



Flechten als Anzeiger der Luftgüte und des Klimawandels



Flechten als Anzeiger der Luftgüte und des Klimawandels

Wiesbaden, Oktober 2009

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Fachhochschule Gießen-Friedberg

Impressum

Bearbeiter: Prof. Dr. U. Kirschbaum (FH Gießen-Friedberg; Fachbereich Krankenhaus- und Medizintechnik, Umwelt- und Biotechnologie; Studiengang Umwelt-, Sicherheits- und Hygienetechnik)
Prof. Dr. K. Hanewald (HLUG)

Layout: Nadine Monika Lockwald (HLUG)

Kartengrundlage Abb. 35–41, 61 und 67: Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation

Herausgeber:

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Postfach 3209, 65022 Wiesbaden

Telefon: 0611 6939-0

Telefax: 0611 6939-555

Vertrieb: Telefon: 0611 6939-111
 Telefax: 0611 6939-113
 E-Mail: vertrieb@hlug.hessen.de

www.hlug.de

Nachdruck und sonstige Publikationen– auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

1 Einleitung

Flechten gelten seit langem als Bioindikatoren der Luftgüte. Als Ursache für ihre Empfindlichkeit gegenüber Luftverunreinigungen ist ein ganzer Komplex von Faktoren in Betracht zu ziehen:

Flechten (Lichenes) sind Doppellebewesen. Sie bestehen aus einem Algen- und einem Pilzpartner. Die Alge ist photoautotroph, d. h. sie versorgt die Gemeinschaft mit den lebensnotwendigen Kohlenhydraten zum Aufbau des gemeinsamen Körpers. Die hoch spezialisierte Partnerschaft befähigt die Flechten einerseits dazu, extreme Lebensräume zu besiedeln, andererseits ist sie auch die Ursache für die Empfindlichkeit gegenüber Umweltveränderungen. Derartige Veränderungen bewirken einen Zusammenbruch des fein eingestellten – und damit störungsanfälligen – Gleichgewichtszustandes zwischen Alge und Pilz.

Bezüglich der physiologischen Auswirkungen von phytotoxischen Gasen stehen folgende Mechanismen im Blickpunkt:

- Der Pilz scheidet Stoffwechselprodukte aus, die die Durchlässigkeit der Algen-Biomembran verändern; auf diese Weise gelangt er an die von der Alge hergestellte Kohlenhydrate. Da die Alge mindestens einen Teil der Nährstoffe zum Aufbau des eigenen Körpers benötigt, hat sie im Lauf der Evolution Anpassungsstrategien entwickelt, die den Zugriff des Pilzes auf die Kohlenhydrate abschwächen. Eine Reihe von Luftschadstoffen verändert nun zusätzlich die Durchlässigkeit der Biomembranen. Als Folge davon tritt mehr Zucker aus den Algenzellen aus, so dass nicht mehr genügend energiereiche Stoffe für das eigene Überleben zurückbleiben; die Algen sterben. Der Tod der Alge führt zum Absterben des von ihr abhängigen Pilzpartners.
- Die wichtigsten phytotoxischen Gase greifen den Photosyntheseapparat der Algen an, was zu einer Hemmung der Herstellung energiereicher Stoff-

wechselprodukte führt. Hierdurch gerät die Flechte unter das Existenzminimum und geht zugrunde.

- Manche Gase wandeln sich im Flechtenkörper in Salze um (z. B. SO_2 in SO_4^{2-}) und wirken sich in dieser Form negativ auf den Wasserhaushalt der Zellen aus (osmotische Wasserabgabe der Zellen).
- Hinzu kommt, dass die Lichenen – als wechselfeuchte Organismen – sehr viel unmittelbarer von der Luftqualität abhängen als Höhere Pflanzen oder Tiere: Sie sind darauf spezialisiert, Nährstoff-Ionen direkt aus der Luft oder dem Niederschlag zu entnehmen und in ihrem Körper anzureichern. Dieses hervorragende Akkumulationsvermögen hat allerdings auch eine starke Anreicherung toxischer Spurenelemente mit negativen Auswirkungen zur Folge.
- Flechten sind auch deshalb besonders durch Luftverunreinigungen gefährdet, weil sie auch im Winterhalbjahr mit seinen erhöhten Immissionen stoffwechseln (viele Höhere Pflanzen verbringen diese Periode in Vegetationsruhe und nehmen daher kaum Schadstoffe auf).
- Neben den Luftverunreinigungen wirken auch Veränderungen des Klimas am Flechtenwuchsort auf die wechselfeuchten Organismen maßgeblich ein.
- Auf Grund ihres langsamen Wachstums und ihrer Langlebigkeit sind die Flechten vornehmlich dazu geeignet, einen Überblick über die durchschnittliche, langfristige Gesamt-Belastung durch Schadstoffe und klimatische Veränderungen zu vermitteln; eine Veränderung der Umweltsituation wird somit erst mit einer Verzögerung von einigen Jahren angezeigt.

Das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) verwendet seit vielen Jahren Flechten als Anzeiger von Wirkungen der Luftverunreinigungen. Seit 2007 werden sie auch zur Ermittlung der Wirkung von lokalen Klimaveränderungen eingesetzt.

2 Kartierung des Bundeslandes Hessen (1991–1993)

In den Jahren 1991–1993 erfolgte im Bundesland Hessen eine flächendeckende, immissionsbezogene Flechtenkartierung nach der damals gültigen VDI-Richtlinie 3799, 1. Dazu wurde über das gesamte Land ein Messnetz gelegt, wie es Abb. 2 zeigt.

2.1 Methoden

Aus Abb. 1 geht hervor, dass ca. 3 500 Messflächen eingerichtet und in diesen etwa 30 000 Bäume (8 Bäume pro Messfläche) auf ihren Flechtenbewuchs untersucht wurden.

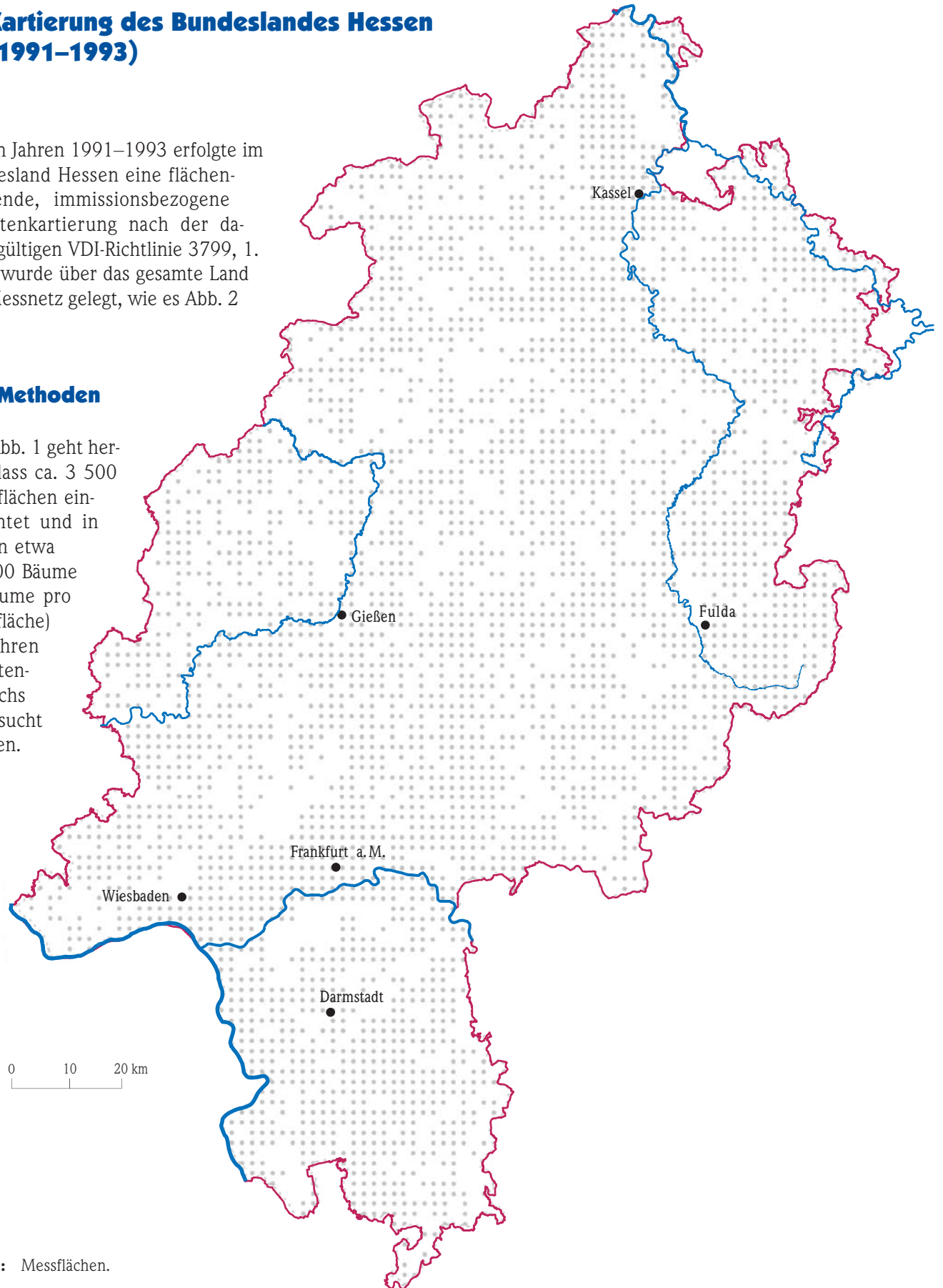


Abb. 1: Messflächen.

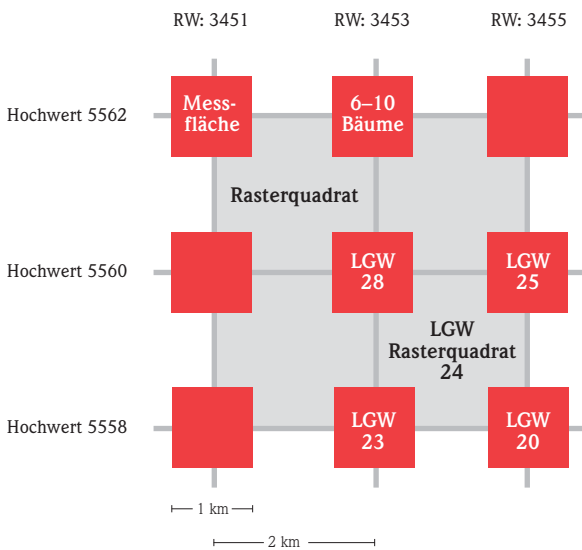


Abb. 2: Messnetz Flechtenkartierung.

Wie aus Abb.1 zu ersehen ist, konnten an etwa einem Drittel aller Stationen des Messnetzes wegen fehlender geeigneter Trägerbäume keine Flechtenaufnahmen durchgeführt werden (die Flechtenkartierung erfolgt an streng standardisierten, freistehenden Laubbäumen). Von dieser Beschränkung waren insbesondere Höhenlagen der Mittelgebirge sowie die großen zusammenhängenden Waldgebiete des Landes betroffen. Andererseits wird deutlich, dass die Messflächen \pm gleichmäßig verteilt waren; Lücken von einem Durchmesser > 10 km traten nicht auf.

Das Artenspektrum der zur Untersuchung ihres Flechtenbewuchses verwendeten Bäume war sehr gering (Abb. 3). Der Umstand, dass 80 % der Bäume sich auf zwei Arten beschränkte (Apfelbäume, Pappeln), erbrachte eine für Flechtenerhebungen unterdurchschnittlich geringe Standardabweichung der Ergebnisse. Dadurch konnten mehrere Klassen unterschiedlicher Luftgüte ausgewiesen werden (siehe Abb. 6).

Den Untersuchungsbäumen wurde ein Aufnahmegitter angelegt (siehe Abb. 4), mit dessen Hilfe die Anzahl der Arten sowie ihre Häufigkeit ermittelt werden konnte. Aus diesen beiden Werten ergab sich der Luftgütewert (LGW): Je mehr Arten gefunden wurden und je größer ihre Häufigkeit inner-

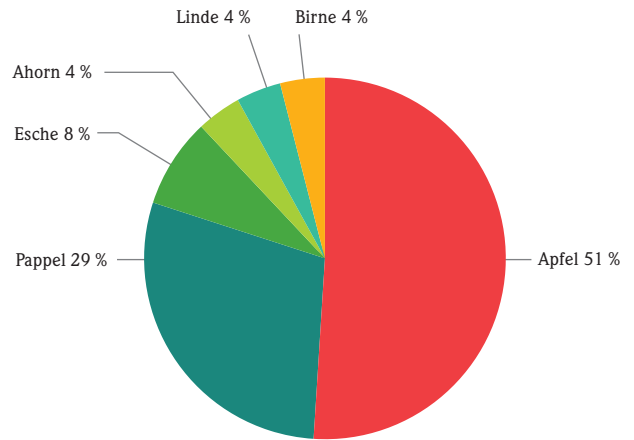


Abb. 3: Spektrum der kartierten Baumarten.

halb des Aufnahmegitters war, umso höher war der LGW.

Entsprechend der Streubreite wurden die Ergebnisse in Luftgüteklassen eingeteilt und das Gesamtergebnis in Form einer Karte dargestellt.

2.2 Ergebnisse und Diskussion

Wie aus Abb. 6 zu ersehen ist, hebt sich ein Belastungsschwerpunkt im Nordosten Hessens ab, der sich mit der zu diesem Zeitpunkt noch nachwirkenden hohen Immissionskonzentration der damaligen Industriegebiete von Sachsen und Thüringen erklären lässt.

Der zweite Schwerpunkt, in der Region Untermain, dürfte auf die hohe Dichte der Industrieansiedlungen und die Belastungen durch das Ballungsgebiet (Hausbrand) zurückzuführen sein.

Für die Oberrheinebene lassen sich hausgemachte, hessische Verursacher vermuten; darüber hinaus wird aber auch der Ferntransport von Immissionen aus dem nordbadischen Industriekomplex (Mannheim–Ludwigshafen) eine Rolle gespielt haben. Teile von West- und Südosthessen zeigen hingegen geringe lufthygienische Belastungen an.

Die Gesamtartenzahl der gefundenen Flechten lag bei 112. Im Mittel wurden pro Messfläche 8,3 und pro Baum 3,9 Arten gefunden. Der Maximalwert einer Messfläche lag bei 29 Arten; die höchste Artenzahl, die an einem Baum gefunden wurde, betrug 17. Die Anzahl der Messflächen, an denen lediglich *Lecanora conizaeoides* (eine sehr toxischtolerante Art) vorkam – und die deshalb mit dem Luftgütwert 0 versehen wurden – war gering: Nur 84 der 3 500 Messflächen zeigten äußerst ungünstige lufthygienische Bedingungen an; Messflächen ganz ohne Flechtenbewuchs kamen innerhalb dieser Untersuchung überhaupt nicht vor. Aus diesen Befunden lässt sich folgende Schlussfolgerung ziehen: **Extrem hohe Belastungen durch Luftverunreinigungen traten um 1992 in Hessen nicht mehr auf.**

Um zu klären, welche Faktoren die Existenz der Flechten beeinflussen, wurden Korrelationsberechnungen zwischen dafür in Frage kommenden Umweltfaktoren und dem Vorkommen der Flechten vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Abb. 5 wiedergegeben.

Ein Vergleich der Luftgütwerte mit den Parametern „Geologie des Untergrundes“, „Nebelhäufigkeit“, „Meereshöhe“ weist nirgends eine deutliche Beziehung auf; am weitesten gehend ist die (positive) Übereinstimmung zu den Niederschlägen, doch muss auf Grund des auch hier niedrigen Kontingenzkoeffizienten ein klarer Zusammenhang zwischen beiden Parametern verneint werden.

Auch die r-Werte zwischen der Verkehrsdichte, der landwirtschaftlichen Situation und der Siedlungsstruktur in der Umgebung der Messflächen lassen keine Beziehungen zu den Luftgütwerten erkennen.

Deutlich negative Beziehungen sind jedoch zwischen dem Vorhandensein von Stickstoffverbindungen sowie – stärker noch – zwischen dem toxischen Schwefeldioxid und den Existenzmöglichkeiten der Flechten zu erkennen.

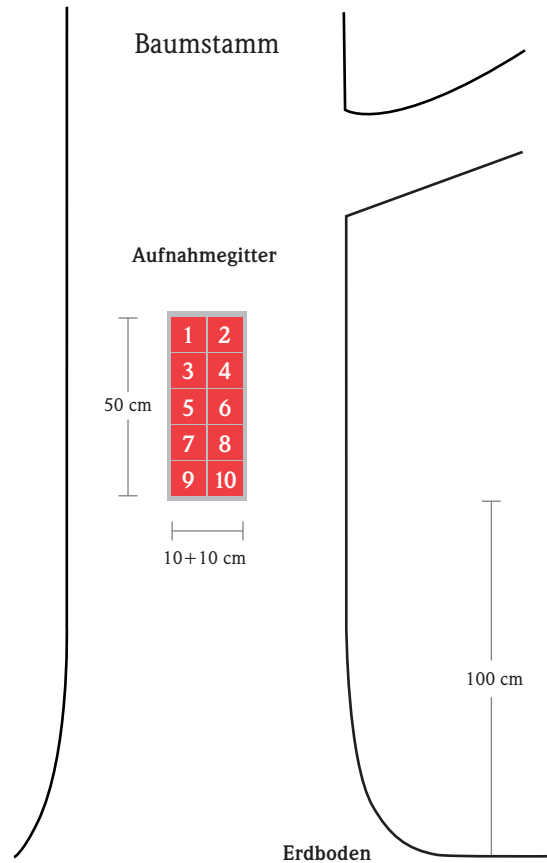


Abb. 4: Aufnahmegitter am Baum.

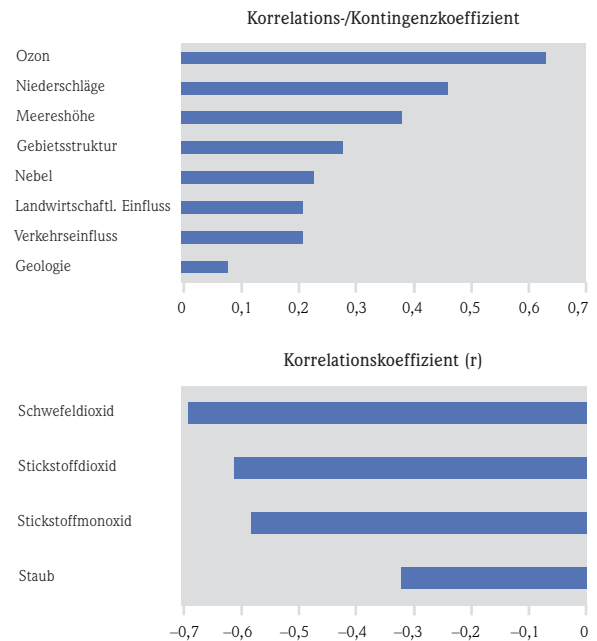


Abb. 5: Korrelationen zwischen den Luftgütwerten und anderen Umweltparametern.

Paradox erscheint die positive Korrelation zwischen Ozon und den Luftgütwerten. Sie ist allerdings nur eine scheinbare: Während die N-Verbindungen und SO_2 die höchsten Konzentrationen in der Regel am Ort ihrer Entstehung aufweisen (z. B. in Ballungsgebieten), finden sich hohe O_3 -Werte auf Grund ihrer besonderen Entstehungsweise im Allgemeinen eher in ländlichen Gebieten – und dies bei trocken-warmer Witterung. Da die wechselfeuchten Flechten unter solchen Umweltbedingungen nicht stoffwechseln, tritt eine ozonbedingte Schädigung nicht auf. Die scheinbar positive Korrelation zwischen O_3 und den LGW ist in Wirklichkeit also auf die negative Korrelation zu den N-Verbindungen und SO_2 zurückzuführen.

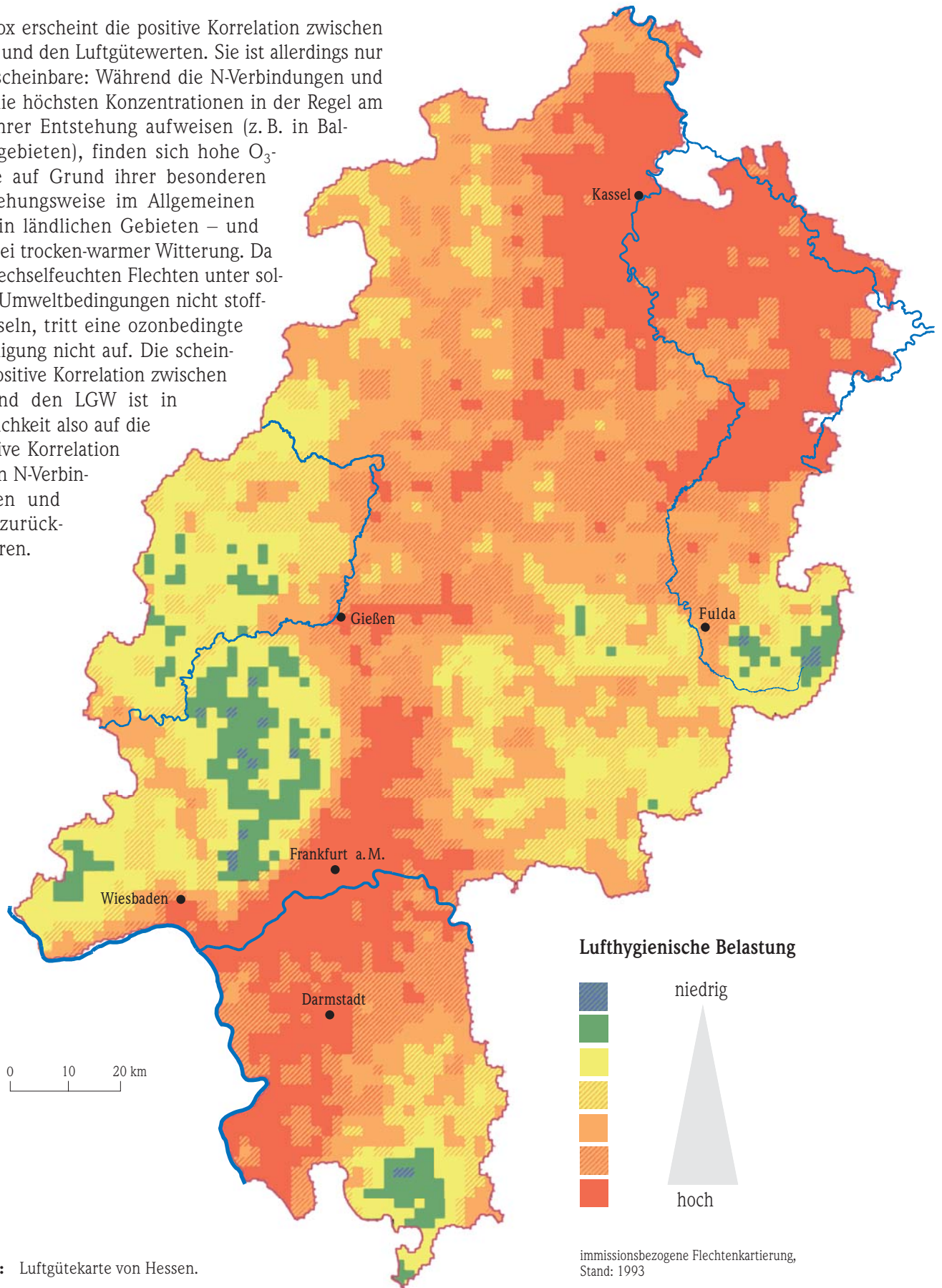


Abb. 6: Luftgütekarte von Hessen.

immissionsbezogene Flechtenkartierung,
Stand: 1993

Die deutliche Beziehung zwischen dem Flechtenvorkommen und der Schwefeldioxidbelastung lässt sich auch anhand eines Vergleiches zwischen den Abbildungen 6 (Luftgütekarte) und 7 (SO₂-Konzentrationen) belegen: Beide Karten zeigen ein großes Maß an Übereinstimmung (das um so mehr überrascht, als Flechten ja auch noch von anderen Luftverunreinigungen negativ beeinflusst werden). Im dargestellten Beispiel ergänzen sich die technisch gemessenen und die biologisch gewonnenen Erkenntnisse in idealer Weise.

