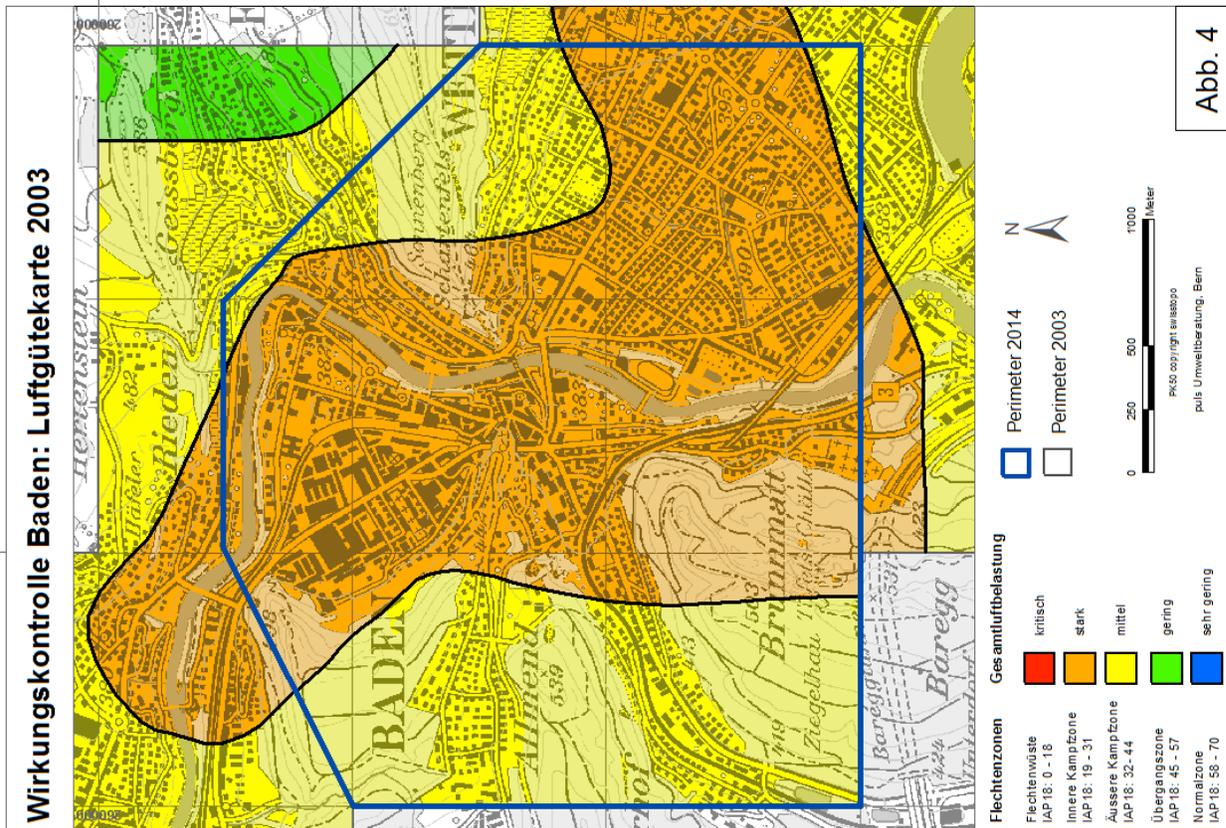
\* Bei der Entwicklung wurden 20 Versionen getestet (IAP01 bis IAP20). Die Version IAP18 hat die grösste Übereinstimmung mit den technischen Messungen gezeigt.



Wirkungskontrolle Baden: Luftgütekarte 2014



Wirkungskontrolle Baden: Luftgütekarte 2003



### **Luftgütekarte 2003**

Die Luftgütekarte 2003 (Abb. 4) hat sich gegenüber den früheren Jahren wesentlich verändert. Die rote Zone mit der kritischen Gesamtbelastung ist aus dem Untersuchungsgebiet Baden ganz verschwunden.

Die orange Zone mit der starken Luftbelastung hat seit der letzten Untersuchung leicht zugenommen. Sie tritt an die Stelle der ehemals roten Zone mit kritischer Gesamtluftbelastung im städtischen Gebiet von Baden und erstreckt sich weiter vom östlichen Meierhof nach Brunnmatt und Wettingen.

Die gelbe Zone der mittleren Luftbelastung hat sich verdreifacht. Sie reicht im Westen von Baden Allmend über Meierhof bis nach Brunnmatt und im Osten von Ennetbaden über den Scharfenfels bis zur Sport- und Spielanlage Scharfen in Wettingen.

### **Luftgütekarte 2014**

In der 2014 erstellten Luftgütekarte für den Raum Baden (Abb. 5) hat sich die Gesamtluftbelastung weiter verbessert. Die orange Zone (starke Gesamtluftbelastung) ist zugunsten der gelben Zone (mittlere Gesamtluftbelastung) um etwa die Hälfte geschrumpft.

Das Gebiet mit starker Gesamtluftbelastung (orange Zone) ist nach wie vor im städtisch geprägten Teil der Untersuchungsfläche zu finden. Dieses erstreckt sich von Baden Nord nach Baden Zentrum und vom östlichen Meierhof bis nach Wettingen zur Sportanlage Alteburg.

Mit zwei Drittel Flächenanteil dominiert die gelbe Zone (mittlere Gesamtluftbelastung) das Untersuchungsgebiet. Sie umschließt die orange Zone und reicht von Ennetbaden, Wettingen, Brunnmatt, Meierhof bis nach Baden Allmend.

### **Flächenanteile der einzelnen Zonen**

Die Flächenanteile der einzelnen Zonen sind in Abbildung 6 tabellarisch und in Abbildung 7 grafisch dargestellt.

Es fällt auf, dass im Raum Baden seit 1995 eine stetige aber insgesamt nur geringe Entlastung der Luft von Schadstoffen stattgefunden hat. Die Zone mit kritischer Belastung (rote Zone) ist nach 1995 ganz verschwunden und die Zone mit mittlerer Belastung (gelbe Zone) hat deutlich zugenommen.

Gesamtbelastung	Fläche 1989		Fläche 1995		Fläche 2003		Fläche 2014	
	km <sup>2</sup>	%						
kritisch	1.7	25	2.10	31	-	-	-	-
stark	4.19	62	3.90	58	4.27	63	2.29	34
mittel	0.87	13	0.76	11	2.49	37	4.47	66
gering	-	-	-	-	-	-	-	-
sehr gering	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	6.76	100	6.76	100	6.76	100	6.76	100

Abb. 6:  
Absolute und relative  
Flächenanteile der  
Belastungszonen im  
Untersuchungsgebiet  
Baden.

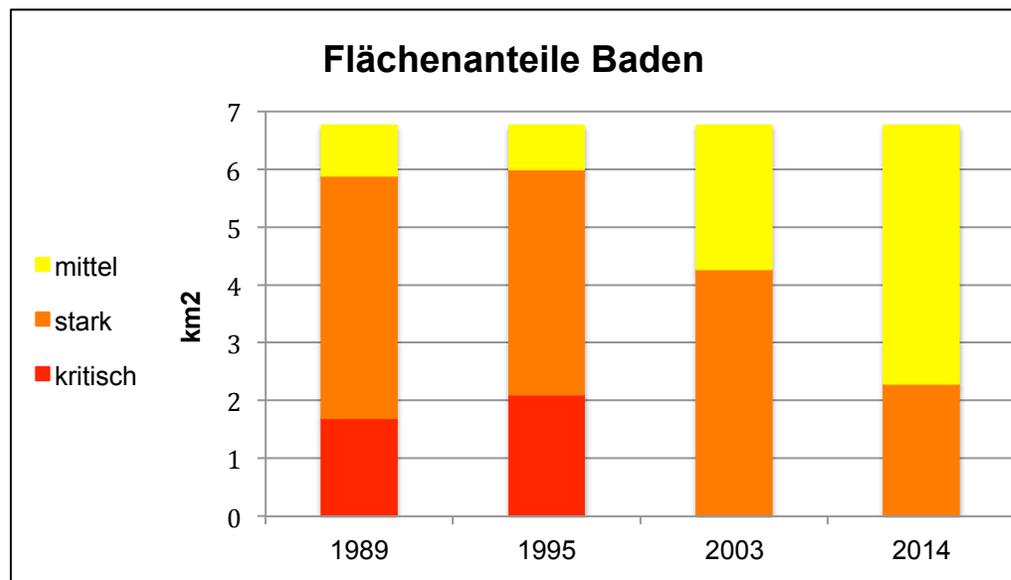


Abb. 7:  
Entwicklung der  
Flächenanteile der  
einzelnen Zonen.

## 6. Differenzkarten 1989-2014 und 2003-2014

Differenzkarten visualisieren die räumlichen Veränderungen der Luftbelastung zwischen den einzelnen Untersuchungsjahren (Abb. 8 und 9). 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 Georaum von den neuen subtrahiert. Verschlechterungen der Luftqualität manifestieren sich durch negative Differenzen, Verbesserungen durch positive.

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.