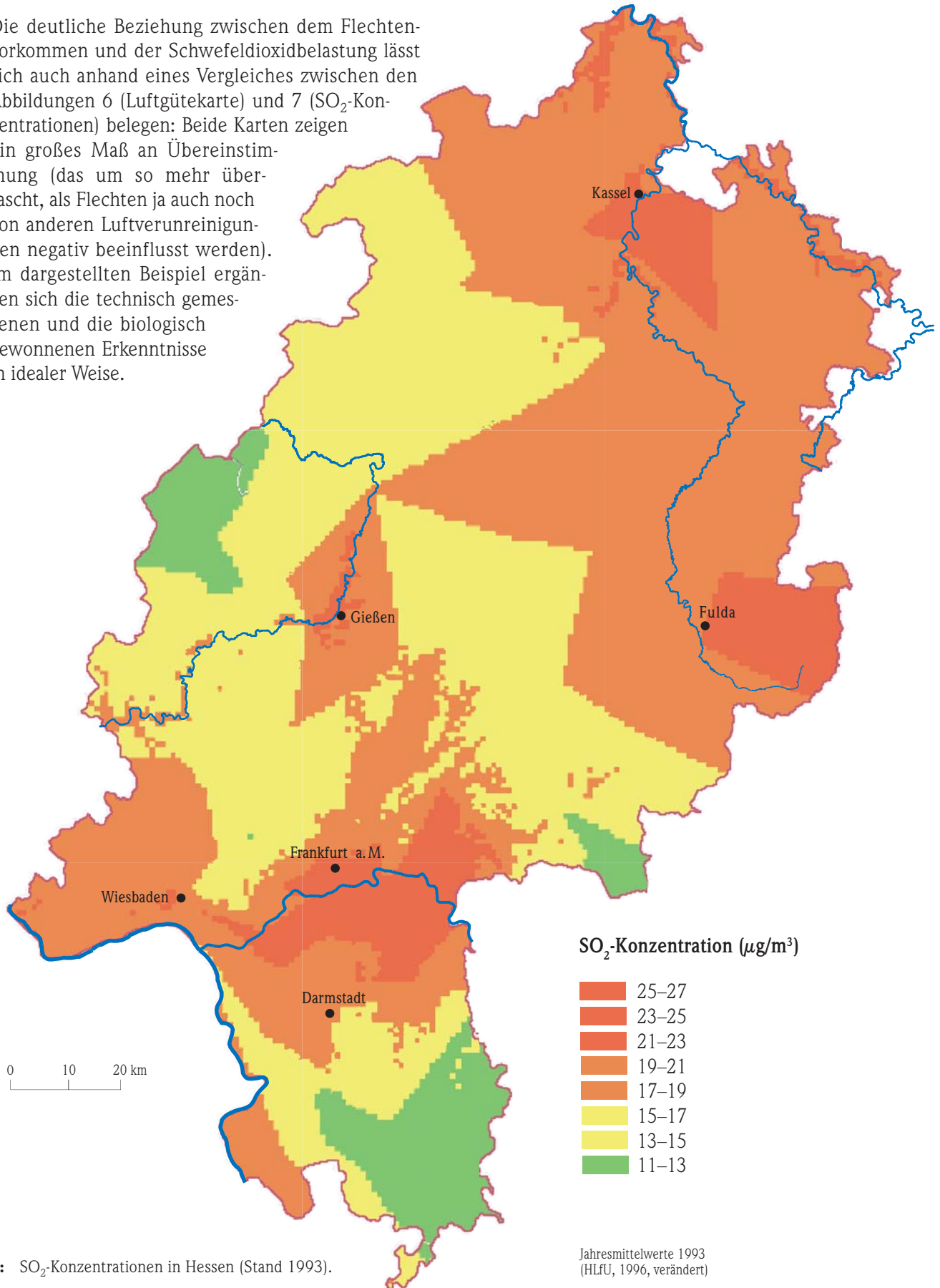


Abb. 7: SO₂-Konzentrationen in Hessen (Stand 1993).

3 Immissionsbezogene Flechtenkartierungen in Wetzlar/Gießen (Vergleich zwischen den Erhebungen von 1970, 1985, 1995 und 2005)

Zwischen 1970 und 2005 wurden in den mittelhessischen Städten Wetzlar und Gießen mehrfach immissionsbezogene Flechtenkartierungen durchgeführt. Die Methodik der Flechtenaufnahme erfolgte weitgehend nach den Vorgaben der alten Flechtenkartierungsrichtlinie (VDI 3799, 1, 1995), wie sie im vorigen Kapitel beschrieben wurde.

Von der Mehrzahl der Kartierungen lagen noch die Grunddaten vor, so dass sie nach der aktuellen VDI-Kartierungsrichtlinie (VDI 3957, Blatt 13, 2005) ausgewertet und dadurch vergleichbar gemacht werden konnten. Lediglich die Aufnahme von 1970 war methodisch andersartig durchgeführt worden, so dass hier nur eine eingeschränkte Vergleichbarkeit vorlag.

3.1 Methoden

Die neue VDI-Richtlinie berücksichtigt die Tatsache, dass die explosionsartige Zunahme der Flechtenviel-

falt der letzten beiden Jahrzehnte nicht allein auf die drastische Reduzierung des toxischen Schwefeldioxides seit den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts zurückzuführen ist. Die Zunahme der Flechtenarten und ihrer Häufigkeit (Diversität) wird darüber hinaus auch der Tatsache zugeschrieben, dass verstärkt Eutrophierungszeiger auftreten, die durch luftgetragene Stickstoffverbindungen (v. a. Ammoniak) begünstigt werden. Da Eutrophierung negative Auswirkungen auf die pflanzliche und tierische Artenvielfalt in Ökosystemen hat, wird das Auftreten eutrophierungstoleranter Flechten negativ bewertet.

Folglich werden in der aktuellen VDI-Richtlinie die Eutrophierungszeiger den übrigen Arten (Referenzarten – zeigen günstige lufthygienische Bedingungen an) gegenüber gestellt.

Die Diversität beider Gruppen wird in jeder Messfläche (ca. 10 Bäume) getrennt erfasst und bei der Auswertung getrennt bewertet (siehe Tab. 1).

Tab. 1: Erläuterungen zur Bewertungsmatrix.

	Bewertung der Luftgüte ohne Berücksichtigung eutrophierender Luftschadstoffe		Bewertung eutrophierender Luftschadstoffe
5	sehr hohe Luftgüte	5	sehr starker Einfluss eutrophierender Verbindungen
4	hohe Luftgüte	4	starker Einfluss eutrophierender Verbindungen
3	mittlere Luftgüte	3	mittlerer Einfluss eutrophierender Verbindungen
2	geringe Luftgüte	2	geringer Einfluss eutrophierender Verbindungen
1	sehr geringe Luftgüte	1	sehr geringer Einfluss eutrophierender Verbindungen

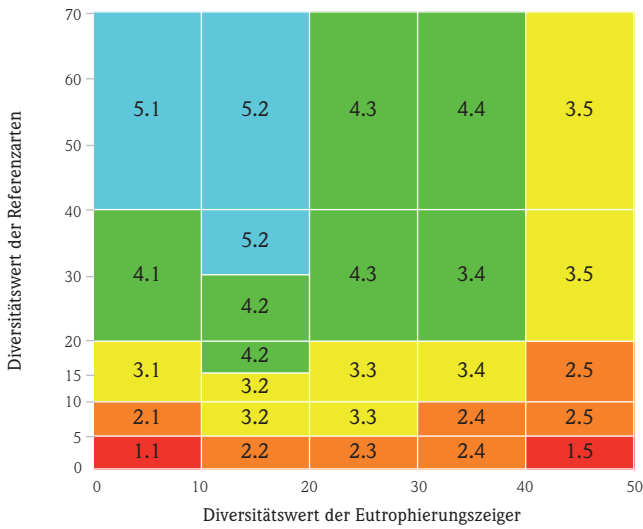


Abb. 8: Bewertungsmatrix zur Ermittlung der Luftgüte anhand der Kombination der Diversitätswerte der Referenzarten und der Eutrophierungszeiger.

Der Luftgüteindex wird anhand einer Bewertungsmatrix ermittelt (siehe Abb. 8).

Hierzu werden die Diversitätswerte der Referenzarten in der Bewertungsmatrix auf der Ordinate und die Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger auf der Abszisse aufgetragen. Die Bewertung des Quadrates, in dem der Schnittpunkt der beiden Diversitätswerte einer Messfläche zu liegen kommt, wird für die Messfläche übernommen und mit einer Farbe belegt.

Der Luftgüteindex setzt sich aus zwei Ziffern zusammen, die durch einen Punkt getrennt sind. Die erste Ziffer des Indexes entspricht der Luftgüte und ist mit den Farben gekoppelt, die zweite Ziffer symbolisiert das Vorkommen von Eutrophierungszeigern.

Die verbale Beschreibung des Luftgüteindex wird in Tab. 2 an einigen Beispielen erläutert:

Tab. 2: Verbale Beschreibung des Luftgüteindexes.

Luftgüteindex	Bewertung
Luftgüteindex 1.1	Sehr geringe Luftgüte bei sehr geringem Einfluss eutrophierender Verbindungen
Luftgüteindex 1.5	Sehr geringe Luftgüte bei sehr starkem Einfluss eutrophierender Verbindungen
Luftgüteindex 5.1	Sehr hohe Luftgüte bei sehr geringem Einfluss eutrophierender Verbindungen

Ergänzend zur Flechtenkartierung wurden auch pH-Werte an Borken gemessen.

3.2 Ergebnisse und Diskussion

3.2.1 pH-Werte von Baumborken

Die Ergebnisse der Messungen lassen eine drastische Erhöhung der Werte bei allen untersuchten Baumarten und auch bei beiden Städten im Vergleich zwischen der ersten Erhebung und 2005 erkennen (Abbildungen 9 und 10).

Die hier dargestellte Erholung der pH-Werte von Lindenborken nach Rückgang der sauren Schadgase ist auch bei anderen Baumarten zu beobachten.

Flechten als Anzeiger der Luftgüte und des Klimawandels

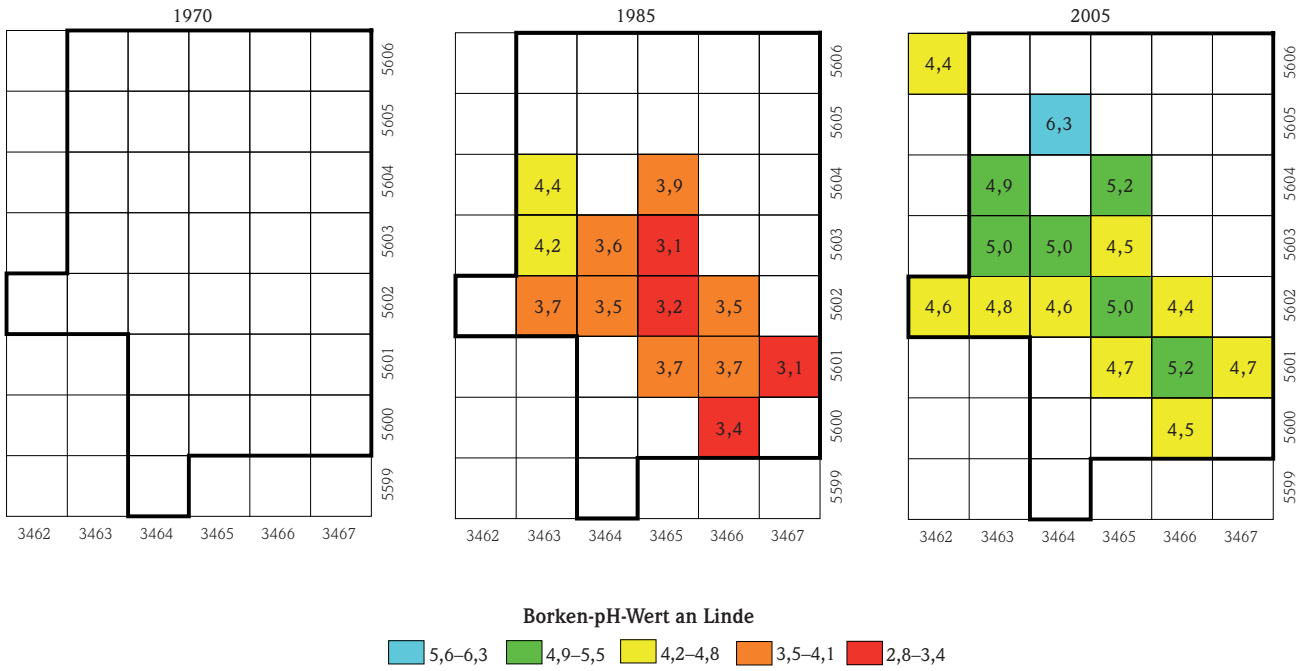


Abb. 9: Entwicklung und räumliche Verteilung der pH-Werte von Lindenborken in Wetzlar.

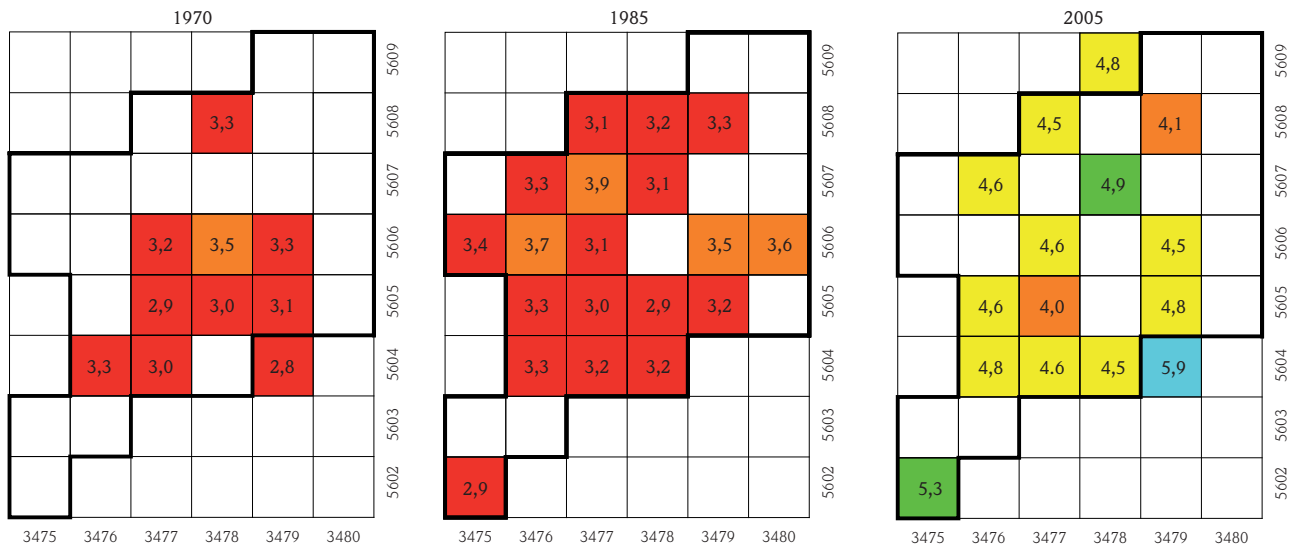


Abb. 10: Entwicklung und räumliche Verteilung der pH-Werte von Lindenborken in Gießen.

In Gießen, wo bereits von 1970 Messungen von pH-Werten vorliegen, ist zu erkennen, dass der Anstieg zwischen 1970 und 1985 unbedeutend war; seit 1985 dagegen sind die pH-Werte deutlich höher geworden. Dieses Phänomen lässt sich gut mit der Entwicklung der Schwefeldioxidkonzentrationen erklären (siehe Abb. 11): Während die SO₂-Werte bis 1987 hoch und annähernd konstant sind, fallen sie nach diesem Zeitpunkt aufgrund verbesserter Maßnahmen zur Verminderung der Immissionsbelastung deutlich ab. Seither hat der Niederschlag die Säuren aus den Borken ausgewaschen, so dass fast wieder natürliche pH-Werte vorliegen.

Zwischen der Entwicklung der pH-Werte von Baumborken in Wetzlar und in Gießen besteht ein Unterschied: In Wetzlar war die Ansäuerung der Borken trotz vergleichbarer SO₂-Immissionen 1985 deutlich geringer als in Gießen. Dieses Phänomen lässt sich mit einer Besonderheit in der Wetzlarer Immissions-situation erklären.

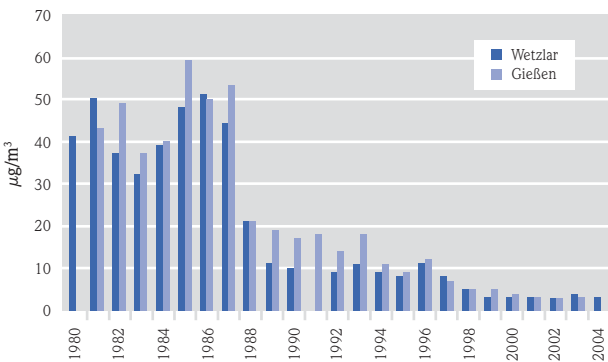


Abb. 11: Entwicklung der Schwefeldioxidgehalte in Wetzlar/Gießen (Jahresmittelwerte).

Dort gibt es neben den sauren Immissionen seit jeher auch einen Kalkstaubemittenten. Die basischen Stäube haben selbst 1985 schon einen Großteil der SO₂-Immissionen neutralisiert, was zu einer geringeren Ansäuerung der dortigen Baumborken führte. Nach Rückgang der sauren Schadgase und gleichzeitiger Verringerung der Kalkstaubimmissionen (Abb. 12) haben sich die Verhältnisse zwischen beiden Städten 2005 angenähert.

Da viele Flechten eine enge Substratbindung besitzen und diese sich insbesondere auch auf den pH-Wert bezieht, wird auf die hier geschilderten Entwicklungen der Säuregehalte der Baumborken bei der Diskussion über die Ursachen der zeitlichen Ver-

änderung des Flechtenbewuchses noch einzugehen sein.

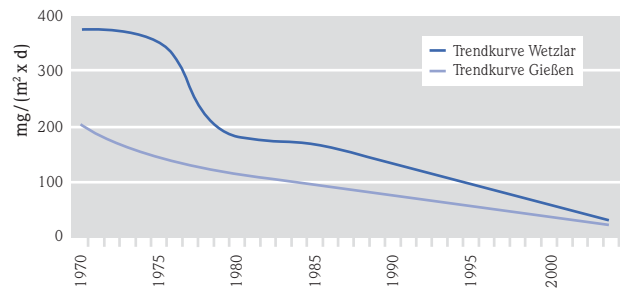


Abb. 12: Entwicklung der Staubdeposition in Wetzlar und Gießen.

Betrachtet man die räumliche Verteilung der pH-Werte an Linden (Abb. 9 und 10), so fällt in beiden Städten noch 1985 eine Tendenz zu niedrigen Werten in den Stadtzentren auf (Ursache: Versauerung durch Hausbrand). Im Jahr 2005 ist diese Inhomogenität wegen verstärkter Umstellung der Haushalte auf schwefelarme Brennstoffe verschwunden, gleichzeitig sind die pH-Werte überall erhöht.

3.2.2 Zeitliche Entwicklung der lufthygienischen Situation von Wetzlar und Gießen

Die Flechten-Artenzahlen (Abb. 13) lassen über den Zeitraum 1970–1980–1985–1995–2005 einen stetigen Anstieg erkennen. Diese Beobachtung deutet auf eine insgesamt verbesserte lufthygienische Situation hin. Während bei den ersten beiden Untersuchungen (aus methodischen Gründen) nicht zwischen den Wetzlarer und Gießener Artenzahlen unterschieden werden kann, zeigt sich ab 1985 ein Unterschied zwischen der Wetzlarer und der Gießener Artenzahl. Dieses Ungleichgewicht zu Ungunsten Gießens bleibt bis 2005 erhalten, allerdings mit jüngst deutlich abgeschwächter Intensität; Gießen holt bezüglich seiner Luftgüte den Rückstand gegenüber Wetzlar allmählich auf.

Dank der eingangs erwähnten Tatsache, dass die alten Basisdaten früherer Kartierungen noch vorhanden waren bzw. wieder zugänglich gemacht werden konnten, waren Vergleiche mit diesen früheren Untersuchungen möglich. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden hier nur die Ergebnisse nach der neuen VDI-Richtlinie von 2005 wiedergegeben. Des Weiteren werden nur solche Messflächen vergli-

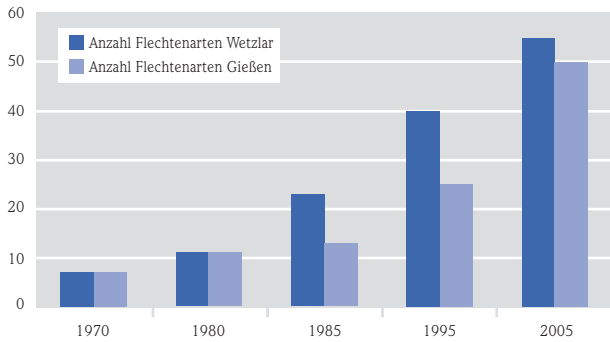


Abb. 13: Entwicklung der Artenzahlen in Wetzlar und Gießen zwischen 1970 und 2005.

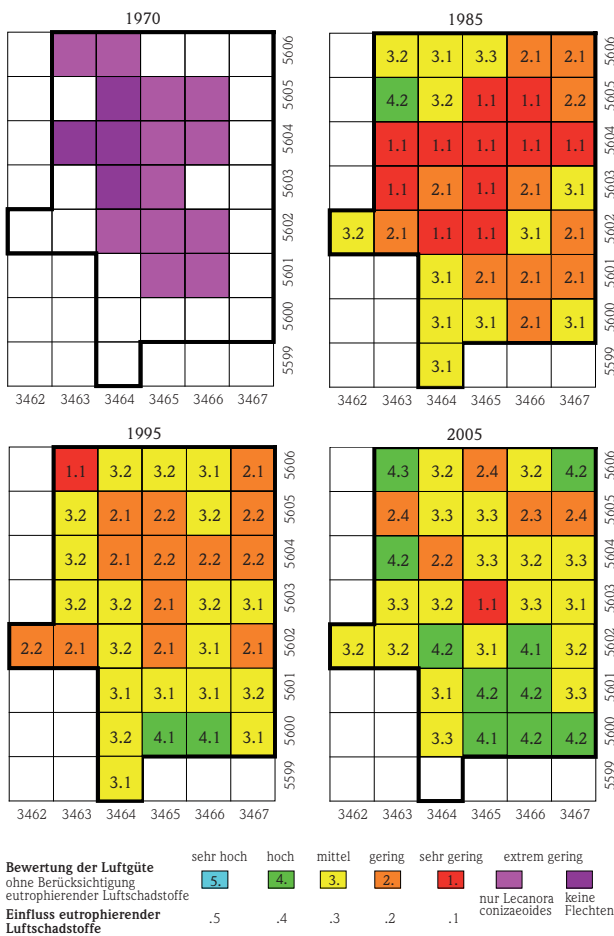


Abb. 14: Entwicklung der Luftgüteindizes in Wetzlar (1970–2005).

chen, die in allen Untersuchungsjahren miterfasst wurden.

Abbildung 14 zeigt die Entwicklung in Wetzlar: In der Zeit um 1970 war die Immissionsbelastung sowohl durch Schwefeldioxid als auch durch Kalkstäube

so extrem hoch (Abb. 11, 12), dass im Bereich des Industriereviere im nördlichen Wetzlar überhaupt keine Flechten vorhanden waren; es existierte dort eine „Flechtenwüste“. Derartig ungünstige Verhältnisse konnten allerdings auch in Frankfurt ausgemacht werden, wo die Flechtenwüste sich zu damaliger Zeit über wesentlich größere Flächen der Innenstadt erstreckte. Im Anschluss an diese flechtenfreie Zone kam damals fast im gesamten Wetzlarer Stadtgebiet nur *Lecanora conizaeoides* vor. Diese Flechte zeigt extrem hohe Belastungszustände an und darf deshalb nur berücksichtigt werden, wenn sie allein vorkommt. Eine weitere Differenzierung der damaligen lufthygienischen Situation außerhalb der „Lecanora-Zone“ ist nicht möglich, weil 1970 nach einer andersartigen Methode kartiert worden war.

1985 überwiegen zwar noch die Farben Rot und Orange, es finden sich jedoch im Außenbereich des Untersuchungsgebietes auch schon Messflächen mit mittlerer und im NW sogar eine Fläche mit hoher Luftgüte: Die deutliche Verbesserung der lufthygienischen Situation ist unverkennbar. Zu diesem Zeitpunkt haben noch fast alle untersuchten Teilareale den Eutrophierungswert 1, was auf einen sehr geringen Einfluss düngender Schadstoffe hinweist (mittlerer Eutrophierungsgrad aller Messflächen: 1,2).

1995 findet sich lediglich im äußersten NW noch eine Fläche, die rot ist. Ansonsten überwiegen geringe bis mittlere Luftgüteverhältnisse; im Süden gibt es bereits zwei Flächen mit hohen Luftgüteindizes. Die Schwerpunkte der Belastung befinden sich noch immer im Bereich der Kernstadt bzw. des nördlich gelegenen Industriereviere. Der mittlere Eutrophierungsgrad steigt von 1,2 auf 1,5; die Belastung mit luftgetragenen Düngestoffen nimmt also leicht zu.

2005 hat sich die Situation nochmals verbessert; bereits 10 Flächen im Untersuchungsgebiet Wetzlar sind der Farbe Grün zugeordnet, was auf eine hohe Luftgüte in diesen Bereichen hinweist. Dem steht allerdings auch ein unverkennbarer Anstieg der Eutrophierungszeiger gegenüber; der dies indizierende Wert steigt auf 2,3. Hohe Eutrophierungswerte finden sich verstärkt im Norden der Stadt.

Eine prinzipiell ähnliche Entwicklung wie in Wetzlar ist auch in Gießen zu erkennen, wenn auch auf niedrigerem Niveau (Abb. 15): Zwar gibt es hier 1970 keine flechtenfreien Messflächen, große Teile des

Untersuchungsgebietes werden aber lediglich von der toxitoleranten und acidophytischen *Lecanora conizaeoides* besiedelt.

1985 haben sich die Verhältnisse deutlich verbessert, wenngleich noch immer zwei Flächen als extrem belastet anzusehen sind und auch nur zwei Quadrate der Farbe Orange und nur eines Gelb zuzuordnen sind. Eutrophierungsanzeiger sind außerordentlich selten; der mittlere Eutrophierungswert liegt bei 1,0.