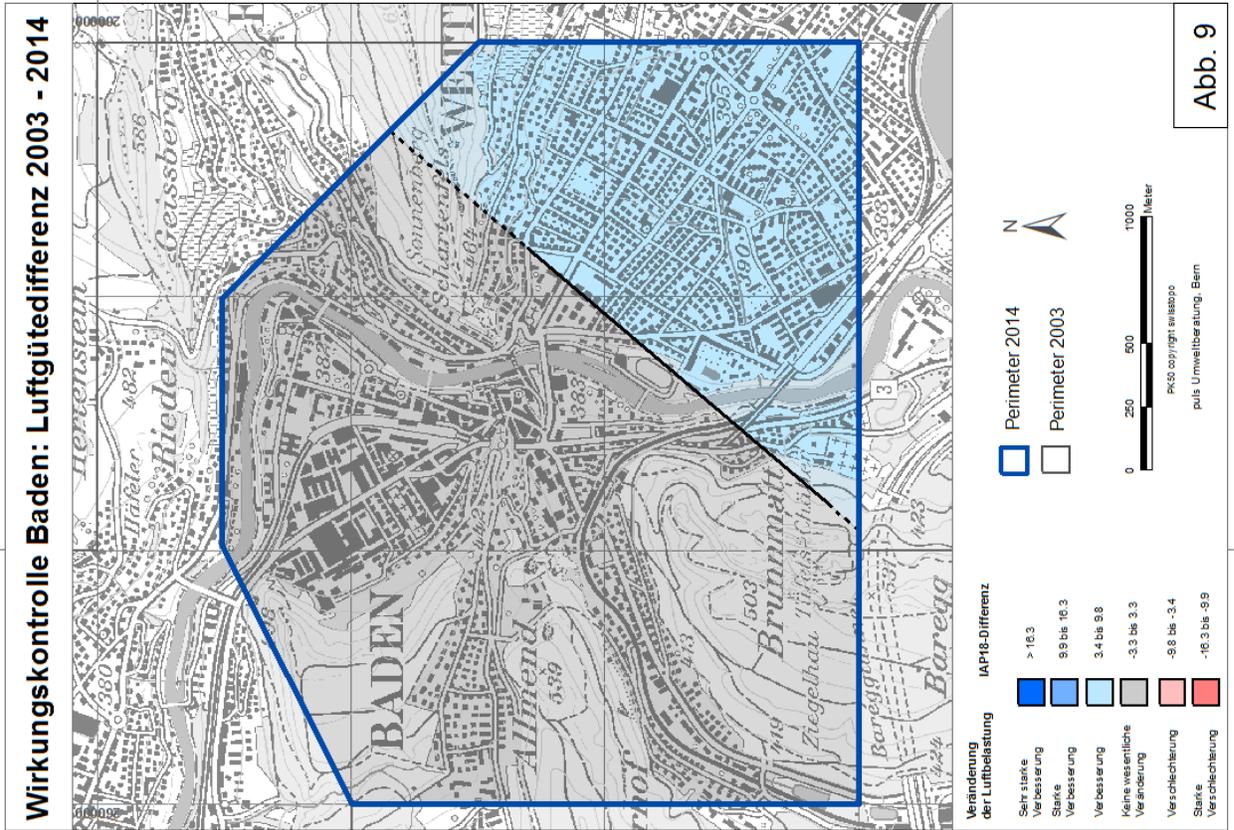
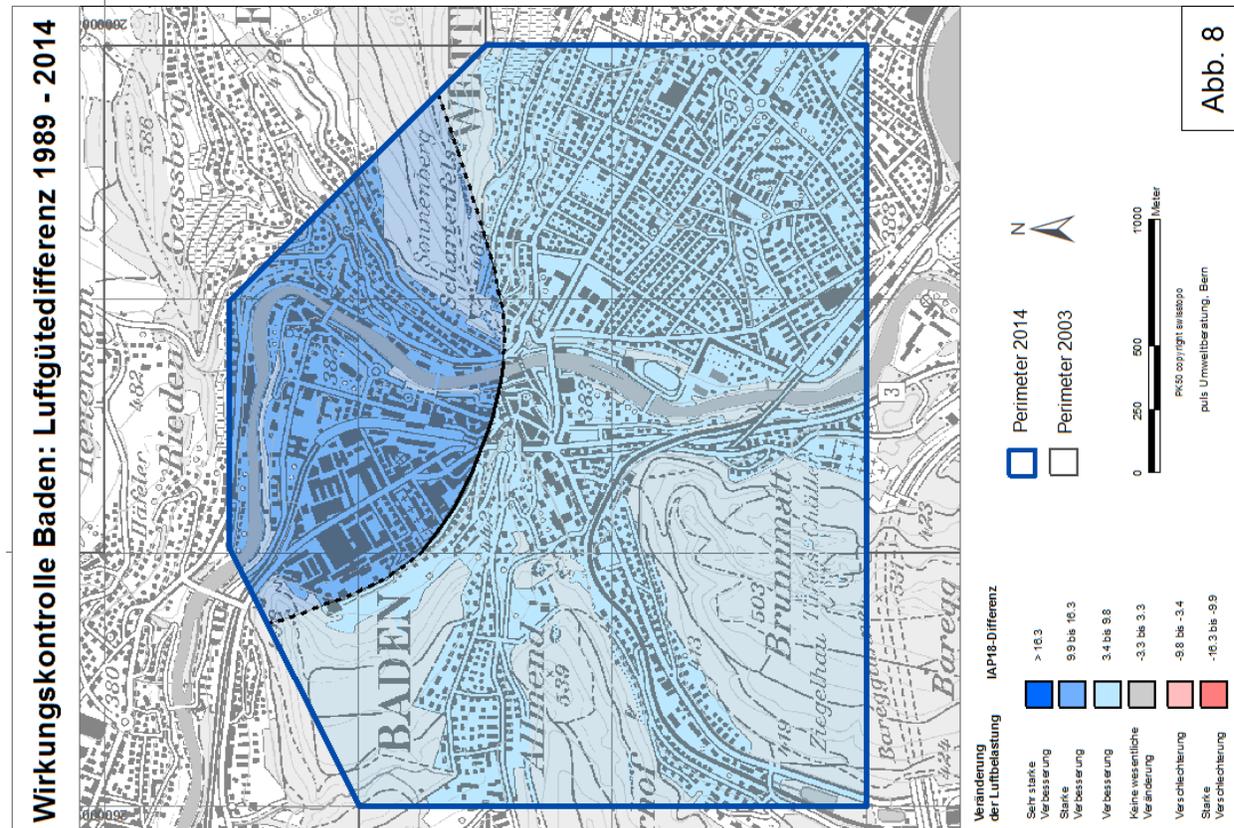
### Differenzkarte 1989 bis 2014

Zwischen 1989 und 2014 hat sich die Luftqualität im ganzen Untersuchungsgebiet Baden verbessert (Abb. 8, blaue Farben). Eine starke Verbesserung (mittelblau eingefärbt) erfährt das Stadtzentrum Baden und die angrenzenden Flächen nördlich und östlich der Limmat.

### Differenzkarte 2003 bis 2014

Diese Differenzkarte zeigt, dass sich die Luftbelastung in den letzten elf Jahren in der Gemeinde Wettingen verbessert hat (hellblaue Zone in Abb. 9). Im übrigen Gebiet ist keine wesentliche Veränderung festgestellt worden (graue Zone).

\* Bei der Entwicklung wurden 20 Versionen getestet (IAP01 bis IAP20). Die Version IAP18 hat die grösste Übereinstimmung mit den technischen Messungen gezeigt.



## 7. Acidoindex

Die 41 verschiedenen Flechtenarten, die in der vorliegenden Untersuchung für den IAP18-Wert berücksichtigt worden sind, 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, in welchen Ammoniak aus Dünger und natürlichen Stäuben basische Immissionen liefern. Arten, die sich auf saure Rinden spezialisiert haben, verschwinden aus Gebieten, in welchen 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. 10 bis 15, folgende Seiten) entspricht einem Georaummittelpunkt. 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 ist nicht möglich. Die Entwicklungen von Acidoindex und pH-Wert können aber gut miteinander verglichen werden (vgl. Kap. 9).

### **Acidoindex 1989, 1995 und 2003**

Im Jahr 1989 präsentierte sich die Lage in Baden überwiegend sauer (Abb. 10). Nur ein einzelner grüner Kreis im Zentrum von Baden weist auf basische Immissionen hin. Sechs Jahre später fand sich eine ähnliche Situation vor: Die Immissionen sind überwiegend sauer, ausser der Georaum in Baden Nord (Abb. 11). Im Jahr 2003 zeigte sich der Trend zu weniger sauren Immissionsverhältnissen (Abb. 12). So weisen erstmals mehrere Georäume basische Werte auf (im Zentrum von Baden, im Westen von Wettingen und in Liebefels).

### **Acidoindex 2014**

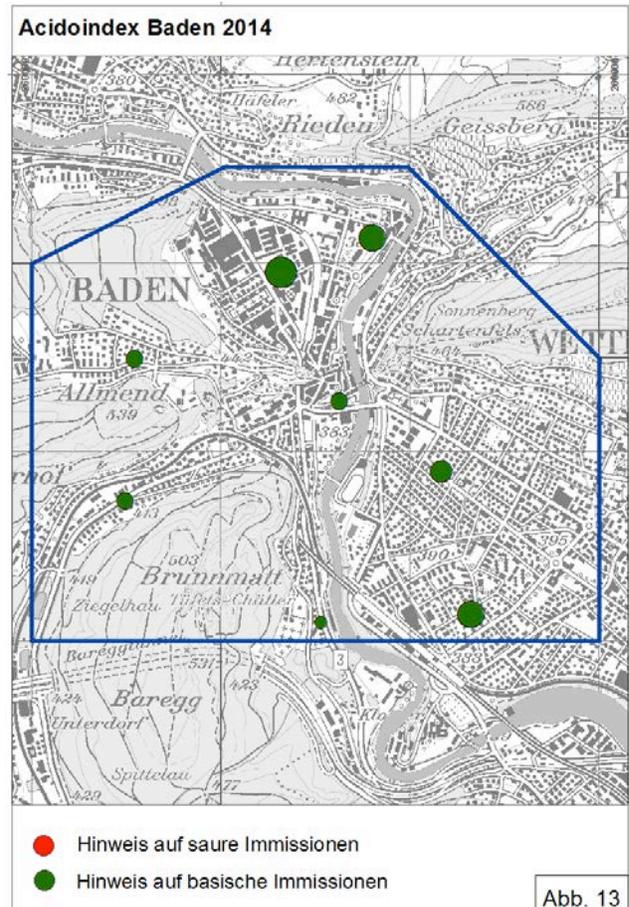
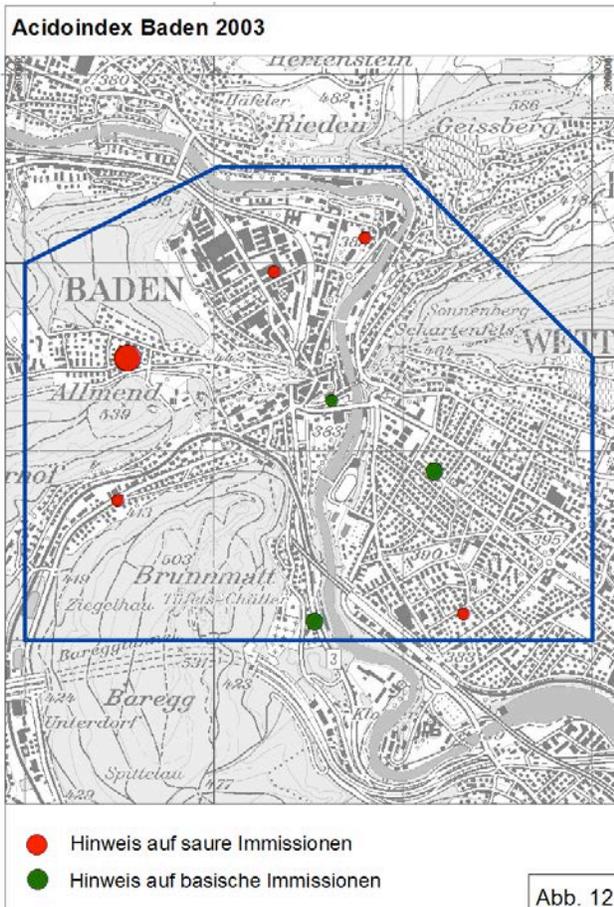
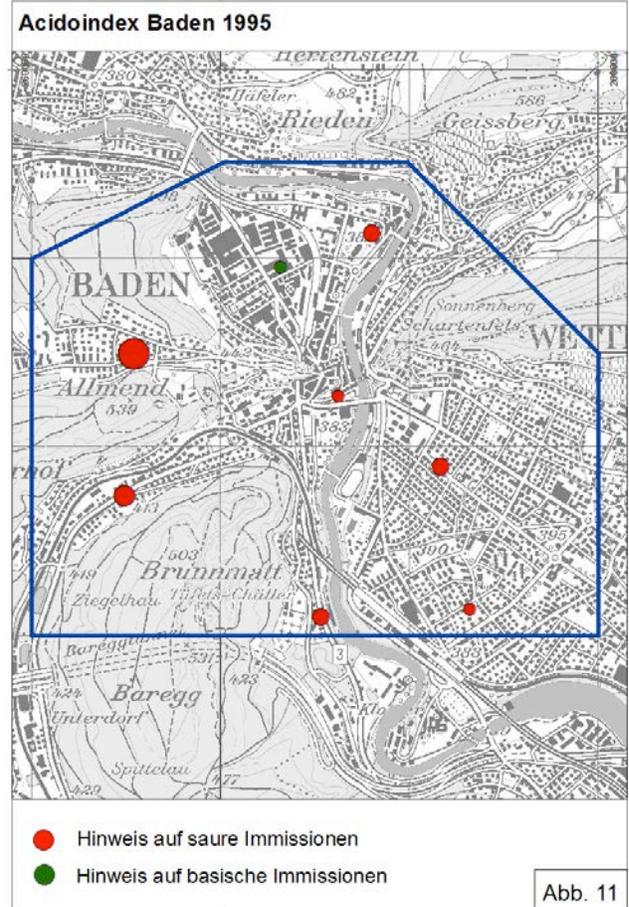
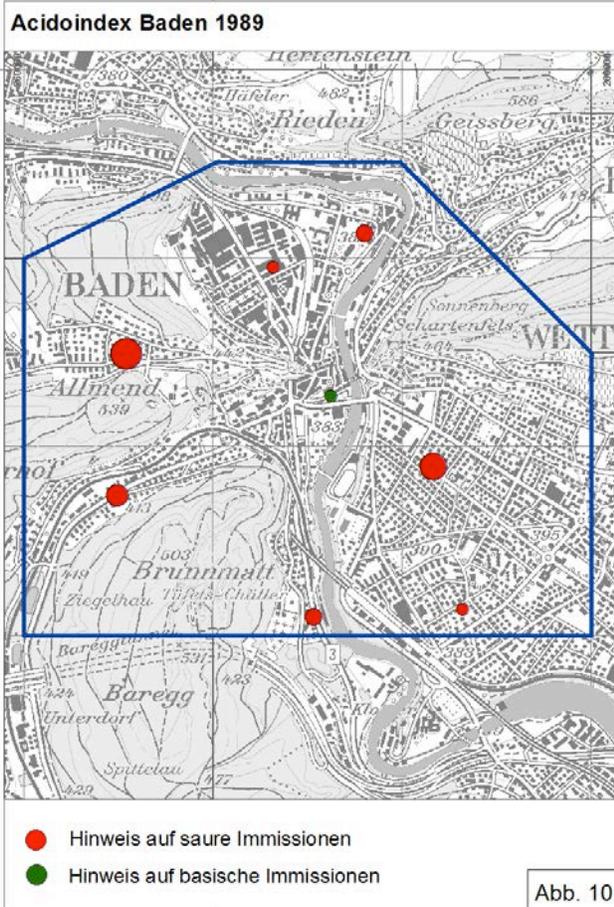
2014 hat sich der Trend zu basischen Verhältnissen fortgesetzt (Abb. 13). Alle Georäume haben negative Werte angenommen und stehen somit unter basischem Einfluss.

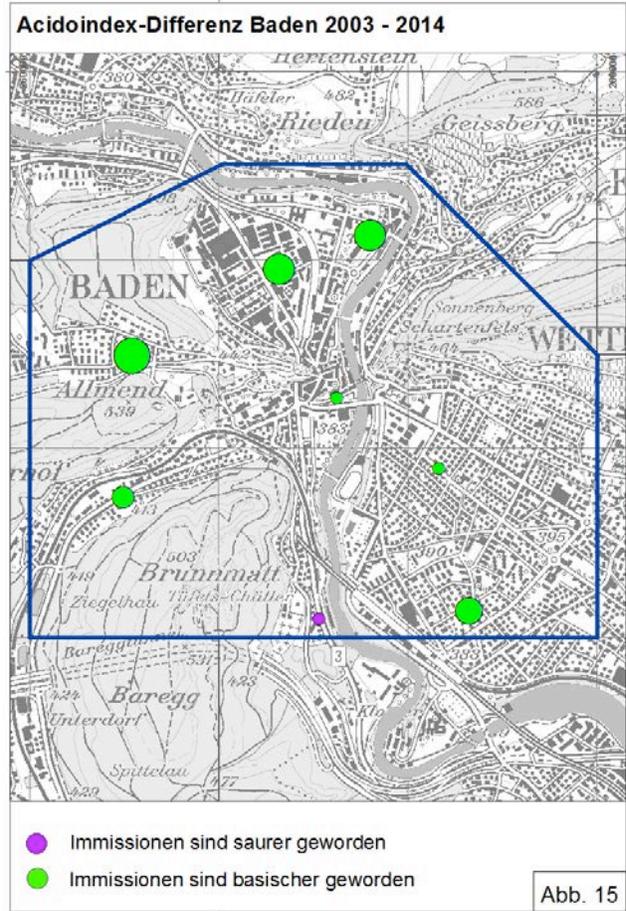
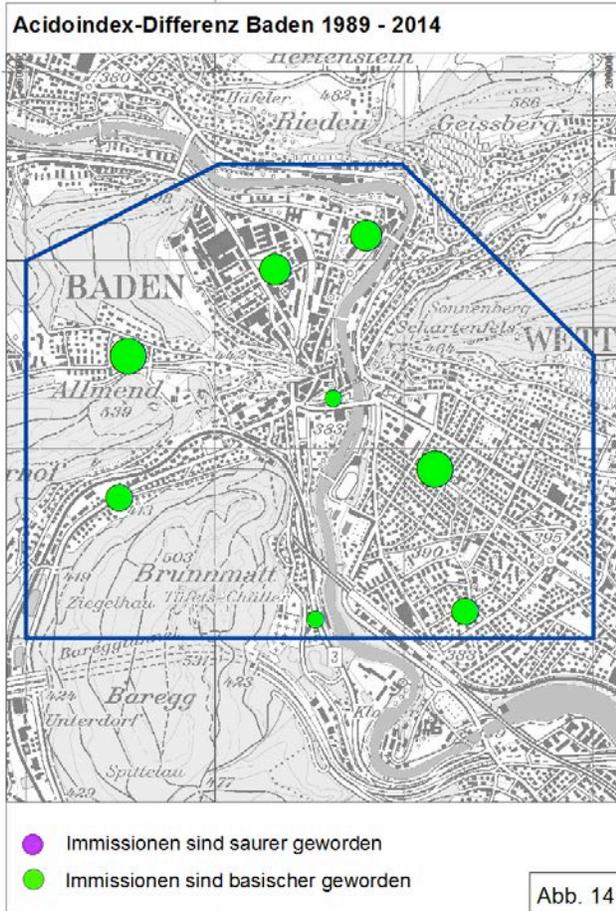
### **Acidoindex-Differenz 1989 bis 2014**

In Abbildung 14 ist die Differenz des Acidoindex' zwischen 1989 und 2014 dargestellt. Es zeigt sich, dass das gesamte Gebiet von Baden basischer geworden ist (hellgrüne Punkte). Alle Georäume weisen heute zum Teil deutlich basischere Immissionen auf als 1989.

### **Acidoindex-Differenz 1989 bis 2014**

Auch von 2003 bis 2014 sind die Georäume im Gebiet Baden basischer geworden (hellgrüne Punkte) mit Ausnahme von Liebefels. Hier ist eine minime Versauerung (violetter Punkt) feststellbar, obschon der Wert in Liebefels 2014 einen negativen Wert (Hinweis auf basische Immissionen) aufzeigt (Abb. 15).





Entwicklung Acidoindex Baden

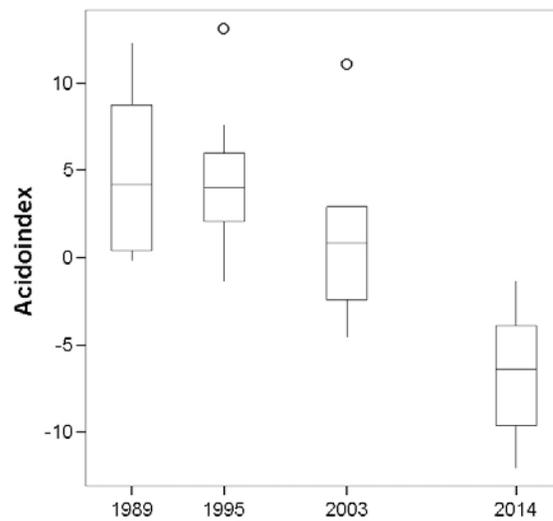


Abb. 16:  
Acidoindex der Geo-  
räume in Baden.