Die weitere Verbesserung der lufthygienischen Verhältnisse bis zum Jahr 1995 geht nicht so rasch und umfassend vonstatten wie dies bei Wetzlar zu beobachten war. Andererseits erreicht der mittlere Eutrophierungsindex mit einem Wert von 1,3 einen niedrigeren Wert als in Wetzlar.

Im Jahr 2005 hat Gießen gegenüber Wetzlar weiter aufgeholt: Knapp 2/3 aller untersuchten Mess-

flächen sind nur noch mittel bis gering belastet (in Wetzlar sind dies zum gleichen Zeitpunkt etwa 80 % aller Vergleichsflächen). Der mittlere Eutrophierungsindex ist auf 1,6 gestiegen, bleibt aber deutlich unter dem von Wetzlar.

3.2.3 Entwicklungstendenzen einzelner Flechtenarten von 1985 bis 2005

Bei der Entwicklung der Einzelarten zwischen 1985 und 2005 ergaben sich einige charakteristische Unterschiede, die anhand typischer Beispiele dargestellt werden sollen.

Lecanora conizaeoides (Abb. 16): Diese toxitoleranteste und stark acidophytische Art zeigt den Rückgang saurer Immissionen (von denen sie offensichtlich profitiert) am deutlichsten auf. Sowohl in Wetzlar wie auch in Gießen war sie zu Zeiten hoher SO₂-Belastung die häufigste – und zuweilen einzige – Flechtenart. Mit dem Rückgang des Schwefeldioxids, der in Wetzlar und Gießen annähernd gleichsinnig verlief, nahm sie 1995 ab; in Wetzlar jedoch wesentlich stärker als in Gießen. Im Jahr 2005 kann man sie in Wetzlar kaum noch finden und auch in Gießen ist der weitere Rückgang unverkennbar. Das Verhalten dieser Flechte korreliert sehr gut mit der Verminderung der SO₂-Konzentration im hier dargestellten Zeitraum. Der stärkere Rückgang der Art in Wetzlar lässt sich folgendermaßen interpretieren: War 1985 die SO₂-Konzentration noch so stark, dass die basisch wirkenden Kalkstäube kaum mindernd auf die Versauerung der Baumborken wirken konnten, so erhöhten sich danach mit dem Rückgang des sauren Schadgases in Wetzlar die pH-Werte schneller und intensiver, weil der Kalkstaub seine Wirkung nun stärker entfalten konnte.

Auffallend ist die räumliche Verteilung in Wetzlar: Während die Flechte im stärker durch Kalkstaub belasteten Norden und Westen des Untersuchungsgebietes seit 1995 immer selten war, sagen ihr die etwas niedrigeren pH-Werte der Bäume im höher gelegenen Südteil der Stadt offenbar eher zu.

Phaeophyscia orbicularis (Abb. 17): Die nitrophile und eutrophierungstolerante Spezies kam 1985 wegen ihrer geringeren Toleranz gegenüber sauren Schadgasen nur mit geringer Frequenz vor. Nach dem Rückgang des SO₂ und dem verstärkten Auftre-

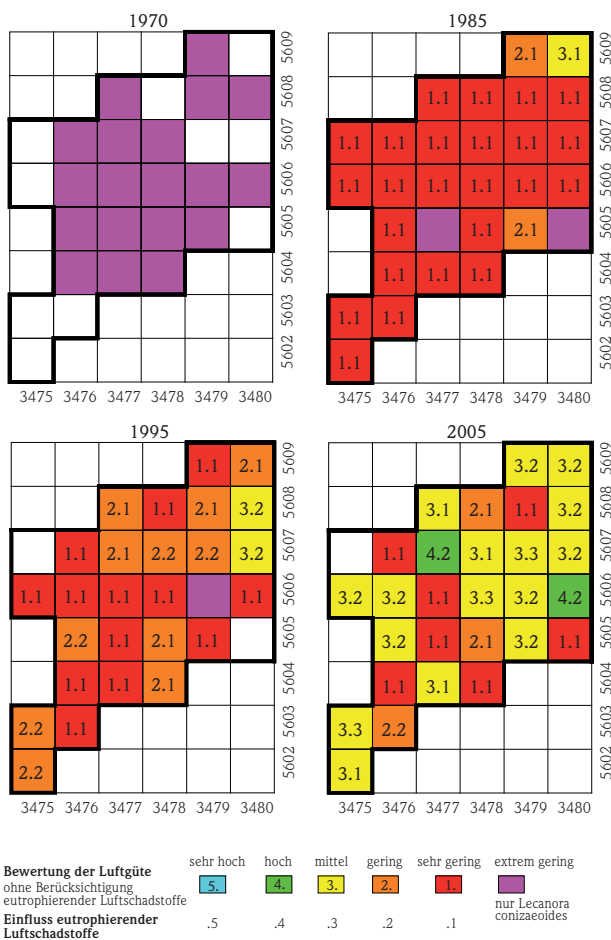


Abb. 15: Entwicklung der Luftgüteindizes in Gießen (1970–2005).

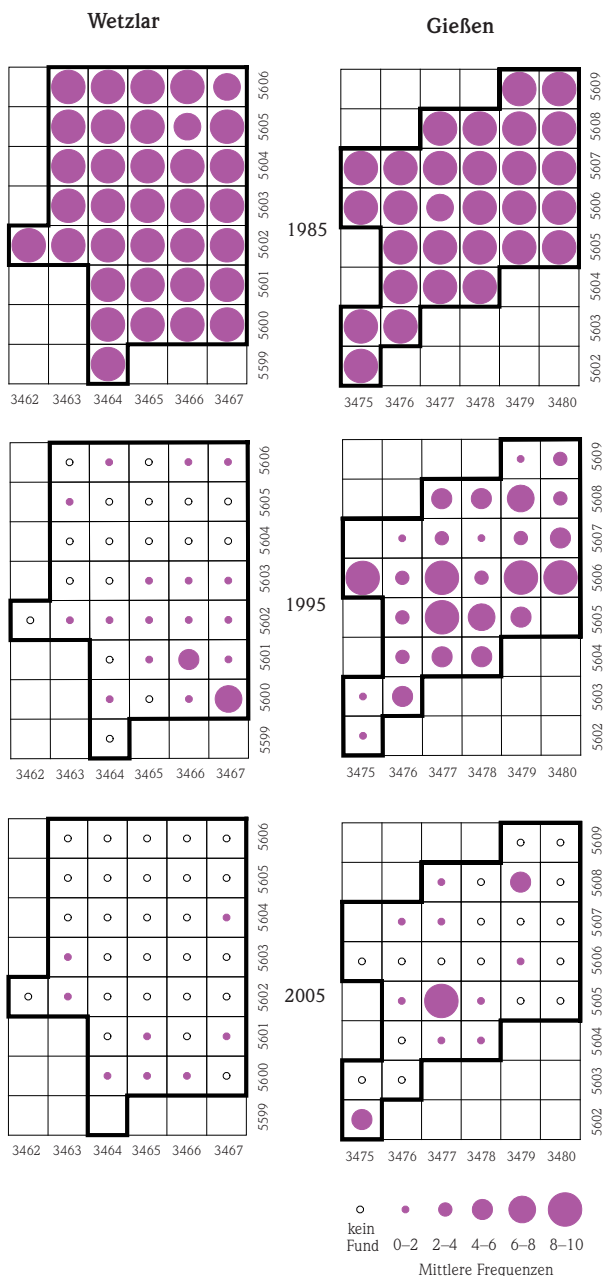


Abb. 16: Verbreitung und Frequenz von *Lecanora conizaeoides* (1985–2005).

ten eutrophierender Stoffe konnte sie sich stark ausbreiten und verdrängt inzwischen teilweise Referenzarten von den Baumborken, weil sie die Baumstämme im Untersuchungsbereich flächendeckend besiedelt.

2005 hat sie sich in vielen Messflächen etabliert und auch die Frequenz (Häufigkeit am Baum) nimmt deutlich zu. Ihre Vorliebe für höhere pH-Werte manifestiert sich wiederum in Wetzlar deutlich: Von Beginn der Untersuchung an bevorzugte sie den durch

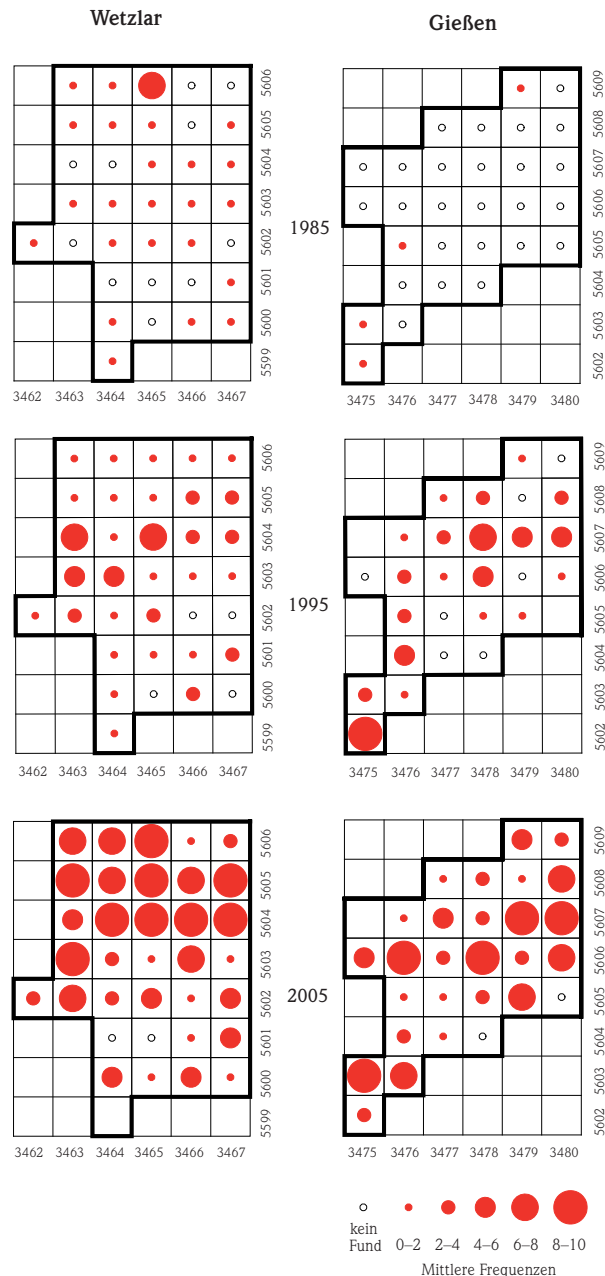


Abb. 17: Verbreitung und Frequenz von *Phaeophyscia orbicularis* (1985-2005).

Kalkstaub beeinflussten Norden der Stadt; ihr Verbreitungsmuster ist komplementär zu dem des zuvor besprochenen Acidophyten *Lecanora conizaeoides*.

Parmelia sulcata (Abb. 18): Wenngleich das Entwicklungsmuster der folgenden Art dem der vorigen auf den ersten Blick zu gleichen scheint, ergeben sich doch beim näheren Hinsehen Unterschiede. *P. sulcata* meidet deutlicher – und einschließlich 2005 – die Stadtzentren. In Wetzlar sind die Existenzbedingungen für sie offensichtlich im Süden

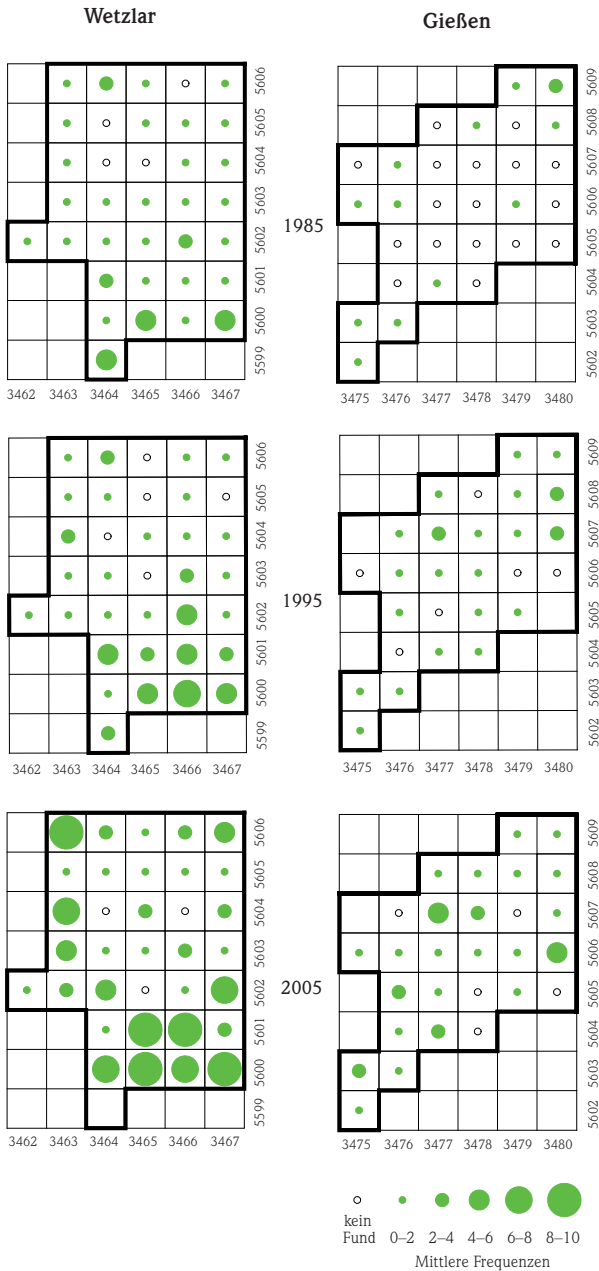


Abb. 18: Verbreitung und Frequenz von *Parmelia sulcata* (1985–2005).

besser, woraus man acidophytische Merkmale ableiten könnte. Während aber die Acidophyten im Verlauf des Untersuchungszeitraumes mehr oder weniger deutlich zurückgehen, nimmt diese Art in beiden Städten zu.

P. sulcata gehört zu jener artenreichen Flechtengruppe, die bezüglich des pH-Wertes ihrer Substrate mittlere Verhältnisse bevorzugt, eutrophierende Luftfremdstoffe nur mäßig verträgt und gegenüber sauren Immissionen ebenfalls eine mittlere Empfind-

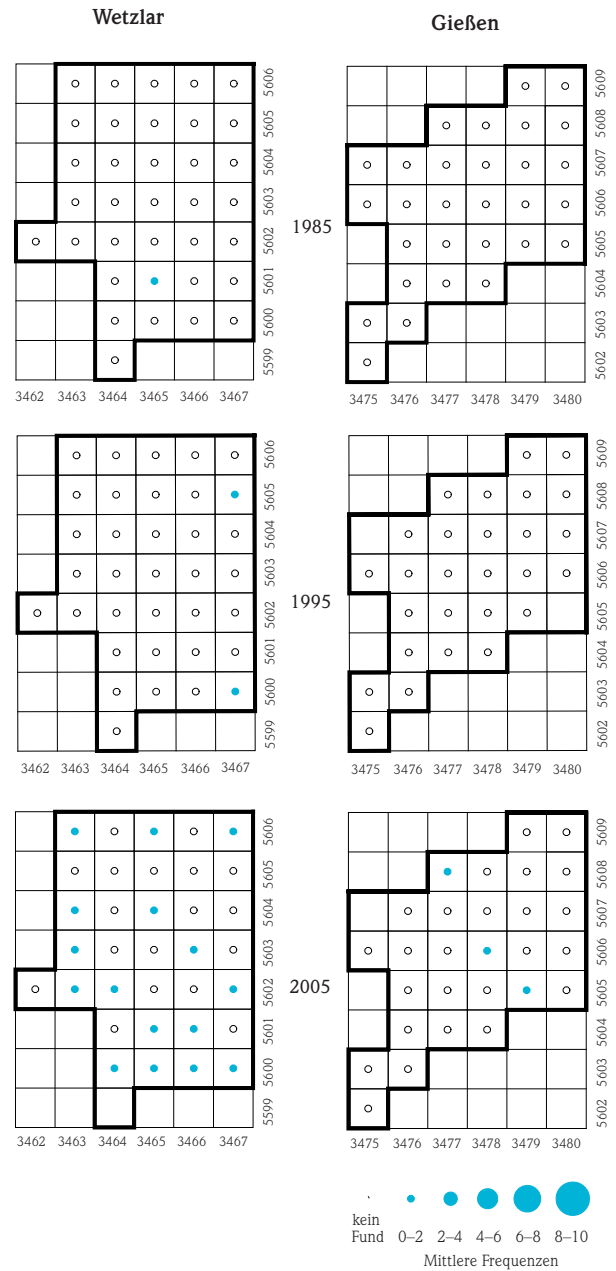


Abb. 19: Verbreitung und Frequenz von *Ramalina farinacea* (1985–2005).

lichkeit besitzt. Sie ist also ein typischer Vertreter der **Referenzarten**, deren Vorkommen günstige lufthygienische Bedingungen widerspiegelt.

Ramalina farinacea (Abb. 19): Einen noch höheren Luftreinheitsgrad zeigen die Vertreter der letzten Gruppe an. Sie hatten bis 1995 wegen starker Immissionsbelastung in Wetzlar wie in Gießen noch keine Existenzmöglichkeiten, besiedeln aber seither – wenn auch bisher nur mit wenigen Exemplaren – beide Städte. *R. farinacea* ist ein typischer Vertreter

dieser hinsichtlich der Luftgüte recht anspruchsvollen Arten. Sie gehört zu den wenigen Strauchflechten, die bisher zurückgekehrt sind.

Abb. 20 zeigt die Entwicklung der Flechtenarten in Wetzlar und Gießen noch einmal zusammenfassend: 1970, in Zeiten extremer Immissionsbelastung, fand sich in beiden Städten eine nur minimale Artenzahl und diese bestand überwiegend aus „wenig empfindlichen“ bis „mittel empfindlichen“ Spezies. 1980 hatte sich zwar bereits die Artenzahl geringfügig erhöht, jedoch entstammten alle Flechten noch immer den beiden zuvor genannten Empfindlichkeitskategorien. Allerdings ist hier bereits ein Trend weg von den „wenig empfindlichen“ hin zu den „mittel empfindlichen“ festzustellen.

1985 treten zum ersten Mal Vertreter aus der Kategorie der „ziemlich empfindlichen“ Flechten hinzu, in Wetzlar sind die „wenig empfindlichen“ nicht mehr die stärkste Gruppe.

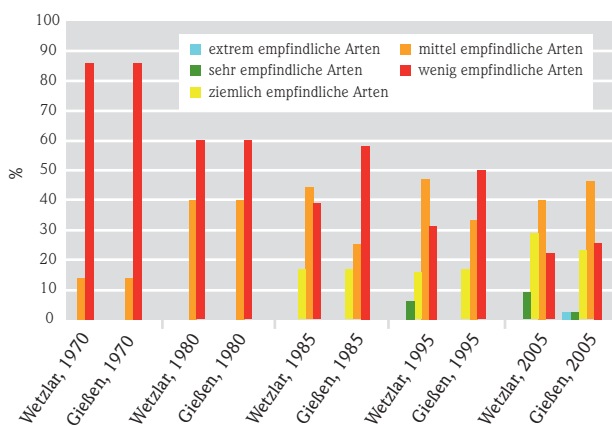


Abb. 20: Einwanderung unterschiedlich empfindlicher Flechtenarten in Wetzlar bzw. Gießen.

1995 finden sich in Wetzlar schon Vertreter aus der Gruppe der „sehr empfindlichen“ Arten; auch in Gießen sind Verbesserungstendenzen zu erkennen.

2005 nehmen jene Arten, die ungünstige lufthygienische Bedingungen anzeigen, prozentual weiter ab. Im Gegenzug gewinnen die „sehr empfindlichen“ Spezies an Bedeutung. In Gießen ist sogar erstmals ein Vertreter aus der Kategorie der „extrem empfindlichen“ Flechten vorhanden.

Das Gebiet von Wetzlar zeigt bei allen Vergleichsparametern und zu allen untersuchten Zeiten günstigere Voraussetzungen für die Entfaltung der immisionsempfindlichen Flechten auf und scheint somit bessere lufthygienische Bedingungen zu besitzen. Diese Beobachtung steht im Gegensatz zu den vom HLUG gemessenen Werten: Mit Ausnahme der früher in Wetzlar sehr hohen Grobstaubimmissionen ähnelt sich die Immissionsentwicklung beider Städte. Diese Feststellung scheint den Wert bioindikativer Messverfahren in Frage zu stellen. In Wirklichkeit trifft jedoch genau das Gegenteil zu: Während Gießen stets überwiegend mit phyto- und auch humantoxischen SO_2 -Immissionen konfrontiert war, gab es in Wetzlar früher zusätzlich zum sauren Schadgas eine starke Kalkstaubemission. Diese wirkte neutralisierend (und damit minimierend) auf das gefährliche Schwefeldioxid. Aus lufthygienischer Sicht war daher Wetzlar – trotz seiner starken Industrialisierung – als weniger belastet einzustufen. Derartige antagonistische Wirkungen lassen sich nicht durch Messgeräte (die immer nur eine Immissionskomponente erfassen) feststellen, sondern allein durch Bioindikatoren, die auf den Gesamtkomplex der biologisch wirksamen Immissionen reagieren.

3.2.4 Zeigerwerte

Bei Erhebungen im Gelände hat sich gezeigt, dass jede Flechtenart eine bestimmte Toleranz gegenüber abiotischen Umweltfaktoren besitzt (z. B. gegenüber dem Säure- oder Nährstoffgehalt ihres Wachstumssubstrates). Demzufolge bevorzugen sie ökologische Gegebenheiten, die diesen Ansprüchen genügen und meiden solche, die ihre diesbezüglichen Bedürfnisse nicht befriedigen. Im Umkehrschluss kann man folgerichtig aus dem Vorkommen einer Art mit spezifischen Umweltansprüchen das Vorhandensein und die Quantität ebendieser Faktoren ableiten; die Flechten wurden gewissermaßen auf jenen Faktor „geeicht“, dessen Vorhandensein und Stärke sie anzeigen. Bei der Verwendung von Flechten als Zeiger für Umwelteigenschaften sollte man sich jedoch darüber im Klaren sein, dass ihr Aussagewert sich auf die durchschnittliche und langfristige Qualität und Quantität der untersuchten Standorte bezieht und dass das Zusammenwirken mehrerer Umweltfaktoren das Ergebnis beeinflussen kann.

Das ökologische Verhalten wird bezüglich jedes Umweltfaktors nach einer neunstufigen Skala bewertet, wobei 1 das geringste und 9 das größte Ausmaß des betreffenden Faktors bedeutet.

Abb. 21 zeigt den Anstieg der Reaktionszahlen, die eine Aussage über den Säuregehalt des Flechtensubstrates ermöglichen. Wie in den Abbildungen 9 und 10 dargestellt wurde, sind die pH-Werte der Baumrinden seit 1985 infolge der nachlassenden Versauerung allmählich fast wieder auf vorindustrielle Werte angestiegen und erlauben somit die Wiederwanderung subneutrophytischer und neutrophytischer Flechtenarten. Wie die Reaktionszahlen belegen, erfolgte der stärkste Anstieg zwischen 1985 und 1995, was sich gut mit den kurz zuvor drastisch gesunkenen SO_2 -Konzentrationen erklären lässt (siehe Abb. 11).

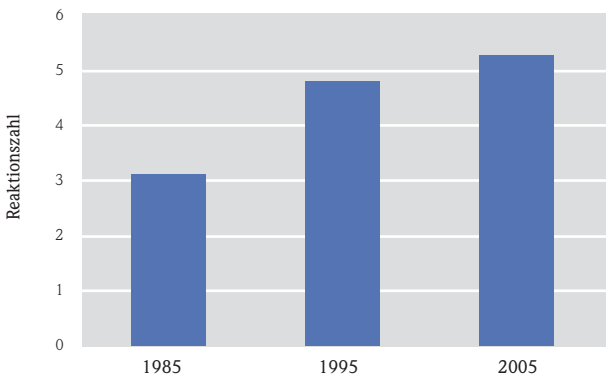


Abb. 21: Entwicklung der mittleren Reaktionszahlen in Wetzlar und Gießen (1985–2005).

Während die Flechten den Rückgang der sauren Immissionen eindeutig dokumentieren, scheint dies bei den eutrophierend wirkenden Luftfremdstoffen nicht der Fall zu sein. Infrage kommen hier vor allem luftgetragene Stickstoffverbindungen. Deren Konzentrationen zeigen bei den technischen Messungen von NO und NO_2 in beiden Städten für den in Frage kommenden Zeitraum jedoch keine wesentlichen Veränderungen.

Aus Abb. 22 geht aber hervor, dass die Veränderungen in der Flechtenzusammensetzung auch auf eine zunehmende Belastung mit eutrophierenden Luftfremdstoffen zurückzuführen sein muss. Hierfür spricht ebenfalls die offenkundige Zunahme von Eutrophierungszeigern in fast allen Messflächen über den Untersuchungszeitraum (siehe z. B. Abb. 17).

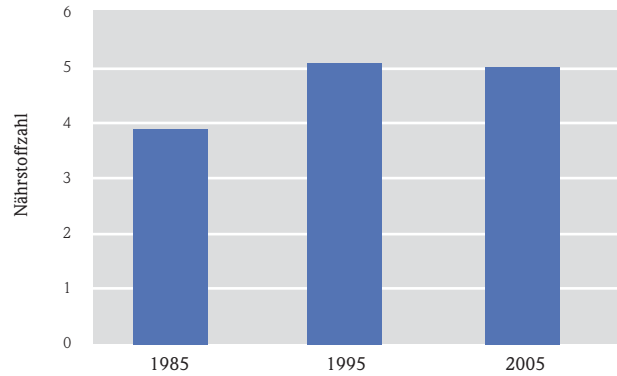


Abb. 22: Entwicklung der mittleren Nährstoffzahlen in Wetzlar und Gießen (1985–2005).