Abbildung 16 zeigt den mittleren Acidoindex der Georäume in Baden in den vier Untersuchungsjahren. In den Boxplots sind folgende Perzentile P dargestellt: 50er P: Mittellinie (=Median), 25er und 75er P: Box, 10er und 90er P: Linie. Ausreisser sind als Punkte eingezeichnet.

Während die Mediane 1989 und 1995 nahezu gleich geblieben sind, zeigen die Werte von 2003 und 2014 einen starken Rückgang hin zu basischeren Verhältnissen. Dieser Trend entspricht dem Anstieg des pH-Wertes im Regen (vgl. Abb. 31 in Kap. 10). Die Zusammensetzung der Flechtenarten hat sich in den letzten 25 Jahren von einer eher acidophil geprägten zu einer basiphileren Flechtenvegetation verändert.

## 8. Nitroindex

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

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

Verantwortlich für die Stickstoffdepositionen sind Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ). Stickoxide entstehen bei allen Verbrennungsvorgängen, Hauptquellen sind der motorisierte Verkehr, Heizungen und industrielle Feuerungen.

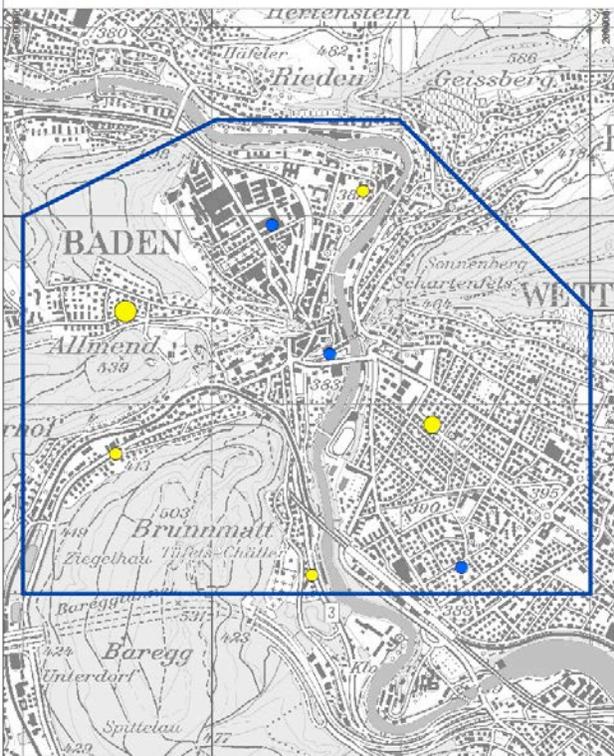
Ammoniak stammt zum grössten Teil aus der Landwirtschaft. In der Nähe von Quellen wird Ammoniak direkt gasförmig von Flechten und Pflanzen aufgenommen. Ammoniak wird zudem in der Luft zu Ammonium umgewandelt und wird über grössere Distanzen (bis zu 25 km) transportiert. So erfolgt die Deposition von Ammonium weiträumig und am höchsten in niederschlagsreichen Gebieten. Insgesamt stammen über 70% der aus der Luft deponierten Stickstoffverbindungen aus Ammoniak und dessen Verbindungen (FAL 1996; OSTLUFT 2004).

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

Der Nitroindex wird über die Frequenzwerte zum einen der fünf nitrophilen Flechtenarten *Xanthoria parietina*, *Xanthoria fallax-Gr.*, *Physconia grisea*, *Phaeophyscia orbicularis-Gr.* sowie *Physcia adscendens-Gr.* berechnet; zum anderen der vier antitrophilen Arten *Hypogymnia physodes*, *Pseudevernia furfuracea*, *Evernia prunastri* und *Parmelia saxatilis*. Die Frequenzsumme der vier antitrophilen Arten wird von der Frequenzsumme der fünf nitrophilen Arten subtrahiert. Der erhaltene absolute Nitroindex wird pro Georaum gemittelt.

Jeder Kreis auf den Nitrokarten (Abb. 17 bis 22) entspricht einem Georaummittelpunkt. Blaue Kreise stehen für einen positiven Nitroindex, sie geben Hinweise auf das Überwiegen von stickstoffhaltigen Immissionen in der Gesamtbelastung. Gelbe Kreise bezeichnen stickstoffarme Immissionen, der Nitroindex ist negativ. Die Kreisgrösse entspricht dem Wert des Nitroindex', je grösser der Wert desto grösser der Kreis.

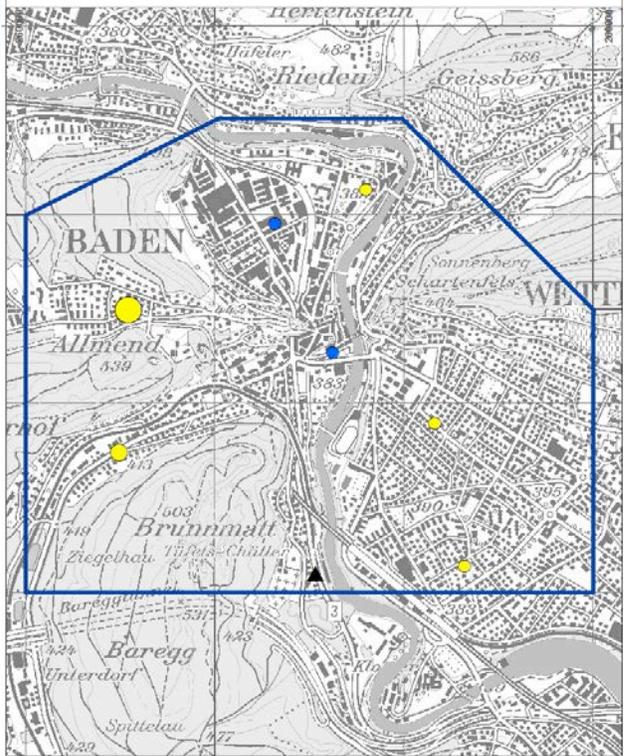
Nitroindex Baden 1989



- Hinweis auf stickstoffreiche Immissionen
- Hinweis auf stickstoffarme Immissionen

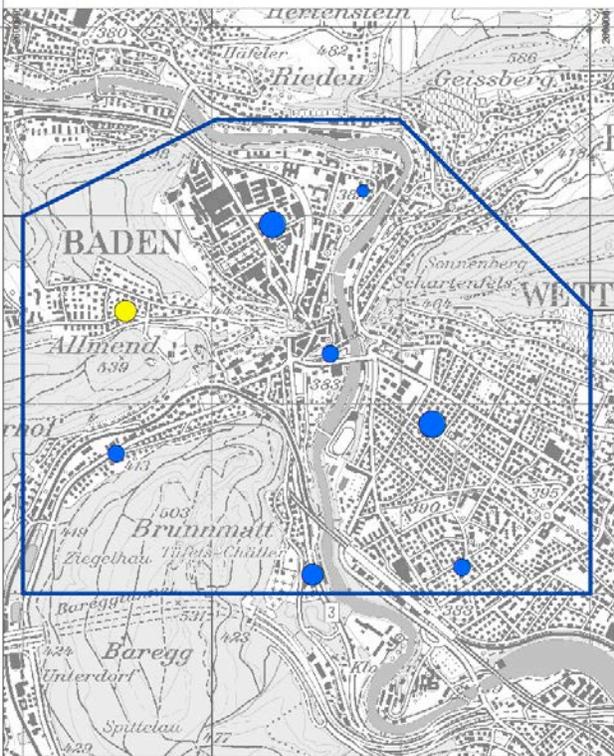
Abb. 17

Nitroindex Baden 1995



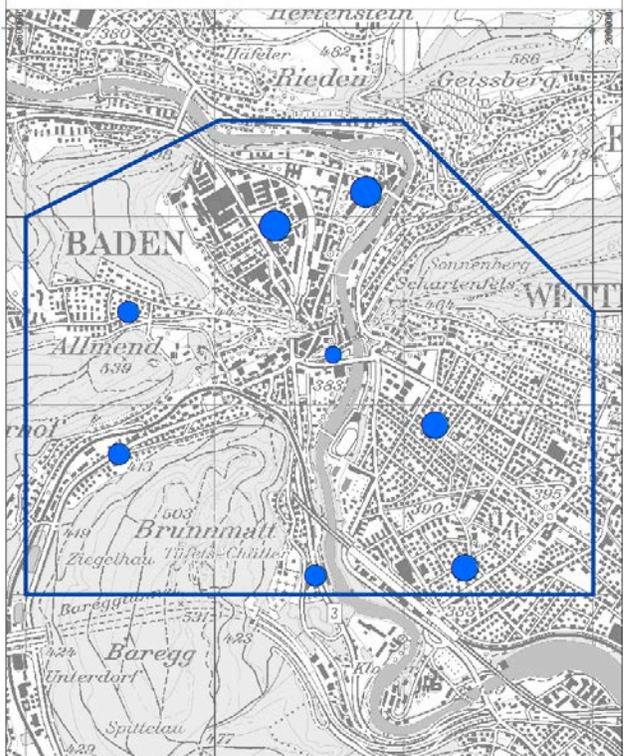
- Hinweis auf stickstoffreiche Immissionen
- Hinweis auf stickstoffarme Immissionen

Nitroindex Baden 2003

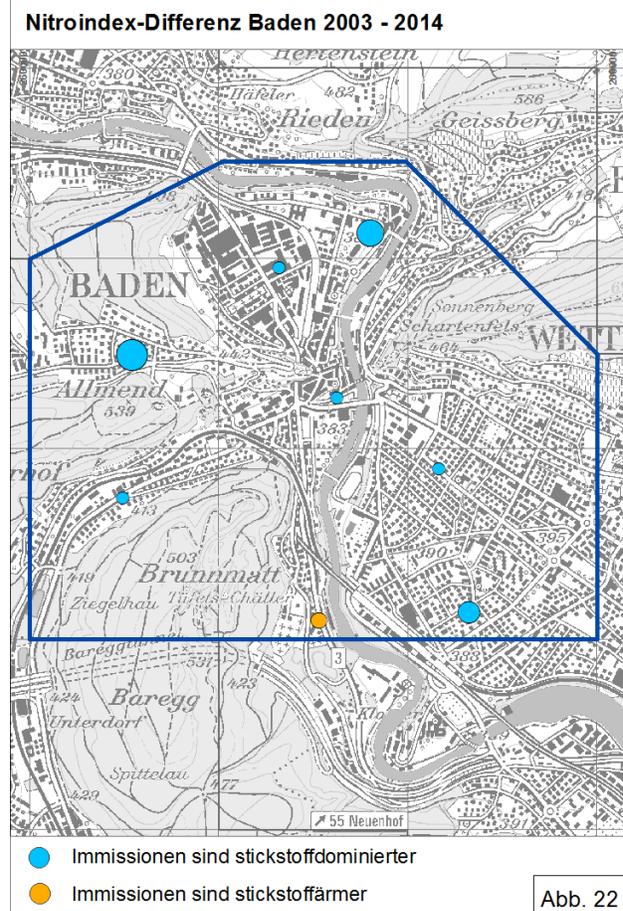
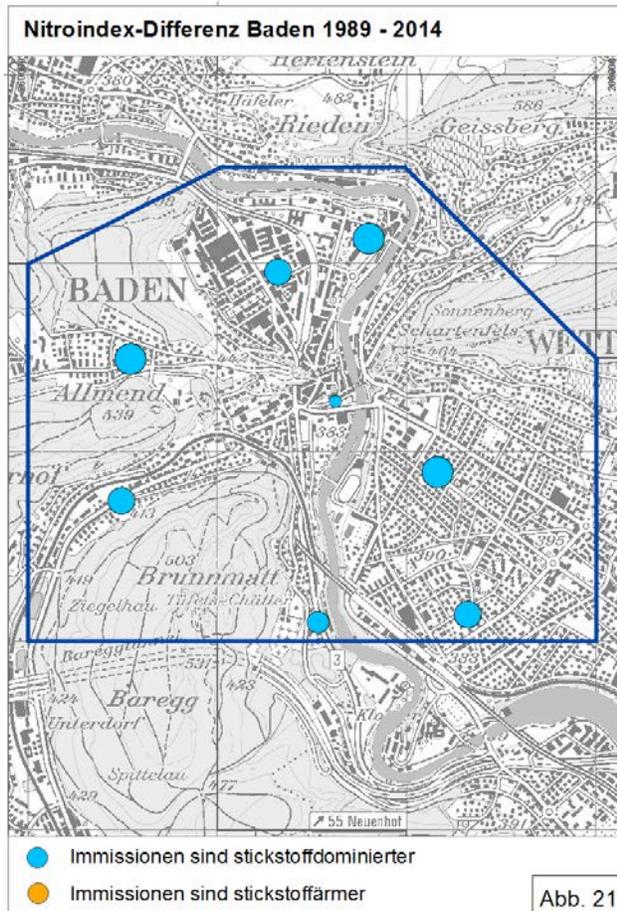


- Hinweis auf stickstoffreiche Immissionen
- Hinweis auf stickstoffarme Immissionen

Nitroindex Baden 2014



- Hinweis auf stickstoffreiche Immissionen
- Hinweis auf stickstoffarme Immissionen



### Nitroindex 1989, 1995 und 2003

Von den 1989 untersuchten acht Georäumen in Baden zeigten fünf Punkte stickstoffarme Immissionen auf (Abb. 17). Leicht erhöhte Stickstoffbelastungen wurden in den Georäumen Baden Zentrum, Baden Nord und Wettingen Süd registriert.

1995 hatte sich die Stickstoffbelastung in Baden nur gering verändert: Wettingen Süd verzeichnete neu einen stickstoffarmen Punkt und in Liebefels war die Stickstoff-Immission leicht gestiegen, so dass ein neutraler Wert ausgewiesen wurde (Abb. 18).

Im Jahr 2003 ist die Situation in Baden deutlich stickstoffreicher geworden (Abb. 19). Nur Baden Allmend wies noch Immissionen im stickstoffarmen Bereich aus.

### Nitroindex 2014

2014 ist die Stickstoffimmission nochmals angestiegen (Abb. 20). Alle Georäume im Untersuchungsgebiet sind stickstoffreich, mit höheren Werten als 2003. Der tiefste Nitroindex ist in Baden Zentrum zu finden.

### Nitroindex-Differenz 1989 – 2014

Die Abbildung 21 zeigt die Differenz des Nitroindex' von 1989 und 2014. Im gesamten Gebiet haben die Stickstoffbelastungen stark zugenommen. Als Ausnahme ist der Georaum in Baden Zentrum zu erwähnen mit einem verhältnismässig geringeren Anstieg der stickstoffhaltigen Immissionen.

### Nitroindex-Differenz 2003 – 2014

Die Differenz des Nitroindex' zwischen 2003 und 2014 ist in Abbildung 22 dargestellt. Alle untersuchten Georäume sind stickstoffdominant geprägt, ausser in Liebefels, wo die Stickstoffimmission geringer geworden ist.

Abbildung 23 zeigt den mittleren Nitroindex über die Georäume in Baden anhand von Boxplots. In den Boxplots sind folgende Perzentile P dargestellt: 50er P: Mittellinie (=Median), 25er und 75er P: Box, 10er und 90er P: Linie. Ausreisser sind als Punkte eingezeichnet.

Deutlich erkennbar ist, dass die Georäume seit 1995 stickstoffreicher geworden sind. 1989 und 1995 war die Flechtenvegetation anitrophil geprägt. 2003 und noch deutlicher 2014 zeigt sich die Tendenz der Zunahme von nitrophilen Flechtenarten.

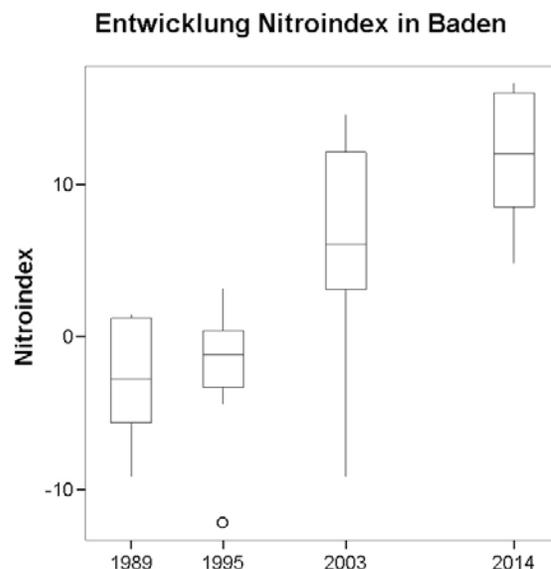


Abb. 23:  
Nitroindex der Georäume in Baden.

Wie in anderen untersuchten Gebieten der Schweiz (Abbildung 24) ist der Nitroindex im Raum Baden von 1989 bis 2014 kontinuierlich gestiegen. Dies weist auf eine zunehmende Bedeutung der Stickstoffbelastung für die Flechten hin. Baden weist dabei als rein städtischer Raum tiefere Werte als die anderen Gebiete auf, welche städtisch-ländlich gemischt oder sogar ländlich dominiert sind. Der Nitroindex im Schweizer Mittelland scheint sich einem Maximalwert anzunähern.

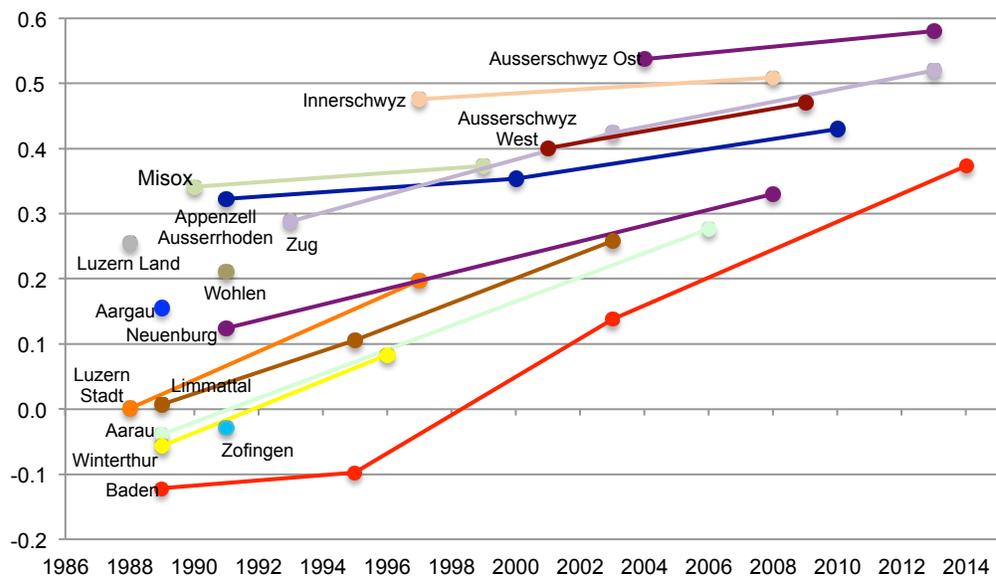


Abb. 24:  
Der Nitroindex in  
verschiedenen Ge-  
bieten der Schweiz;  
Baden: rote Linie.

## 9. Emissions- und Immissionsdaten

Zum Vollzug der Luftreinhalteverordnung erstellte der Kanton Aargau unter anderem einen Emissionskataster und nimmt kontinuierliche technische Immissionsmessungen vor. Diese technischen Daten zur Luftqualität werden im Folgenden mit den Resultaten der Flechtenkartierung verglichen.

### Emissionsdaten

In Abbildung 25 sind die gesamtschweizerischen Emissionsdaten der Schadstoffe Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ), flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC), Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), Feinstaub  $\text{PM}_{10}$  und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) von 1990 bis 2012 mit einer blauen Linie aufgetragen (BAFU 2015). Die Emissionsdaten des Kantons Aargau sind mit roten Punkten für die Jahre 1995, 2000 und 2005 markiert. Sie stammen aus den beiden Massnahmenplänen 2002 und 2009 des Kantons Aargau (Kanton Aargau 2002 und 2009). Für den Vergleich mit den Flechtendaten werden diese Zahlen verwendet, da für Baden keine Emissionsdaten zur Verfügung stehen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Emissionsentwicklung im Limmattal, resp. Baden einer ähnlichen Tendenz unterliegt wie mit derjenigen des Kantons Aargau.