Eine denkbare Erklärung ist, dass die technisch gemessenen N-Verbindungen für die Existenz von Flechten ohne direkte Bedeutung sind. Flechten metabolisieren v. a. NO_3^- und $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$. Diese Stickstoffverbindungen werden aber wegen messtechnischer Probleme in der Regel nicht erfasst. Das Ammoniak entstammt hauptsächlich landwirtschaftlichen Quellen (Tierhaltung; Gülleausbringung). Es wird innerhalb weniger Stunden zu Ammonium oder Ammoniumsalzen abgebaut und verbleibt deshalb in der Nähe der Quelle. Die Abbauprodukte (Ammonium bzw. Ammoniumsalze) können dagegen als Aerosole über weite Strecken verfrachtet werden. Wegen dieses Transportes muss davon ausgegangen werden, dass die o. g. Verbindungen flächendeckend vorhanden sind. Während man bisher angenommen hat, dass die NH_3 -Emission aus Autoabgasen eher unbedeutend ist, gehen neue Untersuchungen von beträchtlichen Ammoniakkonzentrationen aus den Abgasen von Autos mit Katalysatoren aus.

Diese Feststellungen würden auch erklären, warum in den Städten – trotz fehlender landwirtschaftlicher Emissionen – in der Nähe stark befahrener Straßen die Diversität nitrophytischer Flechten besonders hoch ist und, von den Rändern der Straßen ausgehend, allmählich wieder abnimmt.

Abb. 23 lässt für beide Stadtgebiete einen Anstieg der Referenzarten erkennen, was für eine allgemeine Verbesserung der lufthygienischen Verhältnisse spricht. Der gleichzeitige – und sogar stärkere – Anstieg bei den Eutrophierungszeigern weist allerdings auch auf eine erhebliche Belastung durch Fremdstoffe mit düngender Wirkung hin.

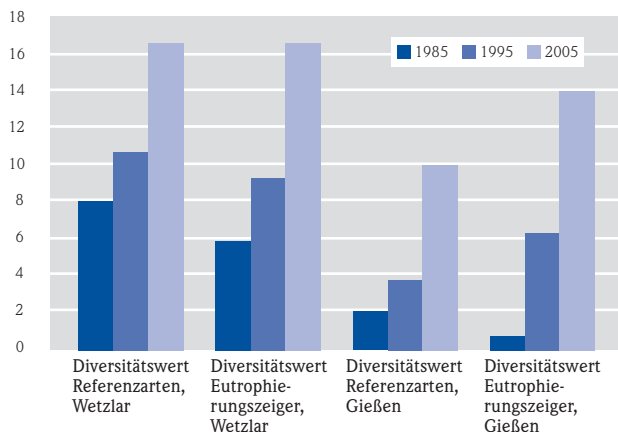


Abb. 23: Entwicklung von Referenzarten und Eutrophierungszeigern in Wetzlar und Gießen (1985–2005).

Eutrophierende Wirkungen auf die Umwelt sind negativ: Nitrophile Arten dringen in Ökosysteme ein und verdrängen dort solche Pflanzen, die nährstoffarme Böden bevorzugen; eine Verringerung der Diversität innerhalb der Lebensgemeinschaften ist die Folge. Des Weiteren kommt es zu Versauerungserscheinungen im Boden, wenn bei der Umwandlung von NH_4^+ zu NO_3^- Protonen freigesetzt werden. Wenn auch andere Luftfremdstoffe ähnliche Wirkung ausüben (z.B. NO_x und SO_2), so gilt doch Ammoniak als ein Hauptverursacher der Bodenversauerung. Eine Erniedrigung des pH-Wertes im Boden erhöht u. a. die Bioverfügbarkeit von Nährstoffen und toxischen Metallkomplexen (Ionenaustausch), was wiederum die Eutrophierung ansteigen lässt und gleichzeitig – bei hohen Konzentrationen – zu toxischen Erscheinungen führen kann.

Fazit: Die hier vorgelegten Untersuchungsergebnisse belegen die Verbesserung der lufthygienischen Situation in den beiden mittelhessischen Städten Wetzlar und Gießen; sie dürften repräsentativ für weite Teile des Bundeslandes sein.

Der Verminderung der Immissionen – v. a. im Bereich des Schwefeldioxides – steht allerdings eine Erhöhung eutrophierend wirkender Luftschadstoffe gegenüber. Im Vergleich zu stark landwirtschaftlich orientierten Gebieten („Gülegürtel“ in Nordwestdeutschland und den Niederlanden) sind die Verhältnisse in Hessen noch nicht besorgniserregend: Die Ausbreitung nitrophiler Arten ist dort wesentlich gravierender.

Dennoch sollte dem Problem weiterhin Beachtung geschenkt werden, um negative Auswirkungen auf schützenswerte Ökosysteme zu vermeiden.

Eine Verbesserung der lufthygienischen Verhältnisse in Mittelhessen ist möglich, wie Vergleiche mit Erhebungen des mittelhessischen Flechteninventars vergangener Jahrhunderte belegen: Es werden dort Arten beschrieben, die bis heute nicht zurückgekehrt sind. Darunter befinden sich Vertreter extrem immissionsempfindlicher Gattungen.

Beobachtungen des zeitlichen Verlaufes der Flechtenentwicklung lassen zwischen 1985 und 1995 einen starken Zuwachs in der Frequenz bzw. der Rekolonisierung durch Rückeinwanderer erkennen; seit 1995 verlaufen beide Prozesse in deutlich abgeschwächter Weise. Offensichtlich beginnt sich ein gewisser stabiler Zustand einzustellen.

3.3 Zusammenfassung

Im Jahr 2005 wurden in den beiden mittelhessischen Städten Wetzlar und Gießen immissionsbezogene Flechtenkartierungen durchgeführt. Die Städte waren bereits 1970, 1985 und 1995 unter dem gleichen Aspekt auf ihren Flechtenbewuchs untersucht worden. Wengleich die Methodik der einzelnen Untersuchungen sich unterschied, konnten die Ergebnisse ab 1985 dennoch direkt miteinander verglichen werden, weil sie sich an die Vorgaben der neuen VDI-Flechtenkartierungsrichtlinie anpassen ließen. Die früheren Untersuchungsergebnisse ließen sich teilweise ebenfalls im Sinne der Richtlinie interpretieren.

Parallel zur Flechtenkartierung waren 1970, 1985 und 2005 vergleichende Bestimmungen der pH-Werte an den Baumborken der Flechtenbäume durchgeführt worden.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- In beiden Städten steigen die pH-Werte infolge verringerter SO_2 -Belastung seit Beginn der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts an und erreichen inzwischen fast wieder Werte, die denen aus vorindustrieller Zeit gleichen.

- Bei den Flechten zeigte sich 1970, zum Zeitpunkt der ersten Untersuchung, aufgrund extrem hoher Immissionsbelastung eine völlige Verarmung der Flechtenvegetation, bis hin zu flechtenfreien Gebieten im industrialisierten Norden Wetzlars.
- Mit zunehmender Verbesserung der lufthygienischen Verhältnisse innerhalb des Untersuchungszeitraumes – hervorgerufen durch verminderte Immissionen – steigt die Artenzahl der Rückeinkwanderer an.
- Kamen zunächst nur toxtolerante Arten zurück, so ist inzwischen auch eine Rekolonisation durch empfindliche Spezies zu beobachten.
- Der Vergleich der Flechtenvegetation zwischen 1970 und 2005 zeigt darüber hinaus einen deutlichen Anstieg von Arten, die durch eutrophierende Luftschadstoffe begünstigt werden.

4 Hessische Flechten-Dauerbeobachtungsflächen (DBF)

Langfristig angelegte Untersuchungen von Flechten als Bioindikatoren zur Bewertung von Immissionen sind selten, weil es zu ihrer Durchführung einer Kontinuität sowohl der Untersucher als auch der Geldgeber bedarf. Neben den Niederlanden und – ansatzweise – auch Großbritannien gibt es solche Erhebungen nur noch im Bundesland Hessen. Dabei sind sie von außerordentlichem Wert, weil erst durch sie die Veränderungen der lufthygienischen Situation erfasst und dokumentiert werden können. Flechten gelten als Frühwarnsysteme, weil sie – als wechselfeuchte Organismen – besonders intensive Kontakte zu ihrer gasförmigen Umwelt besitzen. Des Weiteren können sie als Modell für ganze Ökosysteme verstanden werden, weil ihre Reaktionen auf Immissionen repräsentativ für andere Organismengruppen (einschließlich des Menschen) sind.

Die hessischen Flechtendauerbeobachtungsflächen (DBF) wurden 1992 in repräsentativen Gebieten des Landes eingerichtet und werden seither im fünfjährigen Rhythmus untersucht. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse über die Jahre zu sichern, wurden die Kartierungen von Anfang an nach den Vorgaben der entsprechenden VDI-Richtlinie (VDI 3799,1) durchgeführt. Seit 2005 liegt eine aktualisierte Version dieser Richtlinie vor (VDI 3957, 13), die sich v. a. hinsichtlich der Methodik der Flechtenaufnahme (Kartierung) und der Interpretation der Ergebnisse von ihrer Vorgängerin unterscheidet. Um die Kontinuität und Vergleichbarkeit der hes-

sischen Dauerbeobachtungsergebnisse nicht zu gefährden, wurde in den hessischen DBF auch 2007 mit der alten Aufnahmetechnik weiter gearbeitet (was die Richtlinie erlaubt), die Auswertung erfolgte bei dem hier vorliegenden Bericht allerdings nach den Vorgaben der neuen Version (siehe die entsprechenden Ausführungen im Kapitel 3.1).

Ein verfeinertes und intensiveres Werkzeug zum Nachweis von Veränderungen in der lufthygienischen Situation liegt mit der Methode der Flächenbestimmung einzelner Flechtenarten und der Beobachtung ihrer Veränderungen vor (VDI 3957, 8). Dieses Verfahren wird seit 1997 an ausgewählten Kleinflächen von 20 x 20 cm innerhalb der DBF eingesetzt.

Den Resultaten einer immissionsbezogenen Flechtenkartierung im Umfeld des Frankfurter Flughafens (2007) ist ein weiteres Kapitel gewidmet.

Die in jüngster Zeit zu beobachtende Arealverschiebung bestimmter Flechtenarten (Einwanderung von so genannten Wärmezeigern, bei gleichzeitigem Rückzug der Kühlezeiger) hat die zuständige VDI-Kommission dazu veranlasst, die Entwicklung einer „Klima-Richtlinie“ in Erwägung zu ziehen. Die hessische Landesregierung unterstützt dieses Vorhaben durch die Finanzierung von Grundlagenforschung auf diesem Gebiet. Auch die Resultate dieser Untersuchung fließen in den vorliegenden Bericht ein.

4.1 Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator der Luftgüte

4.1.1 Methoden

4.1.1.1 Die Untersuchungsgebiete

Die seit der ersten Kartierung von 1992 eingerichteten Flechten-Dauerbeobachtungsflächen wurden 1997, 2002 und 2007 erneut untersucht. Abbildung 24 gibt einen Überblick über die Lage der DBF.

In den sieben für Dauerbeobachtungen vorgesehenen Arealen wurde jeweils eine 8 x 8 km große Teilfläche für die Flechtenkartierung ausgewählt.

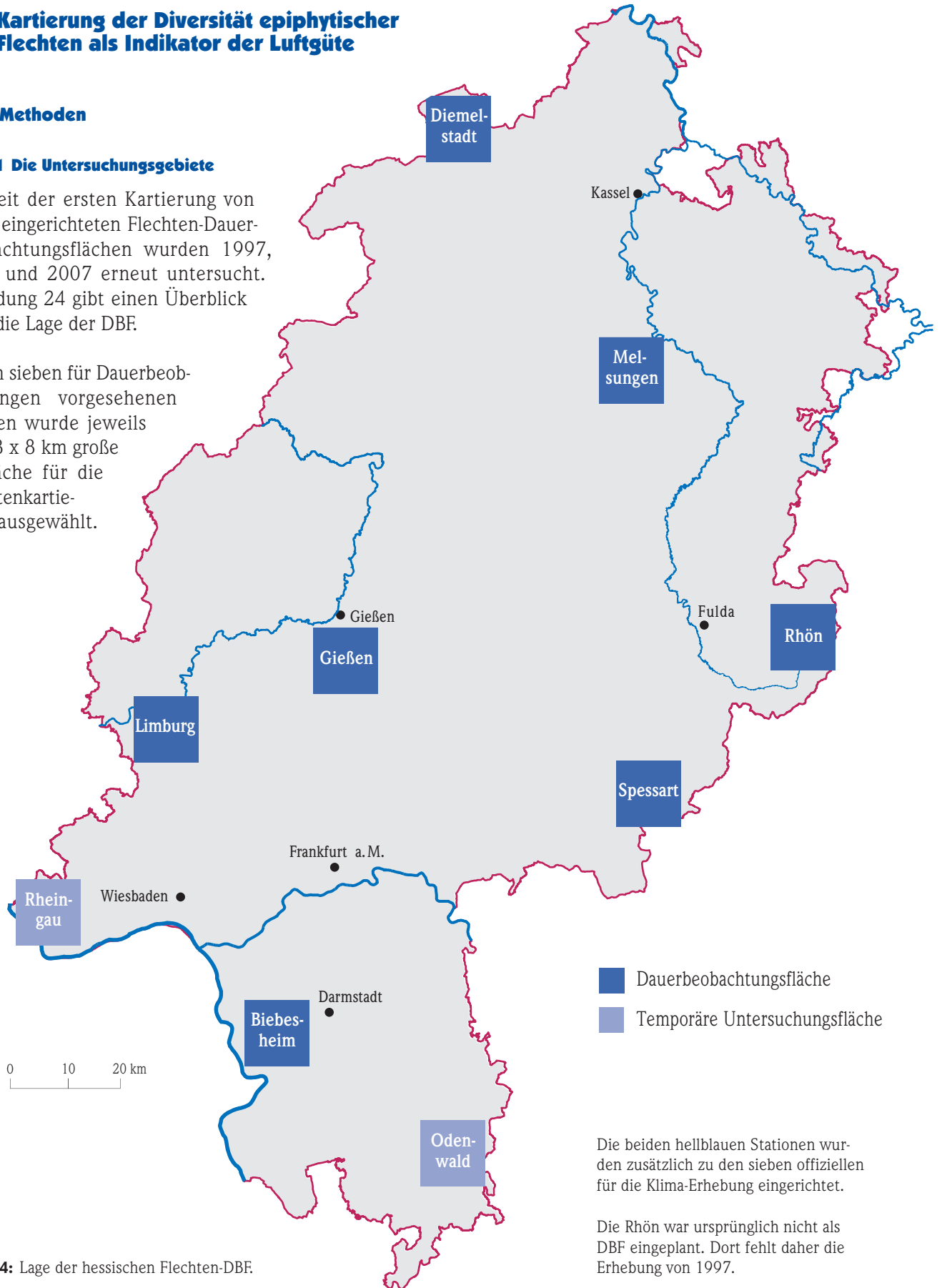


Abb. 24: Lage der hessischen Flechten-DBF.

An den Kreuzungspunkten eines 2 x 2-km-Netzes ergeben sich daraus jeweils 25 Messflächen von 1 km² Größe (siehe Abb. 25).

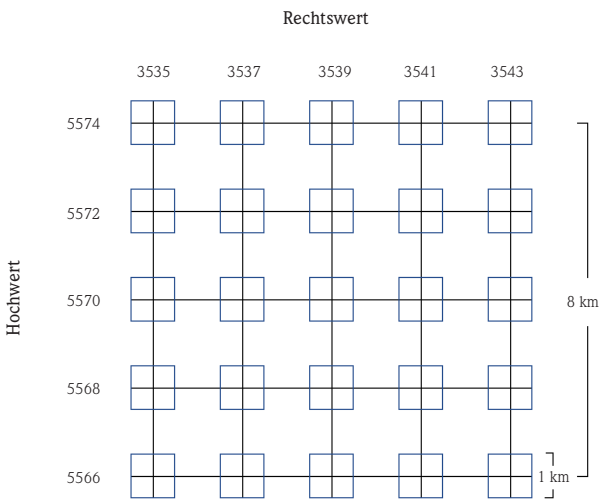


Abb. 25: Messnetz für die Dauerbeobachtungsflächen (Beispiel der DBF „Spessart“).

In jeder Messfläche werden, entsprechend den Vorgaben der VDI-Richtlinie jeweils 6–12 geeignete Bäume auf ihren Flechtenbewuchs untersucht. Sinkt die Zahl der in den vorigen Kartierungen untersuchten Bäume (z. B. wegen Überalterung, Fällungen, Stürme), so ist für Ersatz zu sorgen. Finden sich keine geeigneten Bäume, ist die Messfläche zu verwerfen (nicht kartierbar). Gelegentlich kam es vor, dass Messflächen, die früher wegen Mangels an geeigneten Bäumen nicht als Messflächen in Betracht kamen, durch Heranwachsen junger Bäume neu eingerichtet werden konnten. Als Folge ist eine gewisse Fluktuation der Anzahl von Messflächen/DBF zu verzeichnen (siehe Tab. 3). Von den 175 potentiellen Messflächen aller DBF sind im Mittel ca. 1/3 wegen fehlender Bäume nicht für die Flechtenkartierung nach VDI geeignet.

Tab. 3: Anzahl untersuchter Messflächen zwischen 1992 und 2007.

Anzahl Messflächen 1992	100
Anzahl Messflächen 1997	114
Anzahl Messflächen 2002	109
Anzahl Messflächen 2007	135

4.1.1.2 Untersuchungsbäume

Seit 1997 sind alle in die Untersuchung eingegangenen Bäume mit Nägeln markiert und mit Hilfe genauer Angaben von Hoch- und Rechtswert ihres Standortes eindeutig festgelegt worden. Folgerichtig konnten diese Bäume bei den letzten Untersuchungen sicher wieder gefunden werden. Probleme ergaben sich lediglich dort, wo Untersuchungsbäume in der Zwischenzeit gefällt, durch Sturm umgeworfen oder aus Altersgründen zusammengebrochen waren. In solchen Fällen wurde – soweit möglich – auf Ersatzbäume ausgewichen.

Tabelle 4 zeigt, dass sich die mittlere Anzahl kartierter Bäume/Messfläche über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg nur unwesentlich verändert hat.

Tab. 4: Anzahl untersuchter Bäume/Messfläche zwischen 1992 und 2007.

Mittlere Anzahl Bäume/Messfläche 1992	8,2
Mittlere Anzahl Bäume/Messfläche 1997	9,5
Mittlere Anzahl Bäume/Messfläche 2002	9,1
Mittlere Anzahl Bäume/Messfläche 2007	8,7

Das Artenspektrum untersuchter Baumarten unterlag im Verlauf der Wiederholungskartierungen geringfügigen Veränderungen (siehe Abb. 26): Apfelbaum und Pappel sind zwar noch immer die am häufigsten untersuchten Bäume. Da sie aber als Flechtensubstrate weniger gut geeignet sind als z. B. Eschen und Ahorne, werden neuerdings – soweit möglich – ausfallende Pappeln und Apfelbäume durch die in der Richtlinie besonders empfohlenen Baumarten ersetzt.

Für 2007 sind die Anteile der Baumarten an den knapp 1200 insgesamt untersuchten Bäumen aus Abb. 27 ersichtlich. Wie daraus hervorgeht, machen lediglich 3 Baumarten (Apfel, Pappel, Esche) ca. ¾ aller untersuchten Bäume aus. Dies ist im Interesse einer Standardisierung (und damit geringer Datenstreuung) von Vorteil.

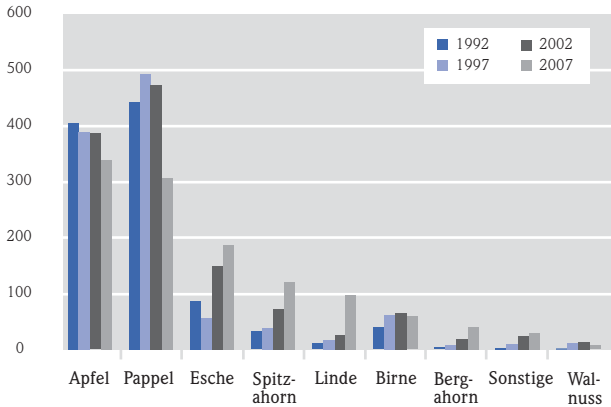


Abb. 26: Entwicklung der Zahl untersuchter Bäume (1992/1997/2002/2007).

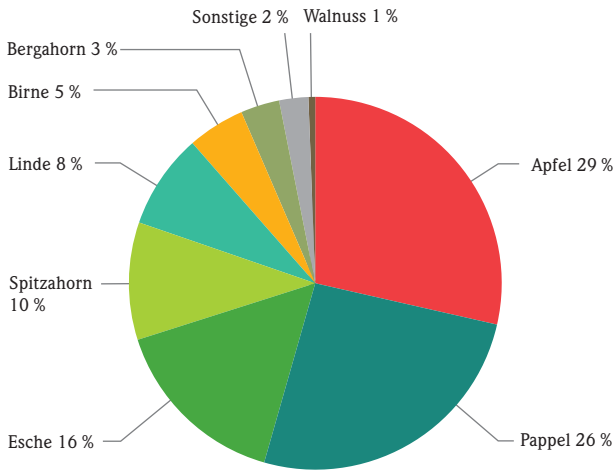


Abb. 27: Baumartenverteilung aller DBF, 2007.

4.1.1.3 Flechtenaufnahme

Die Flechtenaufnahme erfolgte nach VDI 3957, Blatt 13:

- Innerhalb einer Station werden 6 bis 10 geeignete Bäume für die Flechtenerhebung ausgewählt.
- Es erfolgt eine genaue Angabe des Baumstandortes mit Hilfe von Rechts- und Hochwert. Diese Maßnahme soll ein sicheres Wiederauffinden des Baumes bei der nächsten Wiederholungskartierung ermöglichen.
- In 150 cm Höhe wird jeder Baum mit Hilfe eines V2A-Nagels markiert.
- Jedem Baum wird ein Aufnahmegitter angelegt (siehe Abb. 4).
- Innerhalb des Gitters werden die vorkommenden

Flechten notiert und ihre Frequenzen (Häufigkeit ihres Vorkommens) bestimmt.

- Die erhobenen Daten werden gemäß den Vorgaben der Richtlinie zur Berechnung der Luftgüte-Indizes einer jeden Messfläche herangezogen.
- Die Luftgüte-Indizes von 1992 werden mit denen von 1997, 2002 und 2007 verglichen und graphisch dargestellt.

4.1.1.4 Auswertung der Daten zur Bestimmung des Luftgüte-Indexes (LGI)

Siehe hierzu die Ausführungen im Kapitel „Immissionsbezogene Flechtenkartierungen in Wetzlar/Gießen“ (insbesondere Tab. 1 und Abb. 8).

4.1.2 Ergebnisse und Diskussion

4.1.2.1 Die Entwicklung von Referenzarten und Eutrophierungszeigern (1992–2007)

In der DBF **Diemelstadt**, die zu Beginn unserer Erhebungen (1992) als mittel belastet eingestuft worden war, bleibt die Häufigkeit der Referenzarten (zeigen hohe Luftgüte an) über die Jahre hinweg relativ konstant (Abb. 28); die Eutrophierungszeiger lagen bezüglich ihrer Häufigkeit darunter. Dieses Verhältnis kehrt sich ab 1997 um und wird seither – infolge der raschen Zunahme der Eutrophierungszeiger – immer deutlicher.

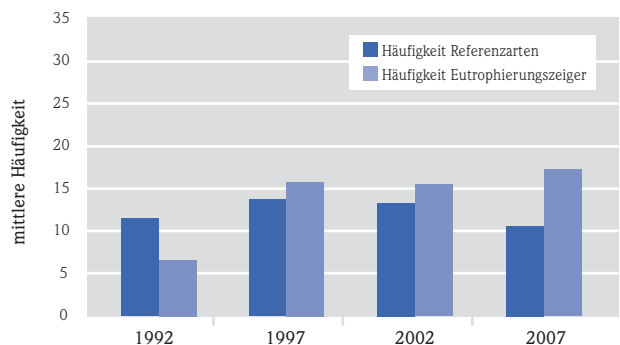


Abb. 28: Vergleich der Häufigkeit des Vorkommens von Referenzarten und Eutrophierungszeigern in der DBF Diemelstadt (1992–2007).

Melsungen, als ursprünglich am stärksten belastete DBF eingestuft, beginnt 1992 folgerichtig mit der geringsten Frequenz aller Dauerbeobachtungsflächen (Abb. 29). Dies trifft sowohl für die Referenzarten als auch für die Eutrophierungszeiger zu.

Nach der Stilllegung der starken SO₂-Emittenten Sachsens und Thüringens Anfang der neunziger Jahre, beginnt auch hier eine Erholung der Flechtenvegetation – wenn auch noch auf niedrigem Niveau. Hier haben bis 2002 die Referenzarten das Übergewicht; erst bei der letzten Erhebung übertrifft die Artenzahl und Frequenz der Eutrophierungszeiger diejenige der Referenzarten.