In Abbildung 26 ist die Emissionssituation im Kanton Aargau im Jahr 2005 graphisch dargestellt. Die Schadstoffe  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PM}_{10}$  und NMVOC sind in die vier Quellengruppen Haushalte und Dienstleistungen, Industrie und Gewerbe, Land- und Forstwirtschaft sowie Verkehr aufgeteilt.

Die Emissionen von Stickstoffoxid haben im Zeitraum von 1990 bis 2012 schweizweit deutlich abgenommen. Im Kanton Aargau ist von 1995 bis 2005 keine entsprechende Abnahme feststellbar (Abb. 25). Stickoxide  $\text{NO}_x$  entstehen bei Verbrennungsprozessen. Gemäss Abbildung 26 sind die Hauptemittenten der Verkehr (2005: gut 50%) sowie Industrie und Gewerbe (ca. 30%).

Auch die VOC-Emissionen sind in der Schweiz zwischen 1990 und 2012 stark zurückgegangen, die Abnahme betrug rund 72%. Auch im Kanton Aargau ist diesbezüglich ein Rückgang feststellbar. Die flüchtigen Kohlenwasserstoffe VOC stammen im Kanton Aargau zu rund 60% aus Industrie und Gewerbe, 20% aus dem Verkehr und gut 15% aus den Haushaltungen.

Die Schwefeldioxid-Emissionen haben schweizweit in der Zeitspanne von 1990 bis 2012 stark abgenommen. Die Reduktion beträgt rund 74%. Auch für den Kanton Aargau kann davon ausgegangen werden, dass die Schwefeldioxid-Emissionen zurück gegangen sind.

\* Bei der Entwicklung wurden 20 Versionen getestet (IAP01 bis IAP20). Die Version IAP18 hat die grösste Übereinstimmung mit den technischen Messungen gezeigt.

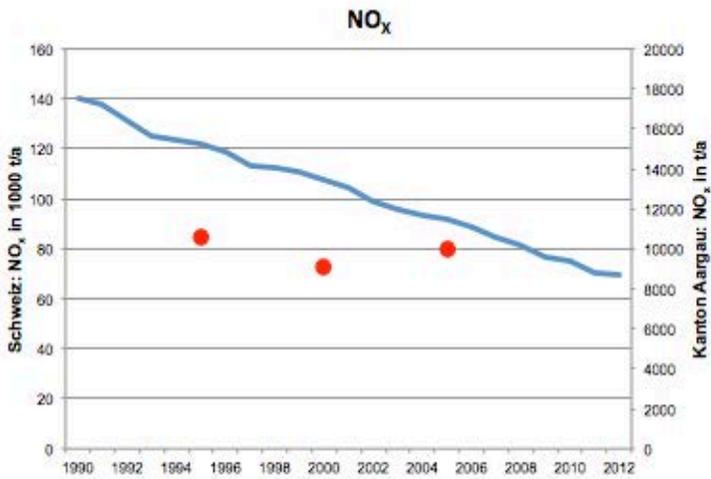


Abb. 25:  
Emissionsdaten Schweiz  
und Kanton Aargau (für  
SO<sub>2</sub> sind keine kantonalen  
Daten verfügbar.)

Legende:

- Schweiz
- Kanton Aargau

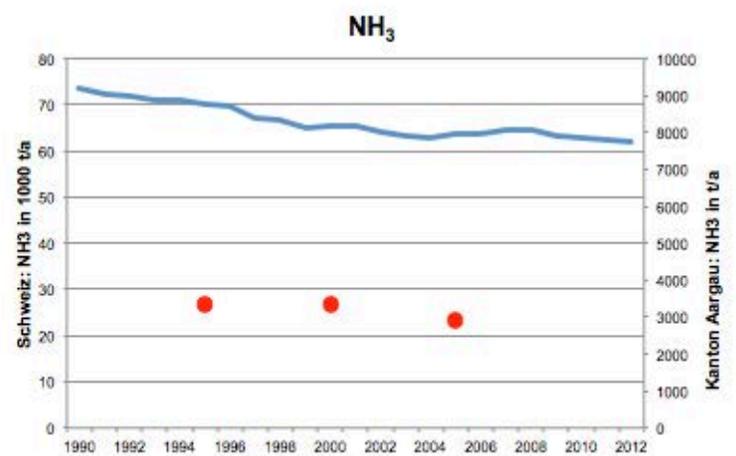
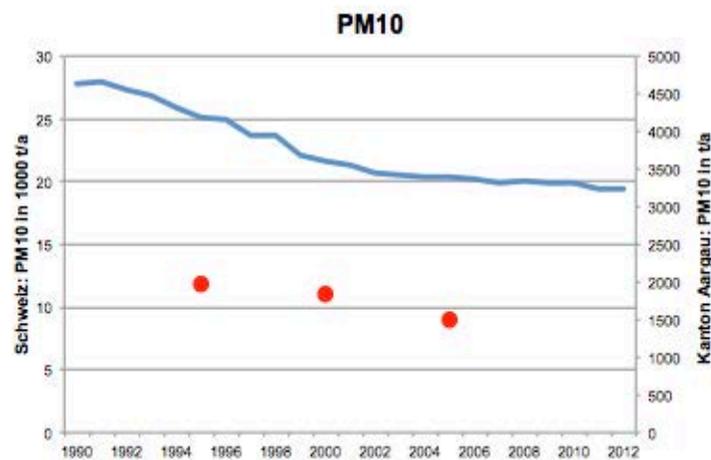
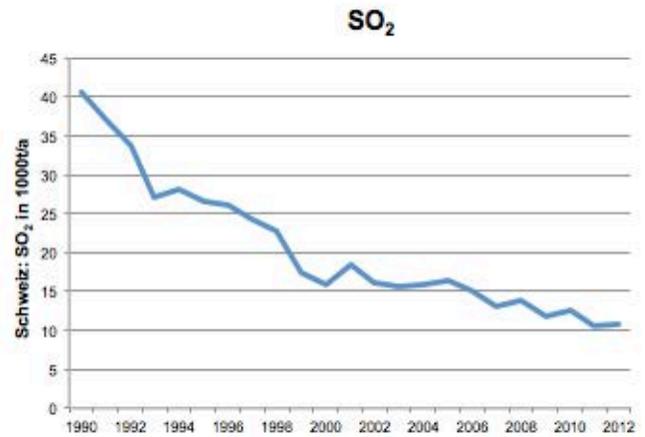
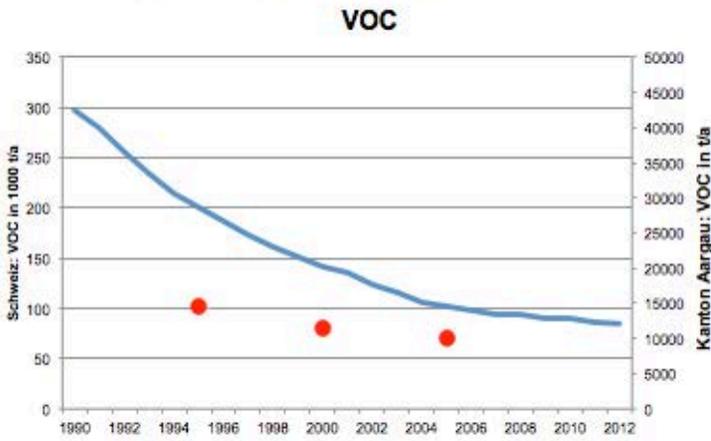
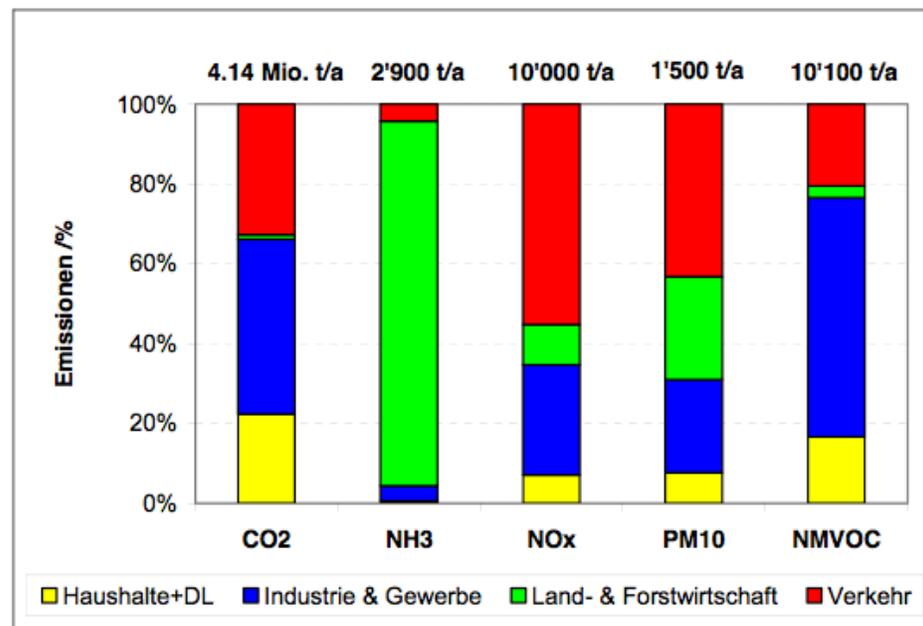


Abb. 26:  
Emissionsdaten  
Kanton Aargau  
2005, aufgeteilt auf  
vier Quellengruppen.  
Aufgeführt sind  
ebenfalls die Ge-  
samtemissionen in  
Tonnen pro Jahr.  
(Kanton Aargau  
2009)



Die Feinstaub-Emission ist in der Schweiz seit 1990 ebenfalls gesunken. Dieser Trend ist auch im Kanton Aargau feststellbar. Hauptemittent von PM10 war im 2005 der Verkehr (mehr als 40%). Land- und Forstwirtschaft und Industrie & Gewerbe halten sich in etwa die Waage mit je etwa 20% Emissionsanteil.

Ammoniak-Emissionen sind fast ausschliesslich auf die Land- und Forstwirtschaft zurückzuführen (Abb. 26). In den 90er Jahren hat die Ammoniak-Emission leicht abgenommen, seit 2003 hat sich der schweizweite Schadstoffausstoss nicht wesentlich verändert. Im Kanton Aargau ist von 1995 bis 2005 nur ein kleiner Rückgang feststellbar.

Die 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.