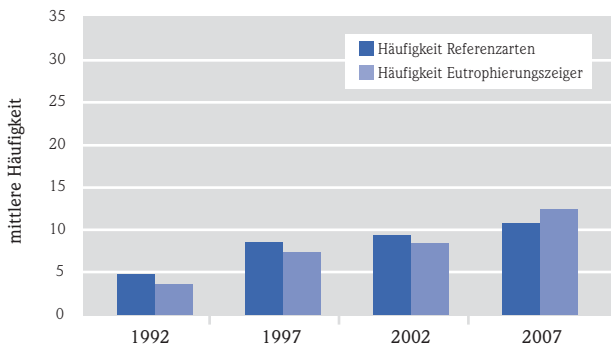


Abb. 29: Vergleich der Häufigkeit des Vorkommens von Referenzarten und Eutrophierungszeigern in der DBF Melsungen (1992–2007).

Die DBF **Rhön** wies 1992 von allen Dauerbeobachtungsflächen die höchste Artenzahl und Frequenz der Referenzarten auf (Abb. 30). Da sie 1997 nicht untersucht wurde, kann über diesen Zeitpunkt keine Aussage gemacht werden. Im Untersuchungszeitraum 2002 ist ein deutlicher Rückgang der Referenzarten zu beobachten, der sich 2007 aber nicht fortsetzt. Bei den Eutrophierungszeigern ist über die Jahre ein Anstieg zu konstatieren. Es überwiegen jedoch weiterhin die Referenzarten.

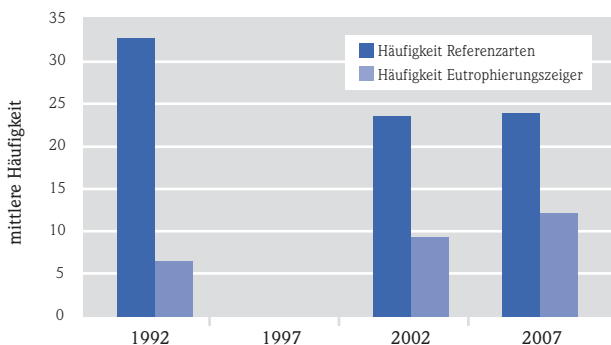


Abb. 30: Vergleich der Häufigkeit des Vorkommens von Referenzarten und Eutrophierungszeigern in der DBF Rhön (1992–2007).

Gießen, 1992 als hoch belastet eingestuft, verhält sich in seiner Flechtenentwicklung ähnlich wie Melsungen (Abb. 29 und 31): Von einem geringen

Anfangsniveau ausgehend nimmt sowohl die Zahl der Referenzarten als auch die der Eutrophierungszeiger zu. Im Gegensatz zu Melsungen tritt das Übergewicht der Eutrophierungszeiger jedoch bereits Ende des letzten Jahrhunderts ein.

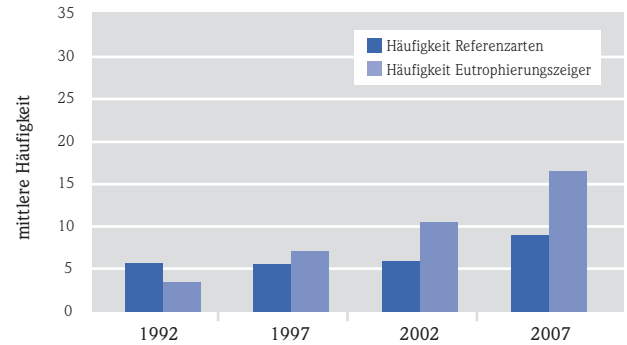


Abb. 31: Vergleich der Häufigkeit des Vorkommens von Referenzarten und Eutrophierungszeigern in der DBF Gießen (1992–2007).

Die zu Anfang als gering belastet eingestufte DBF Limburg startet mit hohen Frequenzen – insbesondere der Referenzarten (Abb. 32). Die Häufigkeit dieser Arten nimmt jedoch im Verlauf der Dauerbeobachtung ab, während gleichzeitig ein Anstieg der Eutrophierungszeiger zu beobachten ist. 2007 sind diese erstmals stärker vertreten als die Referenzarten.

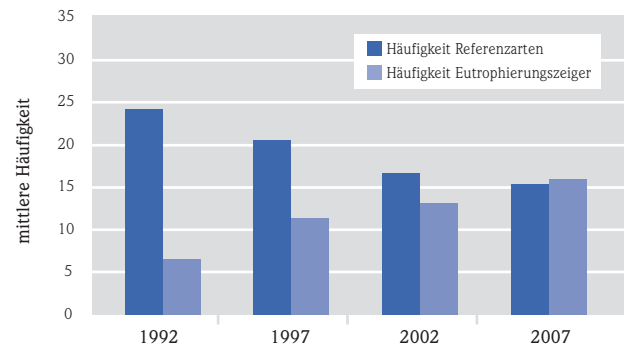


Abb. 32: Vergleich der Häufigkeit des Vorkommens von Referenzarten und Eutrophierungszeigern in der DBF Limburg (1992 – 2007).

Die DBF **Spessart** – ursprünglich ebenfalls als gering belastet eingestuft – verhält sich hinsichtlich der Häufigkeitsentwicklung beider Flechtengruppen ähnlich wie Limburg (Abb. 33): Einer Abnahme der Referenzarten steht eine Zunahme der Eutrophierungszeiger gegenüber. Allerdings ist hier ein Übergewicht der zuletzt genannten Gruppe bisher nicht zu beobachten.

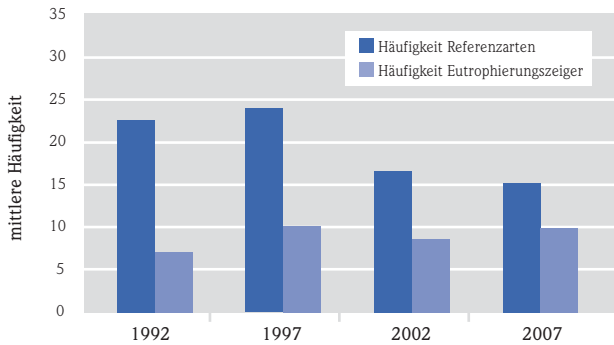


Abb. 33: Vergleich der Häufigkeit des Vorkommens von Referenzarten und Eutrophierungszeigern in der DBF Spessart (1992–2007).

In der DBF **Biebesheim** verläuft die Entwicklung – beginnend mit einem sehr niedrigen Ausgangsniveau – ähnlich wie in den beiden anderen ursprünglich hoch belasteten Dauerbeobachtungsflächen Melsungen und Gießen (Abb. 34): Die Häufigkeit der Referenzarten nimmt zunächst zu; seit 1997 ist hier allerdings eine Stagnation (bzw. ein leichter Rückgang) zu verzeichnen. Die Häufigkeit der Eutrophierungszeiger nimmt deutlich zu.

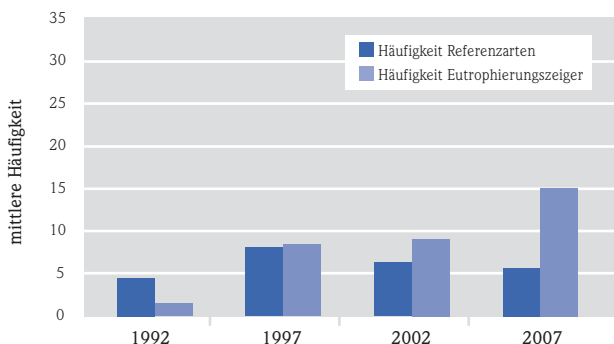


Abb. 34: Vergleich der Häufigkeit des Vorkommens von Referenzarten und Eutrophierungszeigern in der DBF Biebesheim (1992–2007).

Fasst man die Ergebnisse der Untersuchungen zur Entwicklung von Referenzarten und Eutrophierungszeigern zusammen, so lassen sich folgende Gesichtspunkte erkennen: In allen DBF nimmt seit 1992 die Anzahl der Eutrophierungszeiger kontinuierlich zu. Vergleicht man die Ausgangswerte von 1992 mit denen der Erhebung von 2007, so ist der stärkste prozentuale Zuwachs in den ehemals stark belasteten DBF Biebesheim, Gießen und Melsungen zu beobachten. In der Rhön und im Spessart verläuft der Anstieg hingegen eher moderat. Als Ursache hierfür darf vermutlich angenommen werden, dass beide Gebiete am wenigsten von der deutschlandweit zu

beobachtenden Zunahme eutrophierender Verbindungen (v. a. Ammoniak) betroffen sind, da die beiden Hauptemittenten – Intensivlandwirtschaft und Autoverkehr – hier keine wesentliche Rolle spielen.

Bei den Referenzarten ist ein differenziertes Bild ihrer Entwicklung zu beobachten: In den 1992 hoch belasteten DBF Melsungen, Gießen und Biebesheim wirkt sich der Rückgang saurer Schadgase offenbar bis heute aus, was sich in einer Zunahme der Referenzarten ausdrückt. In den ursprünglich geringer belasteten DBF Rhön, Limburg, Spessart und Diemelstadt gehen die Referenzarten zurück (wenn auch in wesentlich geringerem Umfang als dies bei der Zunahme der Eutrophierungszeiger zu beobachten ist).

Der Rückgang der Referenzarten (die gleichzeitig teilweise Acidophyten sind) kann als Indiz dafür gewertet werden, dass die weite Zeiträume des zwanzigsten Jahrhunderts beherrschenden sauren Immissionen ihre Nachwirkungen verlieren und wir in den Ökosystemen allmählich zu vorindustriellen Verhältnissen hinsichtlich dieses Immissionsfaktors gelangen. Die Einwanderung von anderen Referenzarten (Nicht-Acidophyten) geht allerdings langsam voran: Zwar sind sie bereits vorhanden, wie man im Gelände beobachten kann, ihre Individuenzahl ist jedoch noch zu gering, als dass sie bereits in nennenswerter Anzahl im kleinen Aufnahmegitter der Kartierung vorzufinden wären.

4.1.2.2 Entwicklung der Luftgüte-Indizes in den hessischen Flechten-Dauerbeobachtungsflächen (1992–2007)

In der DBF **Diemelstadt** (Abb. 35) gab es 1992 noch einige (wenige) Messflächen, die der Kategorie „Luftgüte sehr gering“ (Farbe Rot) zugeordnet werden mussten. Deren Anzahl nahm 1997 ab und seit dieser Zeit ist keine Messfläche mehr sehr stark belastet. Die gleiche Tendenz ist ebenfalls für Messflächen der zweitschlechtesten Klasse zu beobachten. In ähnlicher Weise stellt sich jedoch auch die Entwicklung bei den Messflächen mit hoher bzw. sehr hoher Luftgüte dar: Bei beiden nimmt in der Zeit zwischen 1992–2007 die Anzahl der dazu gehörigen Messflächen ab. Dafür ist eine deutliche Zunahme der Messflächen, die eine mittlere Luftgüte aufweisen, festzustellen.

Der deutlichste Sprung hin zu besseren Luftgüte-Indizes ist zwischen 1992 und 1997 zu erkennen. Ab diesem Zeitpunkt gehen die Luftgüte-Indizes leicht nach unten. Diese Tendenz ist bei allen Dauerbeobachtungsflächen zu beobachten, die zu Beginn unserer Erhebungen 1992 wegen relativ geringer Immissionsbelastung bereits ein verhältnismäßig anspruchsvolles Inventar an Flechtenarten besaßen (Diemelstadt, Rhön, Limburg, Spessart). Der mit der Verminderung der sauren Immissionen (v. a. SO₂) verbundene Rückgang der Acidophyten wirkt sich bei diesen DBF stärker aus als bei den ursprünglich hoch belasteten, bei denen die Flechtenvegetation zu Beginn der Untersuchungen stark verarmt war (Melsungen, Gießen, Biebesheim).

In der DBF **Melsungen** gab es 1992 keine Messfläche, die der besten Luftgüteklasse zuzuordnen war (Abb. 36). Daran hat sich bis heute nichts geändert. Auch die zweitbeste Klasse war zu Anfang nicht vertreten. Dafür gehörten ca. 65 % aller Flächen der Klasse „Luftgüte sehr gering“ an. Seither nimmt die Zahl der Messflächen mit sehr hoher Belastung jedoch drastisch ab; ein Teil ist der nächst besseren Klasse zugefallen, die Mehrzahl jedoch ist in die mittlere Belastungskategorie aufgerückt. Eine gehört inzwischen

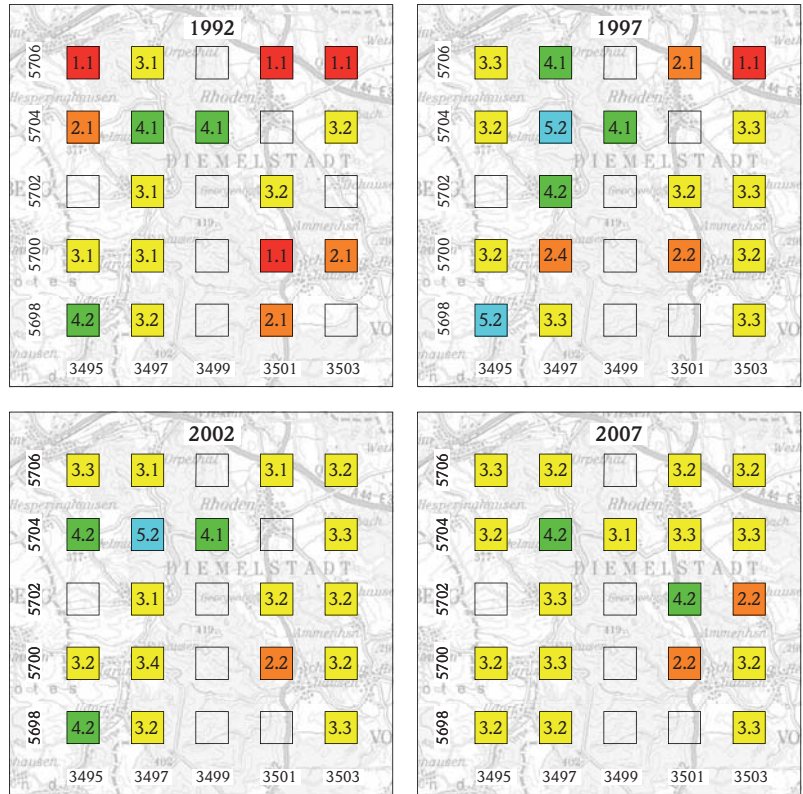


Abb. 35: Entwicklung der Luftgüte-Indizes in der DBF Diemelstadt zwischen 1992 und 2007.



Abb. 36: Entwicklung der Luftgüte-Indizes in der DBF Melsungen zwischen 1992 und 2007.

Bewertung der Luftgüte ohne Berücksichtigung eutrophierender Luftschadstoffe	Einfluss eutrophierender Luftschadstoffe
5. sehr hoch	.5
4. hoch	.4
3. mäßig	.3
2. gering	.2
1. sehr gering	.1
□ Messfläche nicht kartierbar	

Legende zu den Abbildungen 35–41

sogar in den Bereich mit hoher Luftgüte. Eine Erholungstendenz ist bei dieser, ursprünglich stark immissionsbelasteten DBF unverkennbar.

Im Vergleich zur DBF Diemelstadt setzt sich in Melsungen zwischen 1992 und 2007 der Trend zur Verbesserung der lufthygienischen Situation kontinuierlich fort. Diese Beobachtung lässt sich damit erklären, dass Melsungen – an der ehemaligen DDR-Grenze gelegen – 1992 mit einer deutlich schlechteren Ausgangslage gestartet war; es ist daher folgerichtig, dass hier die Verbesserung der Immissionssituation am deutlichsten zutage treten musste.

Ein völlig anderes Bild zeigt sich in der DBF Rhön (Abb. 37): 1992 gehörte keine Messfläche zu den beiden ungünstigsten lufthygienischen Klassen; ein gutes Drittel war dagegen in der Klasse mit der höchsten Luftgüte (Farbe Blau) einzuordnen. Im weiteren Verlauf ging dieser Anteil allerdings auf ca. 10 % zurück; viele der ehemals unbelasteten Flächen gehören jetzt zur Klasse mit hoher Luftgüte (Farbe Grün). Von allen Flechten-Dauerbeobachtungsflächen ist der Anteil von Messflächen mit hoher und sehr hoher Luftgüte in der Rhön am stärksten ausgeprägt; sie ist also über die Jahre als am wenigsten belastet anzusehen.

Aus der Abb. 37 ist zu ersehen, dass sich die Luftgütewerte an der Mehrzahl der Rhön-Messflächen zwischen 1992 und 2007 verringert haben. Dies ist ein ähnlicher Befund wie in den DBF Diemelstadt, Limburg und Spessart: Infolge vergleichsweise geringer Immissionsbelastung zu Beginn unserer Untersuchungen 1992 hatte sich an diesen Dauerbeobachtungsflächen eine relativ artenreiche Flechtenvegetation halten können. Mit Wegfall der sauren Immissionen nah-

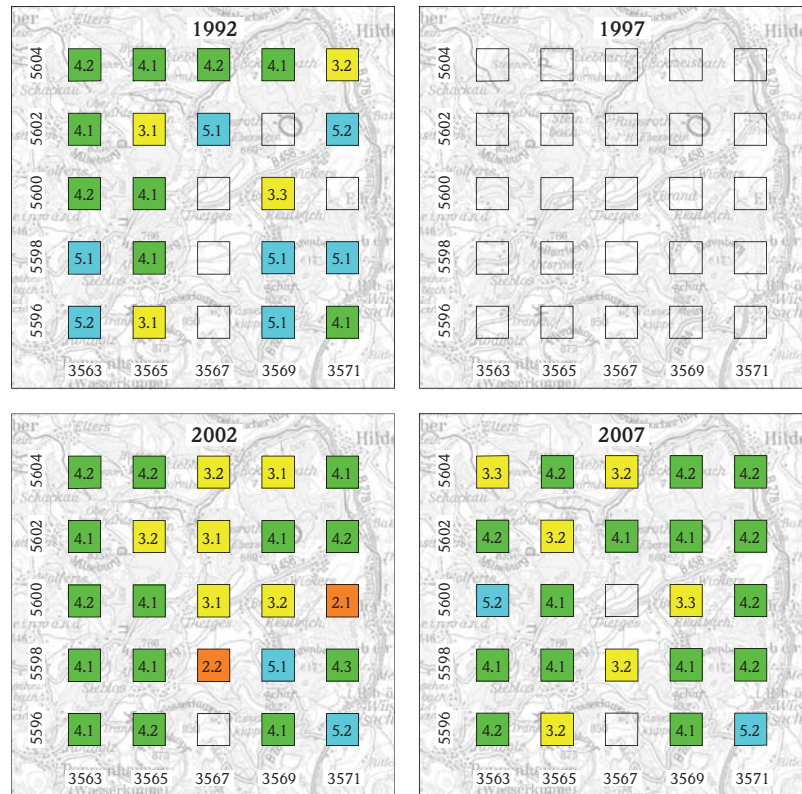


Abb. 37: Entwicklung der Luftgüte-Indizes in der DBF Rhön zwischen 1992 und 2007.

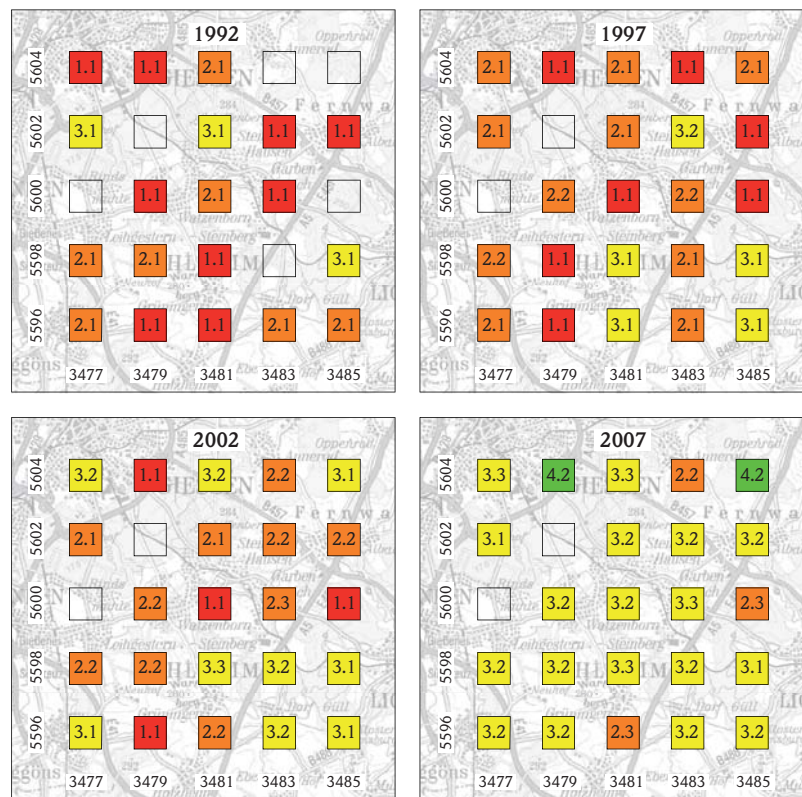


Abb. 38: Entwicklung der Luftgüte-Indizes in der DBF Gießen zwischen 1992 und 2007.

men Artenzahl und Frequenz der Acidophyten ab, was sich in einer Verringerung der Luftgüte-Indizes ausdrückt.

In der ehemals als belastet eingestuft DBF **Gießen** sinkt die Zahl von Flächen mit sehr geringer und solchen mit geringer Luftgüte seit 1992; Messflächen mit mäßiger Luftgüte nehmen hingegen kontinuierlich und stark zu (Abb. 38). In unserer letzten Erhebung 2007 waren knapp 10% aller untersuchten Messflächen bereits als gering belastet einzustufen. In Gießen ist der Trend zu einer Verbesserung der lufthygienischen Situation ebenso offensichtlich wie in Melsungen.

Die ursprünglich als gering belastet eingestufte DBF **Limburg** zeigt im Verlauf des fünfzehnjährigen Untersuchungszeitraumes eine relative Konstanz der Belastungssituation auf: Über den gesamten Untersuchungszeitraum ist keine Messfläche der Kategorie „Luftgüte sehr gering“ (Farbe Rot) zuzuordnen (siehe Abb. 39). In der Kategorie „Luftgüte gering“ (Farbe Orange) gibt es 2002 einen Anstieg, der sich aber 2007 wieder annähernd bei der ursprünglichen Größenordnung einpendelt. Lediglich die Zahl von Messflächen mit sehr hoher Luftgüte geht zurück.

Hier ist eine ähnliche Tendenz wie bei der DBF Rhön festzustellen.

Bei der 1992 ebenfalls als gering belasteten DBF **Spessart** ist seit Jahren eine Verschlechterung der lufthygienischen Situation feststellbar: Wie die Abb. 40 zeigt, nimmt die Anzahl der Messflächen mit hoher Luftgüte ab, solche mit geringer Luftgüte dagegen zu; 2007 fallen einige Flächen sogar in die schlechteste Luftgüteklasse. Von allen Dauerbeobachtungsflächen stellt sich die Entwicklung im Spessart am ungünstigsten dar (allerdings



Abb. 39: Entwicklung der Luftgüte-Indizes in der DBF Limburg zwischen 1992 und 2007.



Abb. 40: Entwicklung der Luftgüte-Indizes in der DBF Spessart zwischen 1992 und 2007.



Abb. 41: Entwicklung der Luftgüte-Indizes in der DBF Biebesheim zwischen 1992 und 2007.

darf man das insgesamt weiterhin hohe Niveau der lufthygienischen Situation nicht aus dem Auge verlieren).

Die DBF **Biebesheim** war zu Beginn unserer Erhebungen als stark belastet eingestuft worden – ähnlich wie Melsungen und Gießen. Während aber bei den beiden zuletzt genannten im Verlauf der letzten fünfzehn Jahren eine Verbesserung eingetreten ist, lässt sich eine solche in Biebesheim nicht deutlich nachweisen (Abb. 41): Zwar nimmt von 1992 auf 1997 die Anzahl der Messflächen der mittleren Luftgüteklasse drastisch zu, seither jedoch ist hier der Trend wieder rückläufig; keine einzige Messfläche gilt bis heute als gering bzw. sehr gering belastet.

Die Interpretation der Ergebnisse wird in Biebesheim allerdings dadurch erschwert, dass hier innerhalb des Untersuchungszeitraumes von 15 Jahren von den ursprünglich 23 Messflächen ca. 25 % durch Fällen der Bäume (Pappelalleen) vernichtet wurden und durch neue ersetzt werden mussten – soweit dies möglich war.

4.1.2.3 Entwicklung der Artenzahlen

Die Entwicklung der Gesamtartenzahlen lässt folgendes Bild erkennen (siehe Abb. 42): Melsungen, Gießen und Biebesheim wiesen sowohl 1992 als auch noch 1997 die geringsten Artenzahlen auf und hatten somit den größten „Nachholbedarf“ aller Dauerbeobachtungsflächen. Von einer hohen Ausgangsposition hinsichtlich der Artenzahlen steigen auch in der Rhön und in Limburg die Artenzahlen über den Untersuchungszeitraum an – wenn auch prozentual nicht so stark wie bei den erstgenannten DBF.

In Diemelstadt und im Spessart stagnieren dagegen – nach leichten Zugewinnen zwischen 1992 und 1997 – die Artenzahlen auf relativ hohem Niveau.

Der Zugewinn an Arten geht in erster Linie auf das Konto der rasch zunehmenden Eutrophierungszeiger (Nitrophyten).