## Immissionsmessungen

Seit 2002 erfasst der Kanton Aargau die Luftbelastung von Baden an der Schönaustrasse mit kontinuierlichen Immissionsmessungen von  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$  und  $\text{PM}_{10}$ . Dieser Messstandort zeichnet sich aus durch mässigen Verkehr und befindet sich in einem städtischen Wohngebiet. Seit 2002 werden die Messungen unverändert erfasst und eignen sich deshalb zum Vergleich mit den Flechtendaten.

## Stickstoffdioxid

Nebst der kontinuierlichen Messung an der Schönaustrasse wird dort der Stickstoffdioxid-Gehalt seit 2008 auch mit einem Passivsammler gemessen. Weitere Passivsammler-Messstationen befinden sich im Zentrum von Baden beim Schulhausplatz und an der Kreuzung Brugger-Haselstrasse.

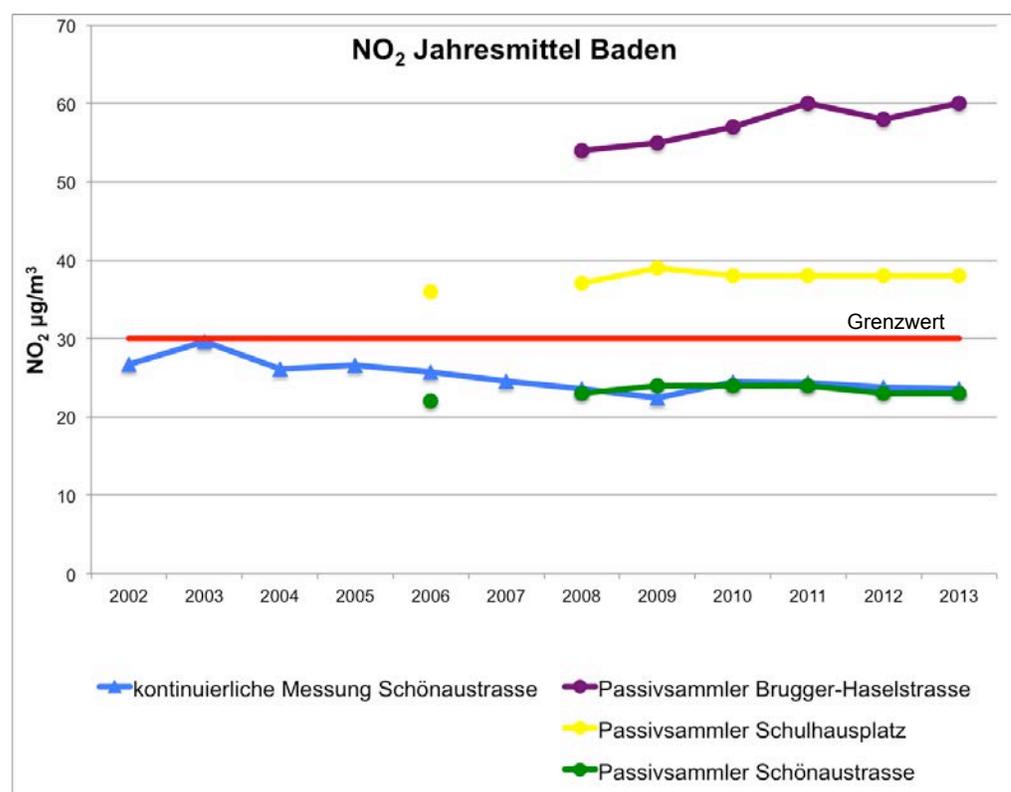


Abb. 27:  
Stickstoffdioxid Jah-  
resmittelwerte Baden

Die Abbildung 27 zeigt, dass die Messungen von Stickstoffdioxid im Wohngebiet an der Schönaustrasse seit Messbeginn sowohl für die kontinuierlichen Messungen wie auch für den Passivsammler unterhalb des Immissionsgrenzwertes von  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Jahresmittel) liegen.

Die kleinen Differenzen zwischen den kontinuierlichen Messungen und den Passivsammlern am gleichen Standort (Schönaustrasse) sind messtechnisch bedingt.

Ein anderes Bild zeigen die beiden Passivsammler an der Brugger-Haselstrasse und am Schulhausplatz, welche sich beide im Zentrum von Baden befinden. Beide Messreihen liegen oberhalb des Immissionsgrenzwertes.

Während die Tendenz an der Brugger-Haselstrasse-Kreuzung in den letzten Jahren tendenziell steigend ist, zeigen die beiden Stationen an der Schönaustrasse und am Schulhausplatz nahezu gleichbleibend hohe Messresultate.

### Schwefeldioxid

Die Schwefeldioxid-Immissionen wurden an der Schönaustrasse von 2002 bis 2007 gemessen und liegen unterhalb des Grenzwertes (Abb. 28). Sie haben sich auf einem tiefen Niveau eingependelt.

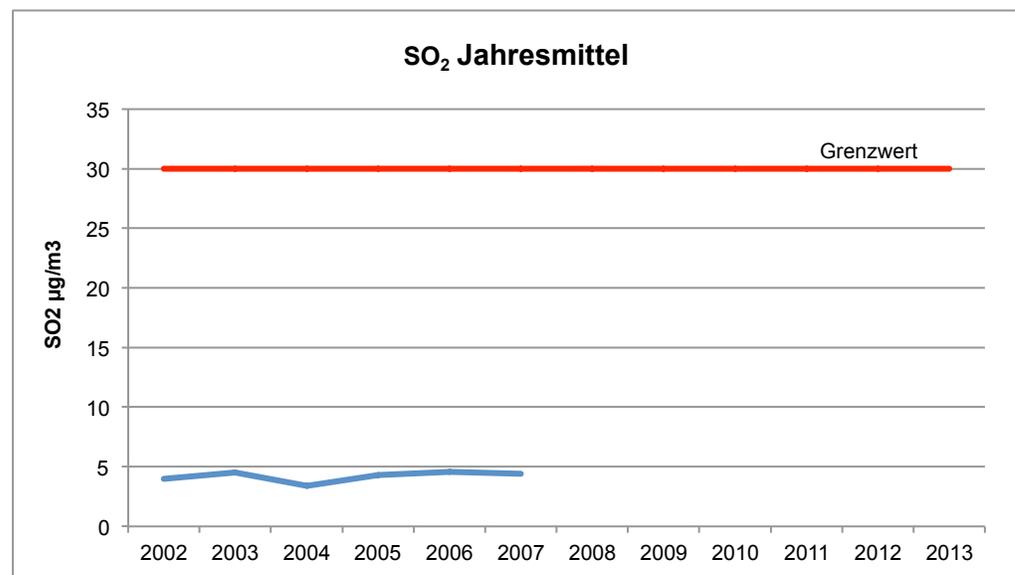


Abb. 28:  
Baden: Der Jahresmittelwert von Schwefeldioxid liegt deutlich unter dem IGW von  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### Ozonbelastung

Gemäss der Luftreinhalte-Verordnung darf der Einstunden-Mittelwert von  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  höchstens einmal pro Jahr überschritten werden. Die Abbildung 29 zeigt die Anzahl Überschreitungen des Einstunden-Mittelwertes an der Messstation Schönaustrasse in Baden. Diese werden seit Messbeginn deutlich überschritten. Lässt man die hohen Ozon-Werte des Hitzesommers 2003 unberücksichtigt, so ist kein klarer Belastungstrend zu erkennen.

Die Spitzenbelastung ist jedoch rückläufig. Es sind praktisch keine Stundenmittel mehr über  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gemessen worden.

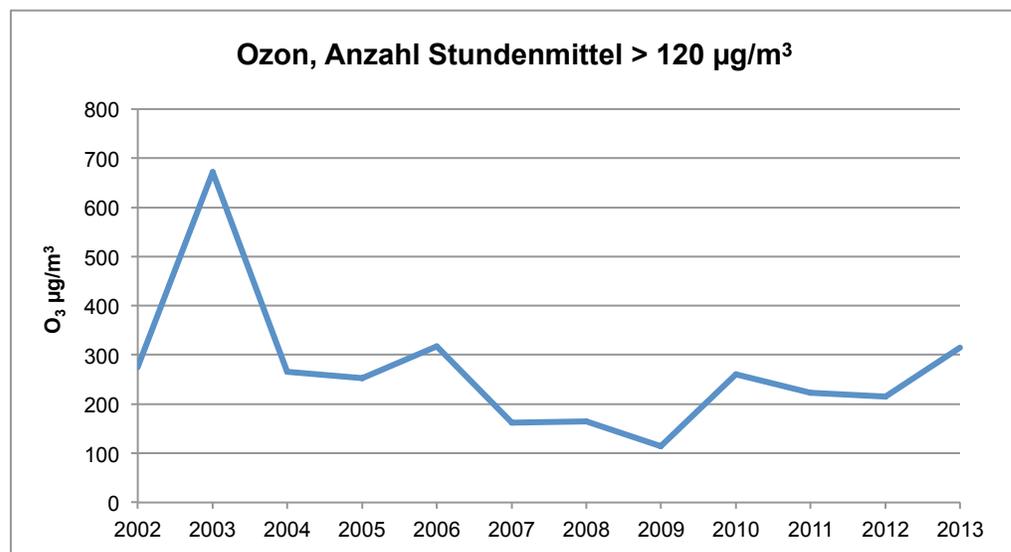


Abb. 29:  
Anzahl Überschreitungen des 1-h-Mittelwerts von Ozon.

### Feinstaub PM10

Die durchschnittlichen Jahresmittelkonzentrationen von PM10 lagen in den ersten vier Jahren ab Messbeginn über dem Grenzwert von  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Nach 2006 sank der Immissionswert leicht und liegt seither im Bereich des Grenzwertes (Abb. 30).