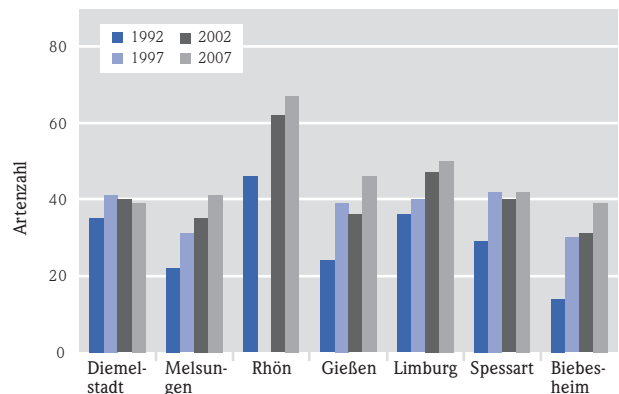


Abb. 42: Gesamtartenzahl der Dauerbeobachtungsflächen (1992/1997/2002/2007).

4.1.2.4 Entwicklung der Zeigerwerte

Die mittleren Zeigerwerte für den Faktor „Reaktion“ sind in Abb. 43 dargestellt. Die Reaktionszahl macht eine Aussage über die pH-Wertbedingungen, unter denen die Flechten existieren (im Gegensatz zum pH-Wert umfasst die Reaktionszahl – wie alle Zeigerwertzahlen – jedoch nur 9 Stufen; 1 = Faktor

gering ... 9 = Faktor hoch). Wie die Abbildung erkennen lässt, steigen die Reaktionszahlen bei allen Dauerbeobachtungsflächen und zu allen Untersuchungszeitpunkten von 1992 bis 2007 an. Die deutlichsten Erhöhungen der Reaktionswerte sind dabei an jenen DBF zu beobachten, die zu Beginn unserer Untersuchungen am stärksten versauert waren (Melsungen und Gießen). Der hier dargestellte Befund dürfte eine Folge der sich noch immer weiter nach oben bewegenden pH-Werte der Baumrinden sein (siehe auch das Kapitel „pH-Werte von Baumrinden“, Seite 10). Hier zeigt sich, dass die Auswirkungen der durch SO_2 verursachten Rindenversauerung erst mit recht großer Verzögerung von einigen Jahren vermindert werden.

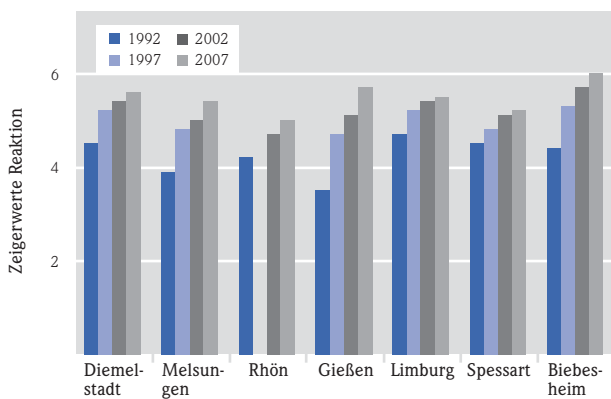


Abb. 43: Entwicklung der mittleren Reaktions-Zeigerwerte (1992–2007).

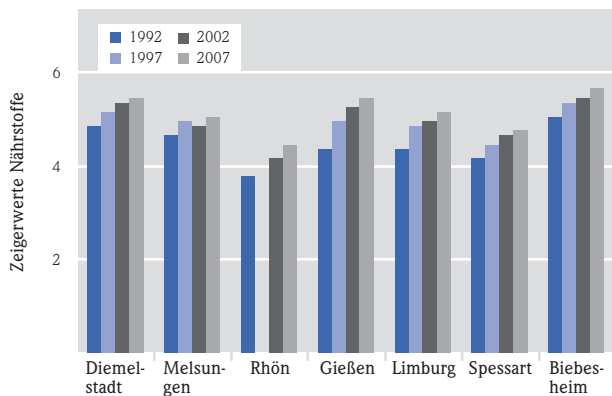


Abb. 44: Entwicklung der mittleren Nährstoff-Zeigerwerte (1992–2007).

Parallel zur abnehmenden Versauerung ist eine Steigerung des Nährstoffeintrages unverkennbar (Abb. 44). Die Nährstoffzahl bezieht sich vor allem auf den Faktor Stickstoff in flechtenverfügbarer Form. Wir können daraus ableiten, dass in den letzten 15 Jahren im gesamten Bundesland Hessen ein Anstieg

luftgetragener Stickstoffverbindungen stattgefunden hat (für die Flechten sind hierbei insbesondere NH_3 und NH_4^+ von Bedeutung). Die Werte steigen allerdings nicht in gleichem Maß an, wie dies beim Rückgang der Versauerung festzustellen ist.

4.1.2.5 Entwicklungstendenzen von Flechtenarten

Betrachtet man die Entwicklungstendenzen einzelner, ausgewählter Flechtenarten, so fällt auch hier die Abnahme der Frequenzen bei den acidophytischen Flechtenarten ins Auge.

Am deutlichsten ist diese Tendenz beim starken Acidophyten *Lecanora conizaeoides* zu erkennen; hier waren die pH-Werte der Borke vermutlich bereits 1992 suboptimal, so dass diese seit dieser Zeit überall kontinuierlich abnimmt (siehe Abb. 45). In den DBF mit geringer Ausgangsbelastung (Diemelstadt, Rhön, Limburg) ist sie vollständig verschwunden; in Limburg sogar bereits seit 2002. Die DBF Biebesheim nimmt bei vielen Untersuchungsergebnissen eine Sonderstellung ein: Zwar galt sie von Anfang an als relativ stark belastet. Im Gegensatz zu Melsungen und Gießen, wo saure Immissionen die Ursache des geringen Flechtenbewuchses gewesen sind, müssen in Biebesheim andere Faktoren als Ursache für die niedrigen Luftgüte-Indizes vermutet werden. Die Tatsache, dass die Acidophyten hier bereits 1992 in nur geringer Häufigkeit zu finden waren, spricht eine eindeutige Sprache.

Bei *Hypogymnia physodes* zeigt sich das Phänomen des Rückzuges ebenfalls, allerdings schwächer ausgeprägt (Abb. 46). In Biebesheim fand dieser Acidophyt im Verlauf der letzten 15 Jahre überhaupt keine Existenzmöglichkeiten.

Eine Gruppe von Arten fällt unter die Rubrik „Neutrophyten“, d. h. sie kommen auf Borken mit leicht saurem bis neutralem pH-Wert vor. Ebenso wie die Acidophyten werden sie in der aktuellen VDI-Kartierungsrichtlinie als Referenzarten bezeichnet; ihr Vorkommen wird demzufolge als positiv für die Luftgüte am Wuchsort gewertet. Typische Vertreter dieser Gruppe sind *Parmelia sulcata* (Abb. 47) und *Ramalina farinacea* (Abb. 48). Die Entwicklung ihrer Häufigkeit ist nicht einheitlich: Zugewinnen in den ehemals stärker belasteten Dauerbeobachtungsflächen stehen rückläufige Tendenzen in ursprünglich wenig belasteten gegenüber.

In der Zusammenfassung der Ergebnisse von Kartierung und Flächenberechnung (siehe unten) wird über dieses Verhalten der Neutrophyten diskutiert werden.

Parallel zur Abnahme der Acidophyten verläuft, wie bereits weiter oben erwähnt, eine Ausbreitung von Arten, die auf neutralen Borken vorkommen (Neutrophyten), gleichzeitig aber auch Nährstoffzeiger

(Nitrophyten) sind. Besonders augenfällig ist die Zunahme bei *Phaeophyscia orbicularis* (Abb. 49) sowie bei *Xanthoria parietina* (Abb. 50).

Auf Grund der Tatsache, dass ihr Vorkommen auf übermäßige Nährstoffversorgung hinweist (→ Eutrophierungsgefahr), werden sie in der VDI-Richtlinie negativ bewertet.

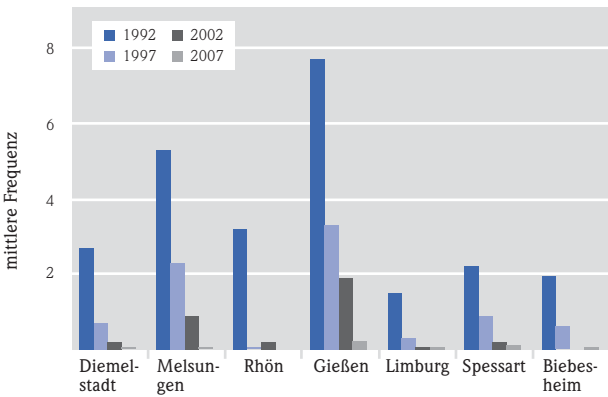


Abb. 45: Häufigkeit des Vorkommens von *Lecanora conizaeoides* (1992/1997/2002/2007).

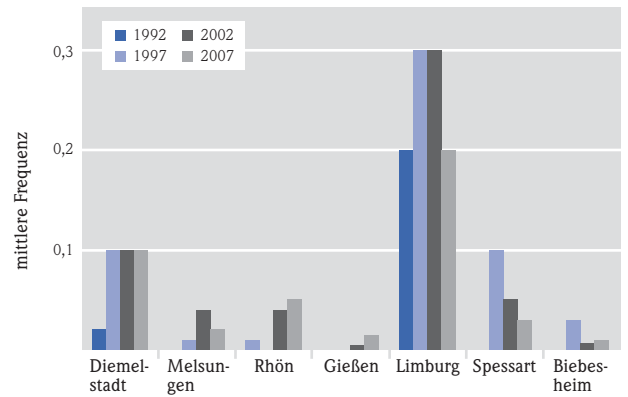


Abb. 48: Häufigkeit des Vorkommens von *Ramalina farinacea* (1992/1997/2002/2007).

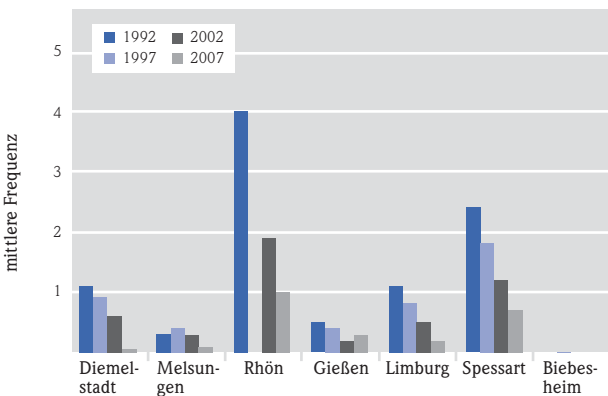


Abb. 46: Häufigkeit des Vorkommens von *Hypogymnia physodes* (1992/1997/2002/2007).

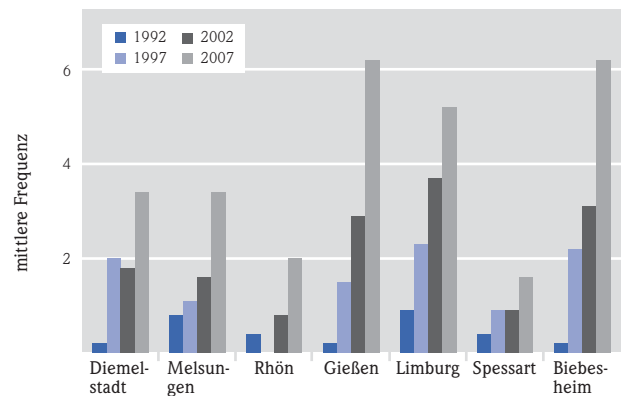


Abb. 49: Häufigkeit des Vorkommens von *Phaeophyscia orbicularis* (1992/1997/2002/2007).

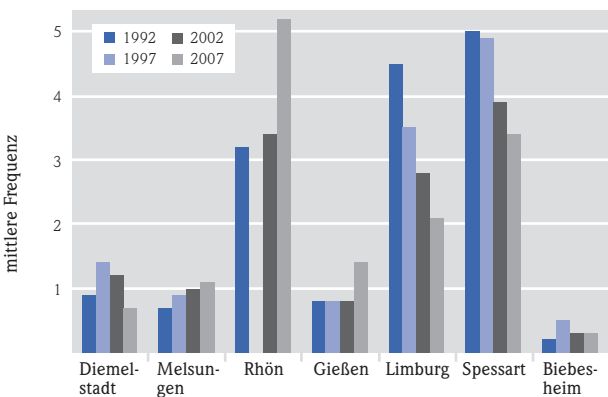


Abb. 47: Häufigkeit des Vorkommens von *Parmelia sulcata* (1992/1997/2002/2007).

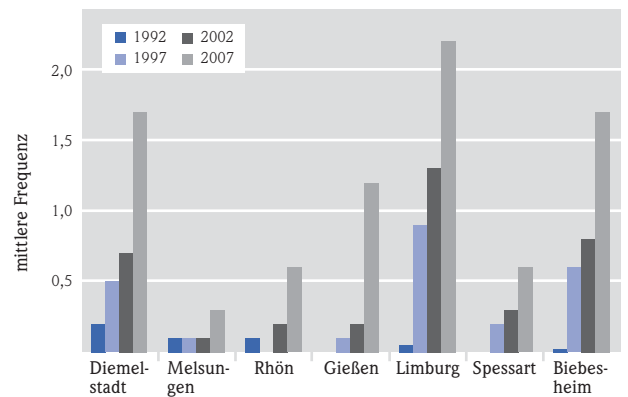


Abb. 50: Häufigkeit des Vorkommens von *Xanthoria parietina* (1992/1997/2002/2007).

4.2 Flächenbestimmung epiphytischer Flechten zur immissionsökologischen Langzeitbeobachtung (Folienverfahren, VDI 3957, 8)

4.2.1 Methoden

Zusätzlich zur Flechtenkartierung nach der VDI-Richtlinie 3757, 13 wurde noch eine genauere Untersuchung des Flechtenbewuchses auf ausgewählten Teilflächen eines Baumstammes vorgenommen (VDI-Richtlinie 3957, 8: Flächenbestimmung epiphytischer Flechten zur immissionsökologischen Langzeitbeobachtung).

Dabei wird auf dem zu untersuchenden Baum eine 20 x 20 cm große Folie befestigt. Alle innerhalb der Fläche von 400 cm² vorkommenden Flechtenkörper werden mit einem Filzstift auf die Folie übertragen (siehe Abb. 51). Anschließend wird die Folie digitalisiert und die Flächen der einzelnen Flechtenkörper werden mittels einer speziellen Software ermittelt.

Die gleiche Prozedur wird jeweils nach 5 Jahren wiederholt. Das Verfahren erlaubt es also, Veränderungen im Flechtenwachstum auf einer kleinen Untersuchungsfläche genau zu erkennen und darzustellen.

Ergebnisse mit dem Folienverfahren liegen erst seit 1997 vor.

Beispielhaft werden hier nur einige Folienergebnisse exemplarisch vorgestellt. (Bei einigen fehlt die – außerplanmäßige – Untersuchung von 1999).

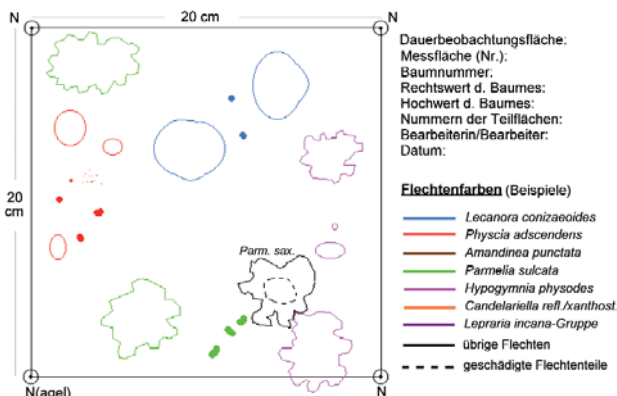


Abb. 51: Schematische Darstellung einer Flechtenfolie.

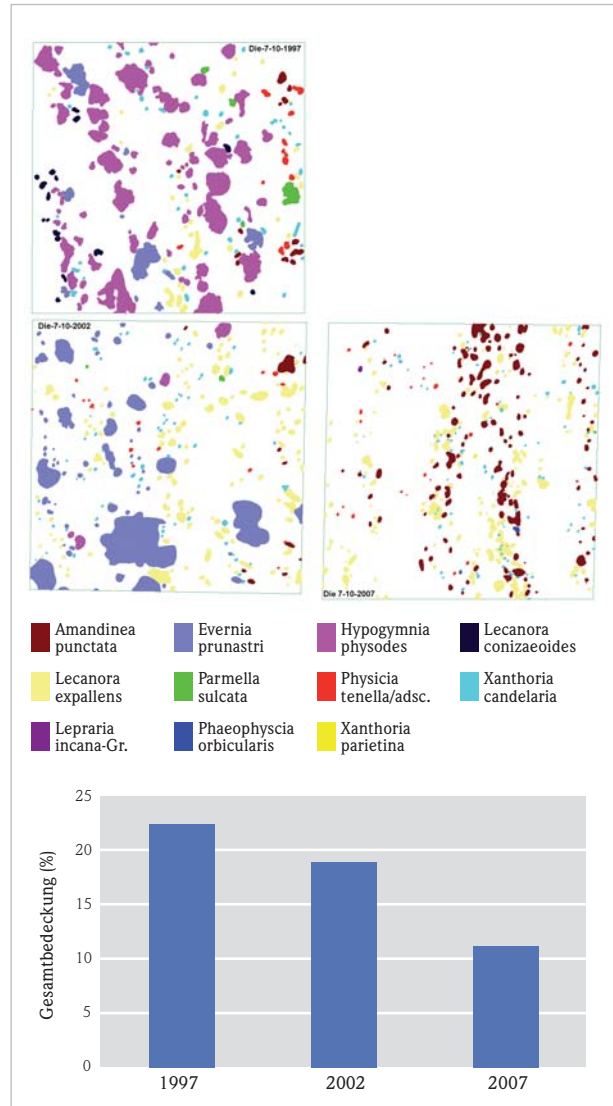


Abb. 52: Entwicklung des Flechtenbewuchses auf der Foliensfläche Diemelstadt-7-10.

4.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Auf der in Abb. 52 vorgestellten Folie aus der DBF Diemelstadt nimmt der Gesamtbedeckungsgrad ab. Dies ist eine Folge des starken Rückganges der beiden vorhandenen Acidophyten (*Hypogymnia physodes*, *Lecanora conizaeoides* – letztere als starker Acidophyt bereits 1997 nur noch rudimentär vorhanden und 2002 gänzlich verschwunden). Offensichtlich sind die pH-Wertverhältnisse auf der Baumborke noch so sauer, dass die Neutrophyten noch keine günstigen Existenzbedingungen vorfinden. Die hier dargestellte Situation ist typisch für solche Messflächen, die noch relativ lange unter SO₂-Einwirkungen zu leiden hatten (v. a. in Melsungen und Gießen).

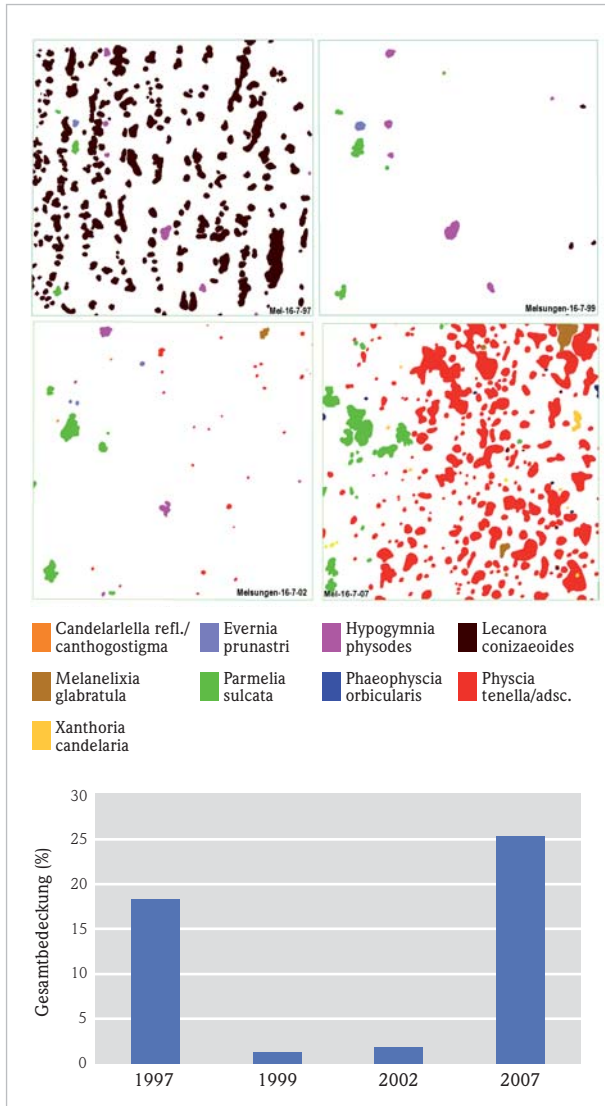


Abb. 53: Entwicklung des Flechtenbewuchses auf der Foliensfläche Melsungen-16-7.

In Abb. 53 ist eine noch extremere Ausgangssituation dargestellt: 1997 ist die Fläche fast ausschließlich von der extrem acidophytischen und toxitoleranten *Lecanora conizaeoides* bewachsen. Vereinzelt Exemplare der ebenfalls säureertragenden *Hypogymnia physodes* und *Evernia prunastri* sowie der neutrophytischen *Parmelia sulcata* treten als Begleiter auf. 1999 ist ein drastischer Wandel zu erkennen: Infolge zurückgehender Versauerung verschwindet *Lecanora conizaeoides* fast vollständig; Neutrophyten sind jedoch noch immer kaum vertreten. Folgerichtig ist ein starker Rückgang der Gesamtflächenbedeckung gegeben. Im Jahr 2002 ist *Lecanora conizaeoides* ausgelöscht, *Hypogymnia physodes* hat ihr Optimum ebenfalls überschritten und erste

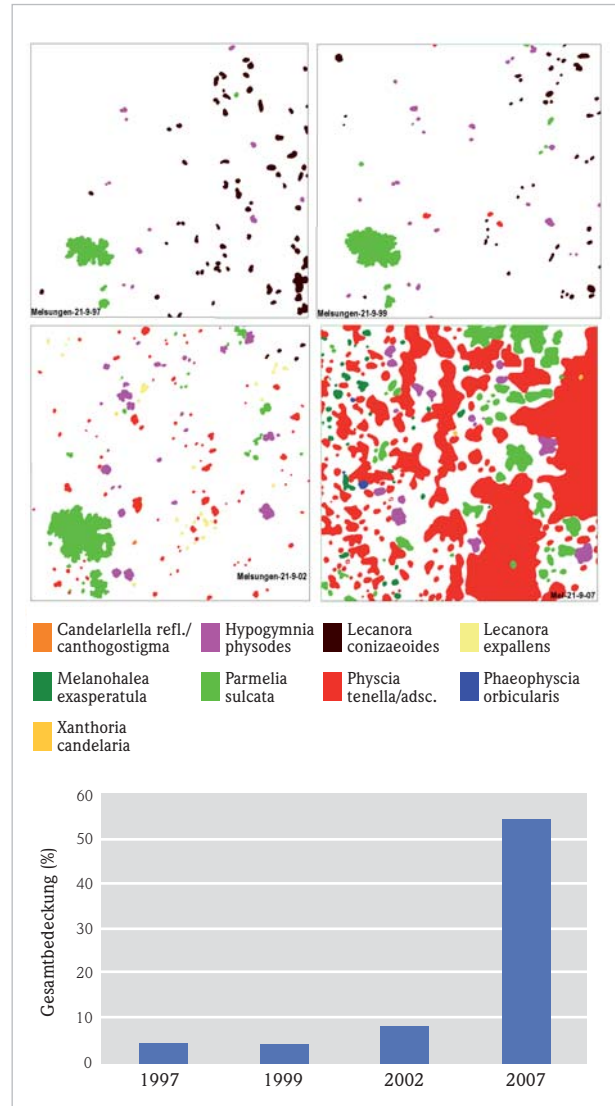


Abb. 54: Entwicklung des Flechtenbewuchses auf der Foliensfläche Melsungen-21-9.

Neutrophyten treten aus den Gattungen der *Physcien* und *Candelariellen* zusätzlich zu *Parmelia sulcata* auf. Darüber hinaus findet sich nun mit *Melanelixia glabratula* bereits eine hinsichtlich ihrer Toxizität etwas anspruchsvollere Art; erste Vertreter der Neutrophyten (*Physcia tenella/adscendens*) erscheinen in geringer Häufigkeit. Bedingt durch die Neuankommlinge steigt die Flächenbedeckung wieder leicht an.

In der jüngsten Erhebung gewinnen die Neutrophyten leicht an Terrain – extreme Zuwächse sind aber bei den Neutrophyten zu beobachten: *Physcia tenella/adscendens* vervielfachen ihren Flächenanteil an der Folie; der noch stärkere Neutrophyt (*Phaeophy-*

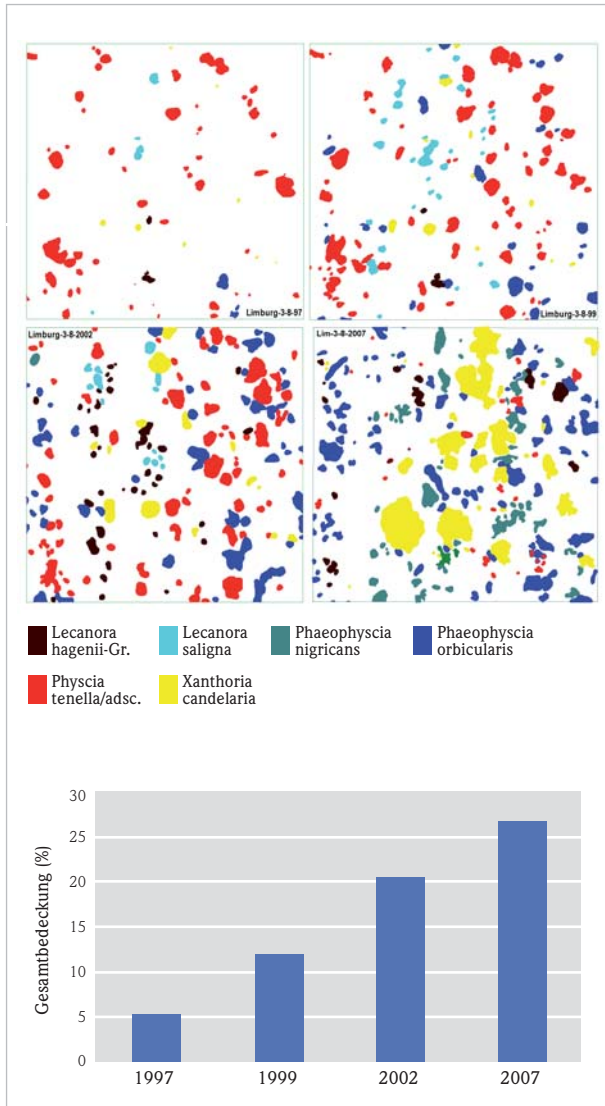


Abb. 55: Entwicklung des Flechtenbewuchses auf der Foliensfläche Limburg-3-8.

scia orbicularis) ist ebenfalls eingetroffen. Diese Folie zeichnet in geradezu klassischer Weise die typische Sukzession (Entwicklung) von einer von Acidophyten bestimmten Ausgangssituation hin zu stärker eutrophierenden Bedingungen nach.

Eine zum Zeitpunkt des Untersuchungsbeginns bereits weiter fortgeschrittene Entwicklung zeigt Abb. 54: *Lecanora conizaeoides* ist schon 1997 nicht mehr dominierend und geht im Verlauf der folgenden Untersuchungen weiter zurück.

Dies führt 1999 zu einer geringfügig verminderten Gesamtbedeckung. Bereits 2002 wird diese Tendenz aber durch die verstärkte Besiedlung mit Neutro-

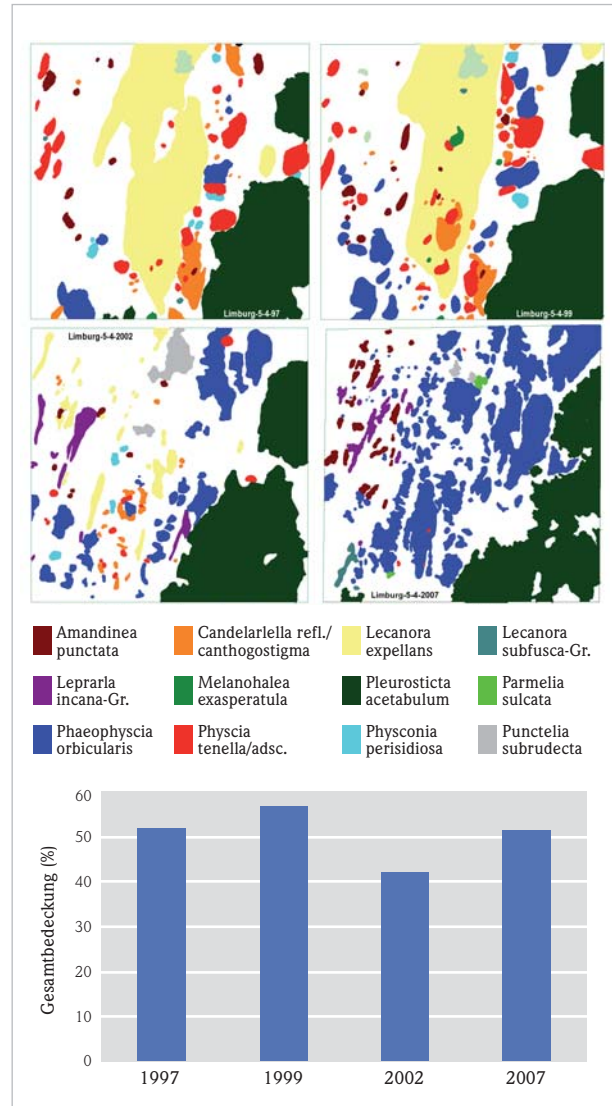


Abb. 56: Entwicklung des Flechtenbewuchses auf der Foliensfläche Limburg-5-4.

phyten und auch schon durch Nitrophyten deutlich überkompensiert. Hinweise auf eine gesteigerte Eutrophierungsgefahr sind hingegen noch nicht festzustellen. Diese setzt erst 2007 mit der Dominanz der *Physciaceen* und von *Phaeophyscia orbicularis* ein. Dennoch ist die Nährstoffanreicherung offenbar noch nicht stark genug, um die Ansiedlung weiterer Neutrophyten zu verhindern.

Typisch für die bereits seit Beginn der Untersuchungen als wenig belastet ausgewiesene DBF Limburg sind Foliensbedeckungen, wie sie in den Abbildungen aus dieser DBF dargestellt sind: Es fehlen von Beginn an die Acidophyten, auf allen Folien ist das gefundene Artenspektrum überdurchschnittlich hoch.

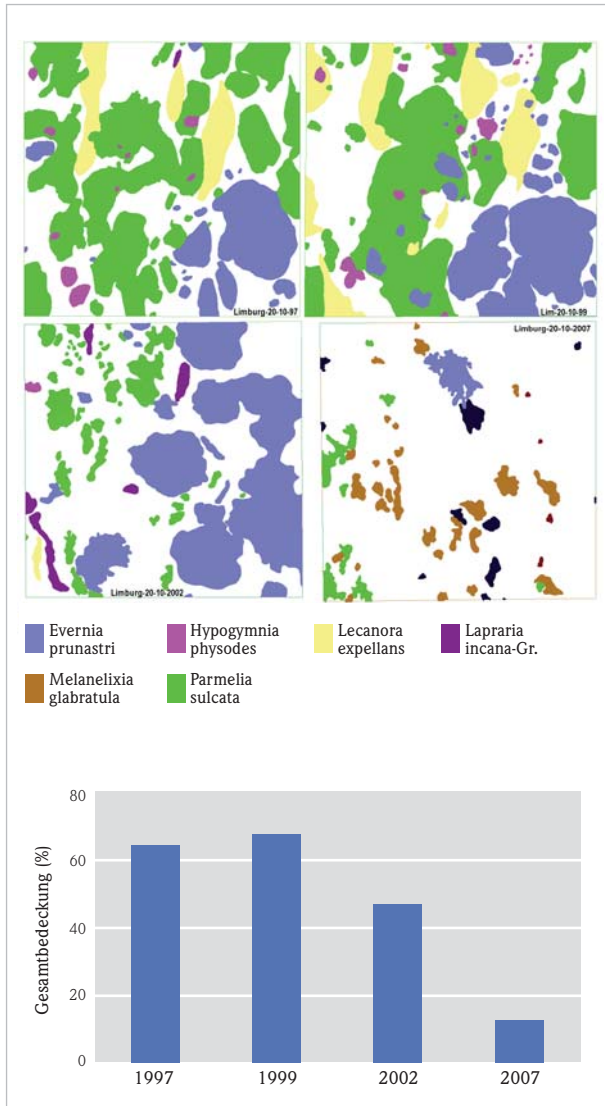


Abb. 57: Entwicklung des Flechtenbewuchses auf der Foliensfläche Limburg-20-10.

Gleiches gilt für die Gesamtbedeckung. Die meisten Neutro-/Nitrophyten sind bereits 1997 vorhanden und nehmen kontinuierlich zu; seit 2002 finden sich vereinzelt bereits die stark nitrophytischen Arten *Phaeophyscia orbicularis* und 2007 auch zusätzlich noch *Phaeophyscia nigricans* (Abb. 55).

Während auf der vorhergehenden Folie eine Zunahme der Gesamtbedeckung zu verzeichnen ist, wie wir sie von ursprünglich stark belasteten DBF kennen, bleibt die Flächenbedeckung bei den nächsten Folien entweder annähernd gleich (Abb. 56) oder geht sogar zurück (Abb. 57). Dieses Phänomen ist typisch für DBF mit guter lufthygienischer Ausgangs-

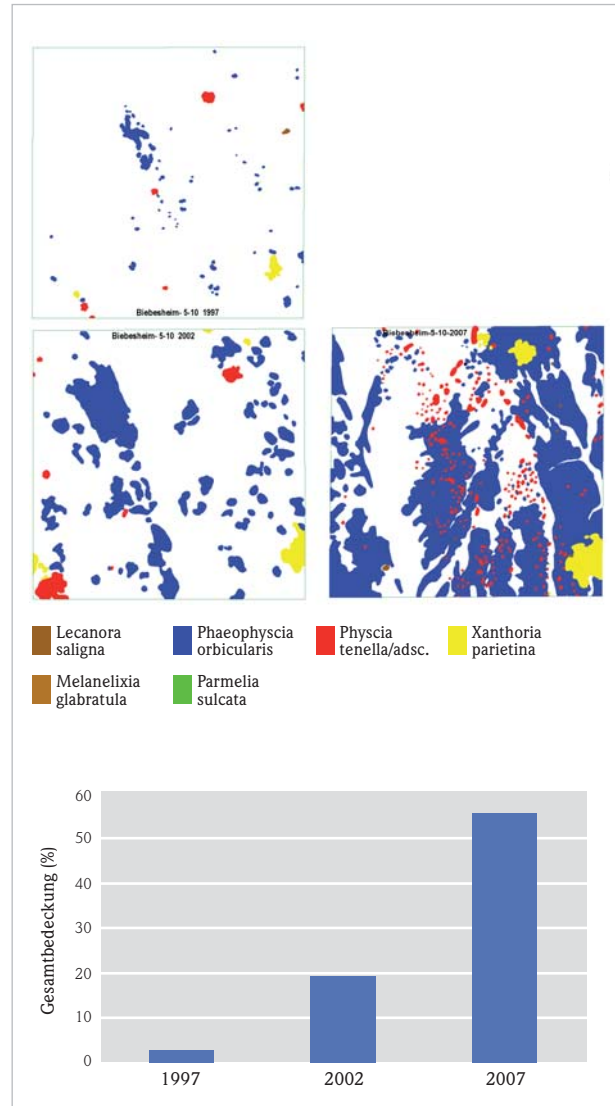


Abb. 58: Entwicklung des Flechtenbewuchses auf der Foliensfläche Biebesheim-5-10.

position im Jahr 1992. Es wird im Allgemeinen dadurch verursacht, dass der Zuwachs der Nitrophyten durch Verschwinden oder Minderung der Neutrophyten kompensiert oder gar überkompensiert wird. Bei der Zusammenfassung wird es Gegenstand der Diskussion sein.

Aus Biebesheim wurden zwei Folien ausgewählt, die beispielhaft die starke Zufuhr eutrophierender Substanzen und die damit einhergehende Erhöhung des pH-Wertes der Baumborken aufzeigen (Abb. 58, 59): Charakteristisch ist das Fehlen von Acidophyten, der Rückgang von neutrophytischen Arten (z. B. *Amandinea punctata*) sowie eine starke Zunahme von schwa-

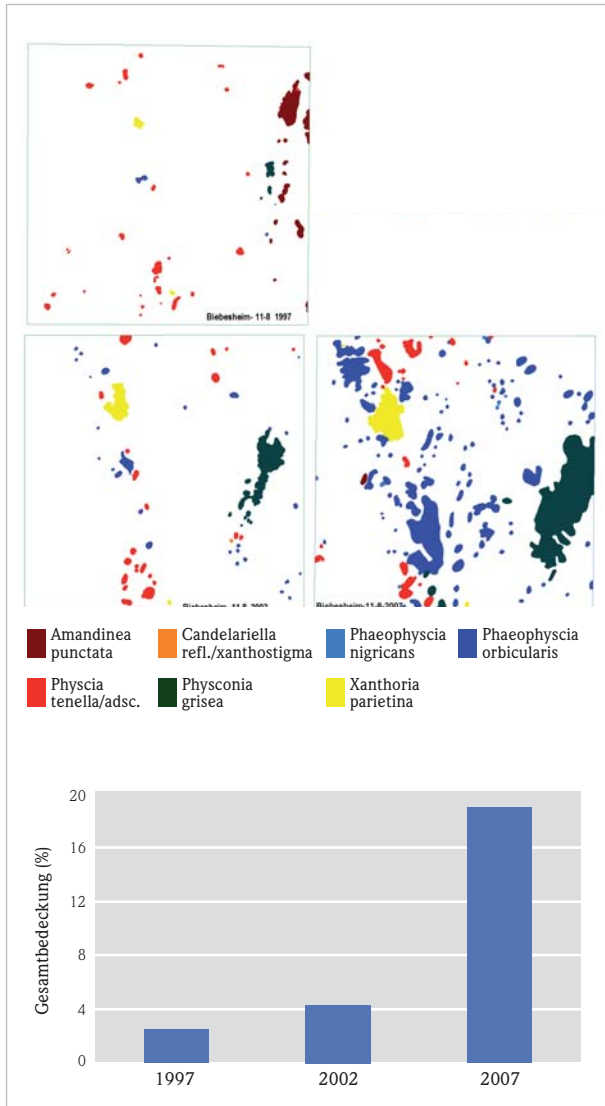


Abb. 59: Entwicklung des Flechtenbewuchses auf der Foliensfläche Biebesheim-11-8.

chen und auch starken Nitrophyten. In Biebesheim finden sich neben den bereits von anderen DBF bekannten Nitrophyten noch weitere Vertreter dieser Gruppe (z. B. *Phaeophyscia nigricans*, *Physconia grisea*).

Zusammenfassung der Ergebnisse von Flechtenkartierung und Flächenberechnung (Kap. 4.1–4.2)

Auf den Baumborken gab es in vorindustrieller Zeit eine artenreiche Flechtenvegetation, die aus Acidophyten (saure Substratbedingungen bevorzugend), Neutrophyten (bevorzugen neutrale bis subneutrale Umweltbedingungen) und Nitrophyten (kommen

unter nährstoffreichen Bedingungen vor – damals z. B. an Alleebäumen → Pferdeäpfel) bestand.

Im Verlauf der SO₂-bedingten Versauerung ihrer Substrate in der Mitte des 20. Jahrhunderts gingen die meisten dieser Flechten bis auf wenige Arten – vorwiegend Acidophyten – zurück. Nach Abnahme der Versauerung gegen Ende des letzten Jahrhunderts fanden zunächst die Acidophyten optimale Bedingungen und breiteten sich wieder aus (siehe Abb. 60; Beispiel Melsungen, 1992).

1992 – also zu Beginn unserer Untersuchungen – waren die Bedingungen an den hessischen DBF allerdings sehr unterschiedlich: An den zu diesem Zeitpunkt noch stark versauerten DBF (z. B. Melsungen, Gießen) gab es nur einige Acidophyten (z. B. *Lecanora conizaeoides*, *Hypogymnia physodes*, *Hypogymnia tubulosa* und – abgeschwächt – *Evernia prunastri*) und sehr wenige Neutro- bzw. Nitrophyten, weil beide Gruppen sehr empfindlich gegenüber SO₂ reagieren. Folgerichtig waren die Luftgüte-Indizes niedrig. In den DBF, bei denen zu diesem Zeitpunkt die Auswirkungen der sauren Immissionen bereits weitgehend verschwunden waren (oder auch nie in starkem Maß vorhanden gewesen waren), gab es optimale Bedingungen für die Flechten (Beispiele sind die DBF Limburg, Rhön und Spessart; LGI hoch): Der allmähliche Rückgang der Acidophyten wurde durch verstärktes Auftreten der Neutrophyten überkompensiert. Diese Arten haben ihr Optimum bei leicht sauren bis neutralen Bedingungen und Vorhandensein einer mittleren Versorgung von Nähr-Ionen. Da die Anwesenheit von Acido- und Neutrophyten den LGI positiv beeinflusst, sind in den zuletzt genannten DBF die Luftgüte-Indizes 1992 hoch.

Betrachtet man die Situation im Jahr 2007, so ergibt sich folgendes Bild (Abb. 60): In den ehemals stark belasteten DBF Melsungen und Gießen ist der Einfluss der sauren Umwelteinwirkungen inzwischen zurückgegangen. Das hat zur Folge, dass die Acidophyten inzwischen ebenfalls abnehmen, jedoch wird diese Abnahme von der Zunahme der Neutrophyten überkompensiert. Diese DBF sind aus ökologischer Sicht fast bei jenem Optimum angelangt, das in Limburg und im Spessart bereits vor 15 Jahren herrschte (deutlicher Anstieg der Luftgüte-Indizes). In den beiden zuletzt genannten DBF hat sich die Situation 2007 dagegen leicht verschlechtert: Die Acidophyten sind weiter zurückgegangen, bei den Neutro-

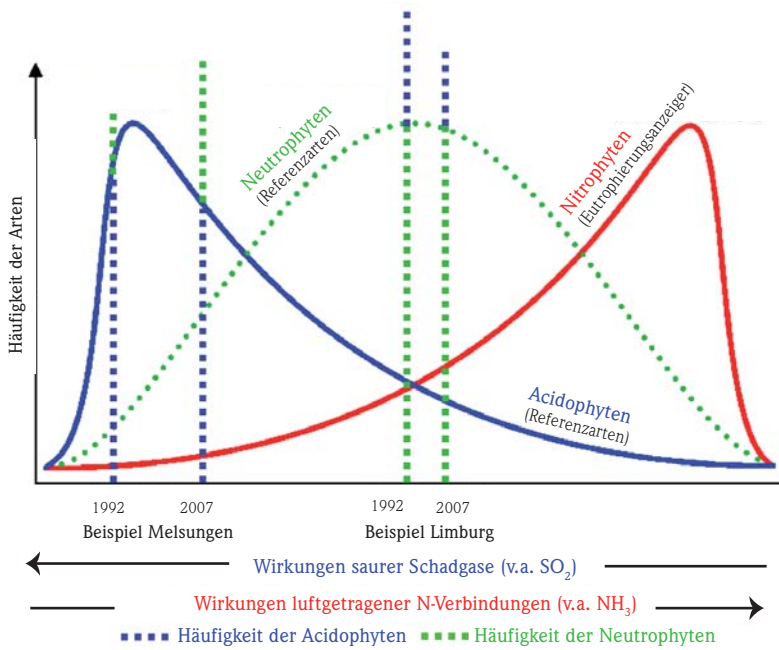


Abb. 60: Verhalten von Acido-, Neuro- und Nitrophyten unter verschiedenen lufthygienischen Bedingungen.

phyten ist ebenfalls ein Rückgang festzustellen, weil die Auswirkungen luftgetragener Stickstoffverbindungen inzwischen überoptimal geworden sind. Als Quellen für die Zunahme dieser Stickstoffverbindungen – hier v. a. NH₃ – werden Intensivlandwirtschaft und Ammoniakausstoß aus Kraftfahrzeugen mit Katalysator genannt.

In den DBF Limburg, Rhön, Spessart erfahren zzt. lediglich die Nitrophyten deutliche Zuwachsraten. Da diese aber nicht positiv in die Berechnung der Luftgüteindizes eingehen, sondern bei sehr starkem Vorhandensein sogar negativ bewertet werden, bleiben die Indizes konstant oder sinken sogar etwas ab.

Es stellt sich nun die Frage, wie diese Resultate zu bewerten sind:

- Zunächst ist festzustellen, dass ein direkter negativer Einfluss von SO₂ auf die menschliche Gesundheit, wie er eventuell 1992 noch bei einigen Flechten-Dauerbeobachtungsflächen denkbar war,

heute bei keinem der untersuchten Gebiete mehr zu befürchten ist. Dies wird durch den inzwischen überall± deutlich eingetretenen Rückgang der Acidophyten belegt.

- Während die ehemals stärker belasteten DBF sich aus ökosystemarer Sicht einem Optimalzustand nähern, haben andere diesen bereits leicht überschritten.
- Einer weiteren Zunahme der Wirkungen eutrophierender Substanzen in der Luft sollte entgegengewirkt werden: Wie sich in Teilen der Niederlande und auch des so genannten „Schweinegürtels“ in NW-Deutschland belegen lässt, führt eine weitere Verschiebung der Flechtenvegetation zugunsten der Nitrophyten zu einer Verringerung der Diversität von Ökosystemen: Artenreiche Lebensräume, wie Heiden oder Waldgesellschaften auf sauren und nährstoffarmen Standorten werden von einer eintönigen Vegetation – bestehend aus wenigen Nährstoffzeigern – abgelöst. Der Verarmung der Pflanzenwelt folgt die der Tierwelt nach.
- Da Flechten als wechselfeuchte Organismen auf Veränderung unserer Luftzusammensetzung schneller reagieren als Höhere Pflanzen, können sie als Frühwarnsystem zum Nachweis derartiger Gefahren eingesetzt werden.

Die aufgezeigten Tendenzen in der Entwicklung der lufthygienischen Situation an den hessischen Dauerbeobachtungsflächen lassen sich sowohl mit Hilfe der Methode der Flechtenkartierung als auch mit dem Flächenberechnungsverfahren nachweisen.

Eine Wiederholungskartierung in fünf Jahren könnte aufzeigen, ob der Prozess des Wandels in der Zusammensetzung der Schadstoffe in der Luft zum Abschluss gekommen ist. Sollte er weitergehen, so wäre es von Interesse, in welche Richtung er sich fortsetzt.

4.3 Immissionsbezogene Flechtenkartierungen am Frankfurter Flughafen (1992–2007)

Im Jahr 2007 wurde in der Umgebung des Flughafens Frankfurt/Main eine immissionsbezogene Flechtenkartierung nach den Vorgaben der VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 durchgeführt; d.h. die Methoden entsprachen denen der im vorigen Kapitel beschriebenen Untersuchungen in den hessischen Flechten-Dauerbeobachtungsflächen.

Die Umgebung des Flughafens war bereits 1992 im Rahmen einer Gesamtkartierung des Bundeslandes Hessen einer Flechtenkartierung unterzogen worden, so dass einerseits ein räumliches Bild der lufthygienischen Situation des Untersuchungsgebietes wiedergeben, zum anderen aber auch die zeitliche Entwicklung der Belastungssituation zwischen der ersten Kartierung (1992) und der von 2007, also 15 Jahre später, dargestellt werden konnte.

4.3.1 Methoden

Über das Untersuchungsgebiet wurde – wie bei den übrigen Flechtendauerbeobachtungsflächen (DBF) in Hessen – ein Raster von 1 km Seitenlänge gelegt (Abb. 61).

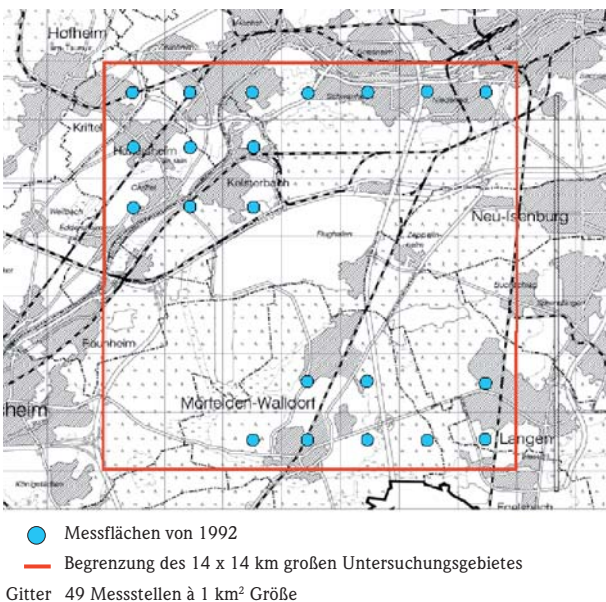


Abb. 61: Lage und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes „Flughafen Frankfurt/Main“.

In den dadurch entstandenen 49 Messflächen von jeweils 1 km² Größe erfolgte die Untersuchung der Flechten an jeweils 6–12 geeigneten Bäumen. Im Jahr 1992 waren 21 Messflächen kartiert worden, 2007 dagegen 24. Da sich in den restlichen nicht die Mindestanzahl geeigneter, freistehender Laubbäume fand, mussten sie verworfen werden (das gilt insbesondere für den eigentlichen Flughafenbereich sowie für die angrenzenden Waldgebiete).

4.3.2 Ergebnisse und Diskussion

Ein erster Hinweis auf Verbesserungen hinsichtlich der lufthygienischen Verhältnisse lässt sich aus einem Anstieg der Artenzahl ablesen. Diese hat sich im Untersuchungsgebiet Flughafen zwischen 1992 bis 2007 mehr als verdoppelt (siehe Abb. 62). Auch die mittlere Anzahl von Flechtenarten pro Station ist im Vergleichszeitraum drastisch angestiegen. Betrachtet man allerdings die mittleren Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger, so ist zu erkennen, dass ein Großteil des Zuwachses auf diese Arten zurückzuführen ist. Da dieses Phänomen jedoch seit einiger Zeit in allen hessischen Flechten-Dauerbeobachtungsflächen auftritt, ist hier keine Zuordnung zu flughafenspezifischen Emissionen zu erkennen. Andererseits kann man jedoch auch sehen, dass die Referenzarten, die eine Verbesserung der lufthygienischen Bedingungen anzeigen, stark zugenommen haben.