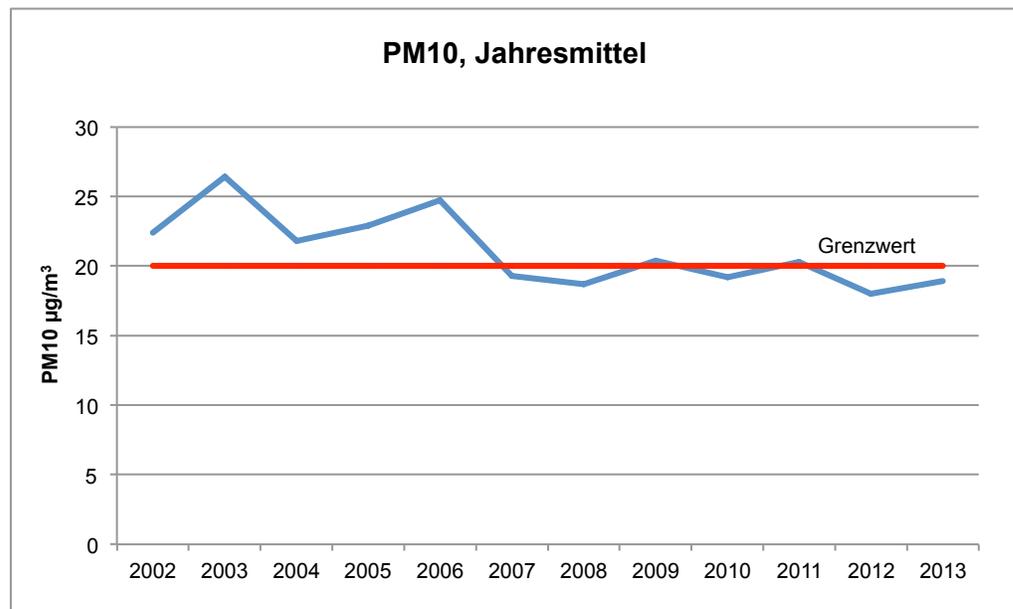


Abb. 30:  
Jahresmittelwert von  
PM10 in Baden

## 10. Schlussfolgerungen

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

Wie die Flechtenuntersuchungen der letzten 25 Jahre aufzeigen, ist die Verbesserung der Luftgüte als direkte Folge der lufthygienischen Sanierungsmassnahmen interpretierbar. Der positive Trend der Luftqualität in Baden konnte auch 2014 bestätigt werden.

Trotz der wesentlichen Reduktion der Belastung seit 1989 weist der Raum Baden–Wettingen immer noch eine mittlere bis starke Gesamtbelastung auf. Diese Belastung wird auch durch die kontinuierliche Immissionsmessung für Ozon und die durch die Passivsammler gemessenen NO<sub>2</sub> Konzentrationen bestätigt, welche für das Zentrum von Baden nach wie vor Grenzwertüberschreitungen nachweisen.

Von 2003 bis 2014 weisen die Flechten eine geringfügige Verbesserung der Luftgüte aus. Diese Tendenz deckt sich mit den Emissionen VOC, SO<sub>2</sub>, PM10 und NH<sub>3</sub>, welche in dieser Zeitspanne leicht abgenommen haben und mit den stagnierenden Werten der Immissionsmessungen.

Die Flechtenuntersuchungen und die kontinuierlichen Messungen (zu Emission und Immission) weisen tendenziell eine Gleichläufigkeit, aber nicht eine vollständige Übereinstimmung auf. Dies ist nicht weiter erstaunlich, handelt es sich doch um zwei Messsysteme, welche das Phänomen Luftbelastung unterschiedlich erfassen:

Auf der einen Seite erfassen die Flechten die Luftqualität als biologisches System, das heisst ihre Anzeige beinhaltet die Wirkung der Luft auf ein Lebewesen. Als solches reagieren die Flechten auf Schadstoffgemische, synergistische und antagonistische Wirkungen der Schadstoffe werden angezeigt. Sie zeigen die Gesamtbelastung der Luft an, insbesondere auch die jeweilige Maximalbelastung.

Auf der andern Seite geben die kontinuierlichen Messungen präzise Auskunft über Einzelschadstoffe. Die Messergebnisse sind rechtlich direkt relevant, da über Grenzwerte in der Luftreinhalteverordnung die maximal zulässigen Belastungen definiert sind.

\* Bei der Entwicklung wurden 20 Versionen getestet (IAP01 bis IAP20). Die Version IAP18 hat die grösste Übereinstimmung mit den technischen Messungen gezeigt.

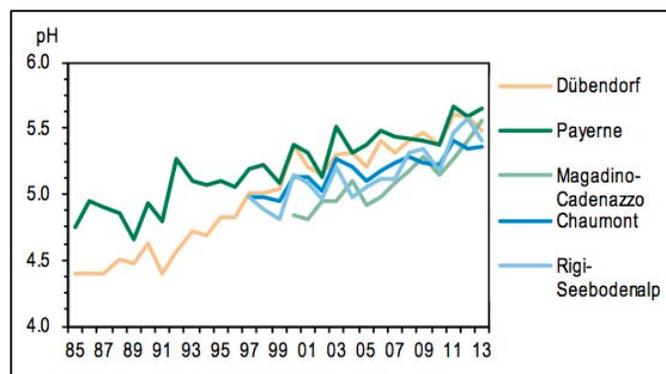
So ergänzen sich diese beiden Messsysteme, keines kann durch das andere ersetzt werden.

Auffällig ist, dass der Acidoindex auch 2014 deutlich abgenommen hat. Er setzt den Trend zu basischeren Verhältnissen hin fort. Diese basischen Belastungen in Baden korrelieren mit dem Säuregrad im Regenwasser.

Der pH-Wert gibt an, wie sauer der Regen ist. Dieser saure Schadstoffeintrag in Form von nasser Deposition spielt für die Ökosysteme eine wichtige Rolle. Im NABEL-Messnetz wird seit 1985 der pH-Wert des Regenwassers gemessen (Abbildung 31, BAFU 2014). Gemäss dieser Abbildung nimmt der pH-Wert stetig zu, d.h. die Acidität des Regens hat abgenommen.

Dieser Rückgang des Säureeintrages manifestiert sich deutlich in der Flechtenvegetation: Die basischen Immissionen begünstigen das Wachstum von basiphilen Flechten.

Abb. 31: pH-Jahresmittelwerte des Regenwassers



Wie in den andern untersuchten Gebieten der Schweiz steigt der Nitroindex auch in Baden seit Untersuchungsbeginn kontinuierlich an. Dies deutet darauf hin, dass die Stickstoffbelastungen (Stickoxide, Ammoniak) in ihrer Bedeutung für die Flechten stetig zunehmen.

Die Zielsetzung der Luftreinhalte-Verordnung ist die Senkung der Luftbelastung auf ein Mass, in dem die Gesundheit von Mensch, Tier und Pflanze gewährleistet ist. Aus biologischer Sicht könnte diese gesetzliche Vorgabe bedeuten, dass Zonen mit starker Gesamtbelastung zugunsten von Zonen mit mittlerer oder geringerer Gesamtbelastung ganz verschwinden. Für Baden könnte somit die heute noch vorhandene starke Gesamtbelastung wegfallen und der Anteil der mittleren Gesamtbelastung wachsen oder gar durch geringe und sehr geringe Gesamtbelastung ersetzt werden.

Die mit den Flechten ausgewiesenen Erfolge ermutigen dazu, die eingeschlagene Luftreinehaltepolitik weiter zu verfolgen. Durch die weitere Sanierungsanstrengung zur Reduktion von Ammoniak kann erwartet werden, dass die Flechten in den stark belasteten Gebieten nochmals Zuwachs verzeichnen werden.

Im Limmattal wurden erstmalig in der Schweiz im gleichen Gebiet drei Flechtenerhebungen vorgenommen (Ersterhebung 1989, Wiederholungsuntersuchungen 1995 und 2003).

Diese vorliegende vierte Flechtenerhebung für den Raum Baden konnte aufzeigen, dass im städtisch geprägten Baden eine Verbesserung der Luftqualität stattgefunden hat. Im Sinne einer flächendeckenden Erfolgskontrolle empfiehlt es sich, baldmöglichst das restliche Limmattal einer vierten Flechtenerhebung zu unterziehen.

# 11. 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.

**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 gleichgrosse Teilfelder unterteilt.

**Georaum**

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

**IAP18**

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.

\* Bei der Entwicklung wurden 20 Versionen getestet (IAP01 bis IAP20). Die Version IAP18 hat die grösste Übereinstimmung mit den technischen Messungen gezeigt.

**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.

**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.

**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.

**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.

**VOC**

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

## 12. Literatur

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

BAFU, 2014. NABEL - Luftbelastung 2013. Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1415: 130 S.

BAFU 2015. Indikatoren Umweltzustand,  
<http://www.bafu.admin.ch/umwelt/indikatoren/index.html?lang=de>

FAL, IUL, FAT, 1996. Ammoniakemissionen Schweiz. Bundesamt für Landwirtschaft BLW

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

Kanton Aargau, 2002. Massnahmenplan Luftreinhaltung. Baudepartement des Kantons Aargau.

Kanton Aargau, 2009. Massnahmenplan Luftreinhaltung. Baudepartement des Kantons Aargau.

Ostluft, 2004. Stickstoff-Depositionen in der Ostschweiz 1994 bis 2003

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

puls, 2004. Flechten und Luftqualität im westlichen Limmattal: Erfolgskontrolle 2003; Baudepartement des Kantons Aargau, Abteilung für Umwelt. Bern.

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

\* Bei der Entwicklung wurden 20 Versionen getestet (IAP01 bis IAP20). Die Version IAP18 hat die grösste Übereinstimmung mit den technischen Messungen gezeigt.

## 13. Anhang

Für sämtliche 42 in dieser Untersuchung erfassten Trägerbäume sind folgende Angaben enthalten:

Obj. 2014: Objektnummer = Nummer des Trägerbaumes 2014

Obj. 2003: Objektnummer = Nummer des Trägerbaumes 2003

Obj. 1995: Objektnummer = Nummer des Trägerbaumes 1995

Obj. 1989: Objektnummer = Nummer des Trägerbaumes 1989

K1 2014: horizontale Koordinate der Schweizer Landeskarte

K2 2014: vertikale Koordinate der Schweizer Landeskarte

Geo 2014: Nummer des Georaumes, welchem der Trägerbaum angehört

IAP 2014: IAP18-Wert des Trägerbaumes im Jahr 2014

IAP 2003: IAP18-Wert des Trägerbaumes im Jahr 2003

IAP 1995: IAP18-Wert des Trägerbaumes im Jahr 1995

IAP 1989: IAP18-Wert des Trägerbaumes im Jahr 1989

Art 2014: 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*

\* Bei der Entwicklung wurden 20 Versionen getestet (IAP01 bis IAP20). Die Version IAP18 hat die grösste Übereinstimmung mit den technischen Messungen gezeigt.

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