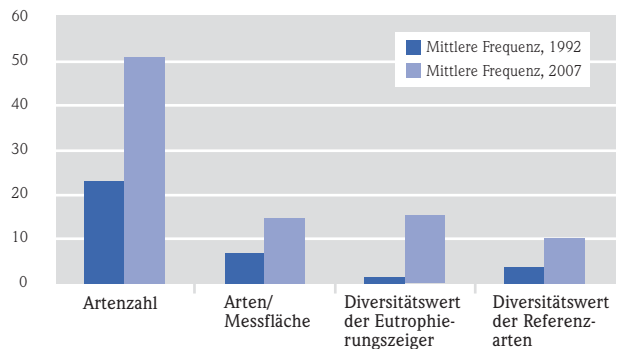


Abb. 62: Entwicklung von Artenzahl, mittlerer Artenzahl/Messfläche, Diversitätswerten von Eutrophierungszeigern und Referenzarten.

Ein Vergleich der Entwicklung einzelner Flechtenarten zwischen 1992 und 2007 lässt erkennen, dass alle Eutrophierungszeiger stark zugenommen haben (Abb. 63): War z. B. *Phaeophyscia orbicularis* 1992 im Untersuchungsgebiet fast nicht existent, so

kommt sie heute mit einer Frequenz von 4,2 vor; d. h. sie ist in 42 % aller untersuchten Kleinflächen des Aufnahmegeritters von 10 x 10 cm gefunden worden. Andere Arten, wie z. B. die *Xanthorien* gab es vor 15 Jahren an den Bäumen im Untersuchungsgebiet noch gar nicht, heute dagegen fallen sie an den Baumborken wegen ihrer auffallend gelben Farbe selbst flechtenkundlichen Laien überall ins Auge. Wie bereits erwähnt, ist dieser Trend auf verstärkte Einwirkungen eutrophierender Substanzen (z. B. luftgetragener Stickstoffverbindungen) zurückzuführen.

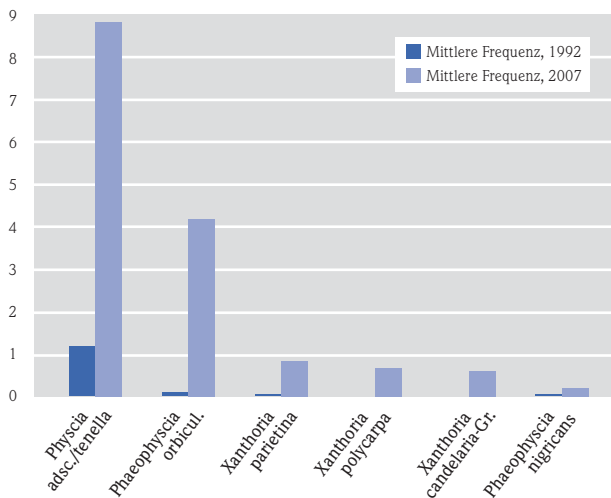


Abb. 63: Entwicklung der Frequenz der häufiger vorkommenden Eutrophierungszeiger.

Die Entwicklungstendenzen der Referenzarten (zeigen eine Verbesserung der lufthygienischen Situation an) sind nicht so einheitlich, wie dies bei den Eutrophierungszeigern der Fall ist (Abb. 64): Zunächst ist bei einigen Arten sogar ein deutlicher Rückgang ihrer Häufigkeit (Frequenz) zu beobachten. Besonders auffällig ist dies bei der acidophytischen *Lecanora conizaeoides*. Kam sie 1992 noch mit einer Häufigkeit von 49 % vor, so ist sie heute extrem selten geworden (< 2 %). Ähnliche Tendenzen lassen sich bei *Amandinea punctata*, bei *Lecanora expallens* und *L. saligna* beobachten. Alle genannten Arten gelten als ± acidophytisch. Ihr Rückgang lässt sich mit der Verminderung saurer Immissionen (Schwefeldioxid) erklären.

Bei Acidophyten, wie z. B. *Hypogymnia physodes* oder *Evernia prunastri* lässt sich der oben genannte Trend (noch) nicht erkennen – wie er in den meisten übrigen hessischen Flechtendauerbeobachtungs-

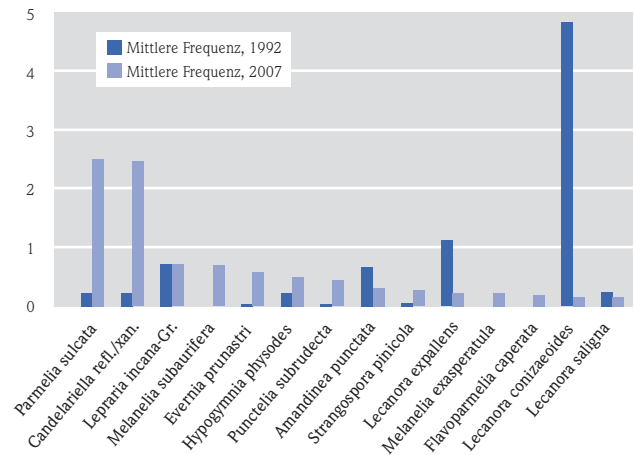


Abb. 64: Entwicklung der Frequenz der häufiger vorkommenden Referenzarten.

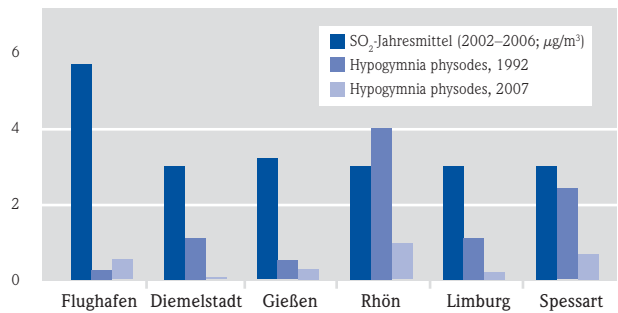


Abb. 65: Entwicklung der Häufigkeit von *Hypogymnia physodes* in Bezug zur SO₂-Konzentration.

flächen zu bemerken ist (Abb. 65). Daraus kann man ableiten, dass im Bereich des Flughafens die SO₂-Belastung noch immer etwas höher ist als in den mehr ländlichen Bereichen Hessens. Diese Vermutung bestätigt sich, wenn man die durchschnittlichen SO₂-Werte der Jahre 2002–2006 zum Vergleich heranzieht.

Die meisten der Referenzarten zeigen jedoch deutliche Tendenzen zu größerer Häufigkeit, was auf eine Verbesserung der allgemeinen lufthygienischen Situation hinweist. (Dieser Trend ist auch bei den in der Abbildung nicht dargestellten – weil insgesamt eher seltenen – in Bezug auf Immissionsbelastungen ziemlich empfindlichen Arten zu erkennen: Auch sie haben im Vergleichszeitraum zugenommen). Von den 29 Arten, die seit 1992 wieder in das Gebiet um den Flughafen eingewandert sind, gehören 24 (83 %) zur Gruppe der Referenzarten.

In Abb. 66 ist die Entwicklung der lufthygienischen Situation zwischen 1992 und 2007 dargestellt. Im Jahr der ersten Untersuchung gehörten 75 % der damals untersuchten 20 Messstellen der schlechtesten Kategorie an (sehr geringe Luftgüte). 15 % der Messstellen besaßen eine geringe Luftgüte und nur 10 % im Süden des Untersuchungsgebietes hatten eine mittlere Luftgüte.

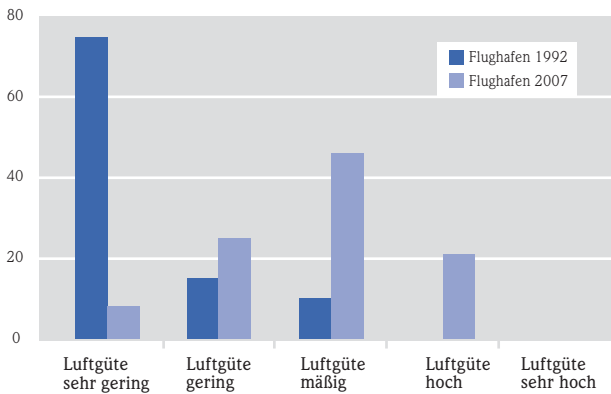


Abb. 66: Zugehörigkeit der Messflächen zu den Luftgütekategorien (in %; 1992–2007).

2007 haben sich die Verhältnisse grundlegend gewandelt: Von den insgesamt 24 für eine immissionsbezogene Flechtenuntersuchung geeigneten Mess-

flächen sind nur noch 8 % der schlechtesten Luftgüte zuzuordnen, 25 % gehören der zweit schlechtesten Luftgüteklasse an. Die Mehrzahl der Stationen (46 %) findet sich im Bereich mittlerer Luftgüte und 21 % sogar in der zweitbesten Kategorie (hohe Luftgüte). Diese Ergebnisse beweisen, dass sich die lufthygienischen Verhältnisse in den letzten 15 Jahren drastisch verbessert haben. Dieser Befund steht im Einklang mit den Beobachtungen an anderen hessischen Flechten-Dauerbeobachtungsflächen, hat also nichts mit den Auswirkungen des Flughafens zu tun, sondern ist ein überregionales Phänomen.

Aus Abb. 67 ergibt sich die räumliche Verteilung der Messflächen unterschiedlicher Luftgüte: Weder für die Untersuchung von 1992 noch für die aktuelle lässt sich eine räumliche Abstufung der Flechten-Indizes nachweisen, die einen Bezug zum Flughafen erkennen lässt. Während die Kartierung von 1992 eine insgesamt relativ einheitliche Verteilung der Luftgüte auf niedrigem Niveau aufzeigt, ergibt sich für 2007 ein kleinräumig differenziertes Bild.

Die zweite Ziffer hinter dem Punkt war bei allen Flächen im Jahr der ersten Untersuchung 1, was bedeutet, dass der Einfluss eutrophierender Verbindungen zum damaligen Zeitpunkt sehr gering war.

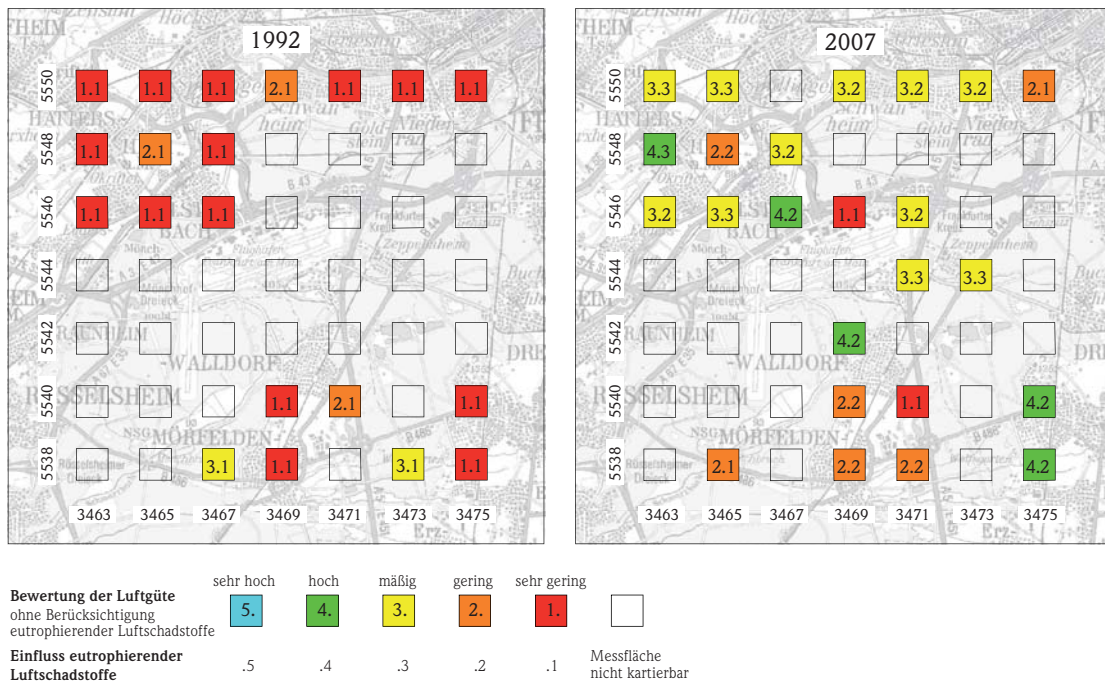


Abb. 67: Entwicklung der Luftgüte-Indizes im Umfeld des Flughafens Ffm (1992–2007).

Hingegen ist festzustellen, dass 2007 die Stufe 2 vorherrscht, was auf einen zunehmenden Einfluss luftgetragener Stickstoffverbindungen (u. a. Ammoniak) schließen lässt. In mehreren Messflächen im Nordwesten des Untersuchungsgebietes taucht sogar mehrmals die Ziffer 3 hinter dem Punkt auf; dies ist mit einem mittleren Einfluss eutrophierender Verbindungen gleichzusetzen. Da auch dies ein für weite Teile Hessens gültiges Phänomen ist, kann man davon ausgehen, dass der Flughafen an dieser Entwicklung keinen maßgeblichen Anteil hat.

Ein Vergleich der Flughafenergebnisse mit denen der hessischen DBF (siehe Abb. 35–41) zeigt keine Andersartigkeit der Luftgütwerte oder deren zeitlicher Entwicklung, die auf einen Einfluss des Flughafens zurückgeführt werden könnte.

Hier wie dort manifestiert sich die Abnahme der Immissionsbelastung in einer Rückkehr von Arten, die in der Zeit extremer Belastung verschwunden waren. Die Verbesserung der lufthygienischen Situation ist also ebenso wenig ein flughafenspezifisches Phänomen wie die Zunahme der Eutrophierungszeiger.

4.3.3 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Flechtenuntersuchungen in den hessischen Dauerbeobachtungsflächen (einschließlich des Frankfurter Flughafens) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bei den Flechten zeigte sich 1992, zum Zeitpunkt der ersten Untersuchung, auf Grund hoher allgemeiner Immissionsbelastung in weiten Teilen Hessens und am Flughafen eine völlige Verarmung der Flechtenvegetation.
- Mit zunehmender Verbesserung der lufthygienischen Verhältnisse innerhalb des Untersuchungszeitraumes – hervorgerufen durch verminderte Immissionen – stieg die Artenzahl der Rückeinvwanderer an.
- Kamen zunächst nur toxisolerante Arten zurück, so ist inzwischen auch eine Rekolonisation durch empfindliche Spezies zu beobachten.
- Der Vergleich der Flechtenvegetation zwischen 1992 und 2007 zeigt darüber hinaus einen deutlichen Anstieg von Arten, die durch eutrophierende Luftschadstoffe begünstigt werden.
- Ein Einfluss des Flughafens auf die Flechten des Untersuchungsgebietes ist nicht nachweisbar.

4.4 Flechten als Anzeiger des Klimawandels

Als wechselfeuchte (poikilohydre) Organismen decken die Flechten ihren Wasserbedarf ausschließlich über Niederschläge, Tau oder Nebel. Da sie keine Transpirationsschutzmechanismen besitzen, ist ihre Stoffwechselaktivität und – damit verbunden – ihr Wachstum direkt von der relativen Feuchte der Umgebungsluft abhängig. Diese wiederum wird stark von der aktuellen Temperatur beeinflusst. Somit können Flechten als Indikatoren für Temperatur und Luftfeuchtigkeit verwendet werden. Dabei geht es nicht darum, Flechten sinnbildlich als Messgeräte einzusetzen – vielmehr sollen biologische Phänomene beschrieben werden, die mit einem Klimawandel einhergehen und die ganze Ökosysteme beeinflussen. Flechten fungieren dabei als Frühwarnsysteme, da sie – auf Grund ihrer Eigenschaften als Poikilohydre – schneller auf solche Veränderungen reagieren als z. B. Höhere Pflanzen. Zudem sind sie auch im Winterhalbjahr stoffwechselaktiv, so dass die mit ihnen gewonnenen Aussagen für das ganze Jahr Gültigkeit haben. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird beim VDI zzt. an der Erstellung einer Richtlinie gearbeitet, die Flechten als Bioindikatoren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung des Klimawandels verwendet (VDI 3957, Bl. 20; Vorentwurf 2009). Als geeignete Flechtensubstrate werden Bäume (epiphytische Flechten) und Mauern (epilithische Flechten) vorgeschlagen. Von der Arbeitsgruppe „Wirkungen auf Niedere Pflanzen“ beim VDI wurde eine Liste von Arten erstellt, die als Wärmezeiger einzustufen sind und deren Bestandsentwicklung auf Klimaveränderungen hinweisen soll.

Man war sich in der Arbeitsgruppe einig, dass standardisierte Verfahren wie die Flechtenkartierungsrichtlinie zum Nachweis von Luftverunreinigungen (VDI 3957, Bl. 13; 2005) hierbei nicht zielführend sein konnten, weil auf einer kleinen standardisierten Erfassungsfläche die im Augenblick noch mit wenigen Individuen einwandernden Wärmezeiger nicht erfasst werden können. Um diese zu finden, galt es einerseits, hinsichtlich des Substrates ein breites Spektrum zu erfassen. Dies wurde dadurch erreicht, dass sowohl Epiphyten als auch Gesteinsflechten in die Untersuchung mit einbezogen wurden; weitere methodische Vorgaben, die die strenge Standardisierung der bisherigen biologischen Richtlinien aufweichen, werden im Kapitel „Methoden“ dargestellt.

Andererseits sollte durch eine ausreichende Zahl von Untersuchungsflächen sichergestellt werden, dass die Wärmezeiger auch wirklich gefunden werden können. Der Richtlinienentwurf schreibt demzufolge folgerichtig eine Anzahl von mindestens 20 Bäumen und mindestens 30 Mauerstücken pro Dauerbeobachtungsfläche als Messflächen vor.

Während die Flechtenrichtlinie zum Nachweis von Luftverunreinigungen auf Grund ihres hohen Standardisierungsgrades sowohl die Darstellung eines räumlichen als auch eines zeitlichen Musters der lufthygienischen Situation ermöglicht, ist bei der Klima-Richtlinie, auf Grund ihrer geringeren Standardisierung, lediglich der Vergleich zeitlich aufeinander folgender Erhebungen am gleichen Standort zulässig.

Ein wesentliches Problem, mit dem sich die Arbeitsgruppe konfrontiert sah, war die Tatsache, dass es zwar empirische Beobachtungen über Arealverschiebungen von Flechten in den letzten Jahrzehnten gibt (atlantische Arten wandern in Mitteleuropa ein, einheimische Arten verschieben ihre Arealgrenzen in höhere – kältere – Lagen, Kältezeiger sind rückläufig). Vergleiche mit den zugehörigen klimatischen Daten sind jedoch nicht vorhanden. Erst mit deren Hilfe lässt sich aber ein Zusammenhang zwischen den Veränderungen im Flechteninventar und einem Klimawandel wahrscheinlich machen.

Aus diesem Grund wurden in Hessen vom Landesamt für Umwelt und Geologie Untersuchungen an Bäumen und Mauern nach den Vorgaben des VDI-Richtlinienentwurfes durchgeführt und in Beziehung zu Klimadaten gestellt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden hier vorgestellt; es wird zunächst auf die epilithischen, anschließend auf die epiphytischen Flechten eingegangen.

4.4.1 Methoden

Über das Bundesland Hessen verteilt wurden in den sieben bereits existierenden Flechtendauerbeobachtungsflächen und zwei zusätzlich eingerichteten Flächen ausgewählte Bäume und Mauerabschnitte auf ihren Flechtenbewuchs hin untersucht; die zusätzlichen wurden im Rheingau (sehr warm) und im Odenwald (kühl) eingerichtet. Die Lage der Untersuchungsflächen ist aus Abb. 24 zu ersehen.

4.4.1.1 Erhebungen der Flechten an Mauern

Von einem beliebigen Punkt in einer Ortschaft ausgehend erfolgte die Auswahl der Mauerabschnitte auf einer Untersuchungsfläche von ca. 1 km². Dabei wurde versucht, möglichst unterschiedliche Mauer-substrate (silikatische Gesteine und Kalksteine, Ziegelsteine, Beton, Mörtel), unterschiedliche Expositionen (N, S, W, O, Horizontal- bzw. Vertikalflächen) und unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen (Mauern in Parks, Friedhöfen, Garten- und Stützmauern in jeweils unterschiedlicher Höhe) zu erfassen, um eine weitgehend repräsentative Auswahl zu erhalten. Weiterhin wurde darauf geachtet, dass sowohl junge als auch alte Mauern in die Untersuchung eingingen. Die Aufnahme erfolgte jeweils auf einer Fläche von 2 m². Kartiert wurde nur das Vorhandensein (also nicht die Frequenz) von Arten an den Mauern. Ein Beispiel eines kartierten Mauerabschnittes ist in Abb. 68 dargestellt.

Obwohl im Entwurf der Richtlinie lediglich die Erfassung der als Wärmezeiger eingestuften Arten gefordert ist, wurden für diese Basisuntersuchung in Hessen alle vorhandenen Spezies erfasst, um gegebenenfalls noch weitere Arten in die Liste aufnehmen zu können, sofern sich diese als geeignete Indikatoren erweisen sollten.

Für den Vergleich der Flechten-Untersuchungsergebnisse mit der jeweiligen klimatischen Situation lagen keine Daten von nahe gelegenen Klimamessstationen vor. Daher wurden aus den Klima-Karten des Umweltatlases des HLUg die interpolierten Klimawerte des Zeitraumes 1991–2000 entnommen, soweit diese vorhanden waren. Dieser Zeitraum stellt einen akzeptablen Kompromiss dar: Einerseits sollen die Daten möglichst aktuell sein, andererseits ist bekannt, dass das gegenwärtige Flechtenvorkommen die Umweltsituation der letzten 5–10 Jahre widerspiegelt. Abb. 69 zeigt die unterschiedliche klimatische Situation der neun hessischen Untersuchungsgebiete hinsichtlich ihrer Temperaturen: Während Biebesheim, der Rheingau und der Limburger Raum im südwestlichen Hessen die höchsten Temperaturen aufzuweisen haben, sind die Mitteltemperaturen in der Rhön, in Melsungen und in Diemelstadt deutlich geringer.

Auf Grund der geringen Höhenunterschiede liegt die maximale Temperaturdifferenz allerdings nur bei



Abb. 68: Untersuchung eines Mauerabschnittes.

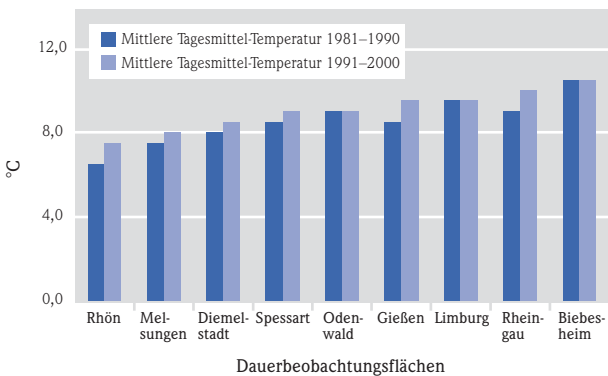


Abb. 69: Mittlere Tagesmitteltemperaturen (°C) der Untersuchungsgebiete für die Zeiträume 1981–1990 und 1991–2000.

3 °C. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Werte von 1981–1990 geringfügig unter denen von 1991–2000 liegen. Da Flechten auf Umweltveränderungen nach ca. fünf Jahren zu reagieren beginnen, wird im Folgenden nur noch auf den Zeitraum 1991–2000 Bezug genommen.

Im Rahmen der Untersuchung sollte geprüft werden, inwieweit ein Zusammenhang zwischen den gemessenen Klimawerten und dem festgestellten Flechtenbewuchs an Mauern besteht.

4.4.1.2 Erhebungen der Flechten an Bäumen

Ähnliche Untersuchungen wie bei den Mauerflechten wurden auch an epiphytischen Flechten vorgenommen. Dazu wurden pro DBF 20 Laubbäume nach

den Vorgaben des Richtlinienentwurfes auf ihren Flechtenbewuchs untersucht. Im Gegensatz zur „Immissions“-Richtlinie wird hierbei nicht nach streng standardisierten Vorgaben vorgegangen, um die Chance zu erhöhen, die bisher erst vereinzelt einwandernden Wärmezeiger zu erfassen: Es werden Bäume möglichst aller vorkommenden Arten in die Untersuchung mit einbezogen; die Bäume sollen unterschiedlich alt sein, unterschiedliche Neigung besitzen, unterschiedlicher Besonnung ausgesetzt sein usw.

Auch die Aufnahme am Baum erfolgte auf andere Weise als bei der immissionsbezogenen Flechtenkartierung: Wie aus Abb. 70 hervorgeht, gibt es hier nicht das standardisierte kleine Aufnahmegitter, sondern die Flechten werden vom Erdboden bis in 2 m Höhe erfasst. Auch diese Erweiterung der Aufnahmefläche soll die Wahrscheinlichkeit erhöhen, dass die noch seltenen Wärmezeiger gefunden werden.

4.4.2 Ergebnisse und Diskussion

4.4.2.1 Mauerflechten

Auf den 270 Mauerabschnitten der neun hessischen Untersuchungsflächen, deren Flechtenbewuchs erfasst wurde, konnten insgesamt 123 Flechtenarten nachgewiesen werden. Die durchschnittliche Artenzahl pro Untersuchungsfläche lag bei 61. Im Durchschnitt wurden je Mauerabschnitt 17 Arten gefunden, wobei die Spanne von 4 (Gartenmauer

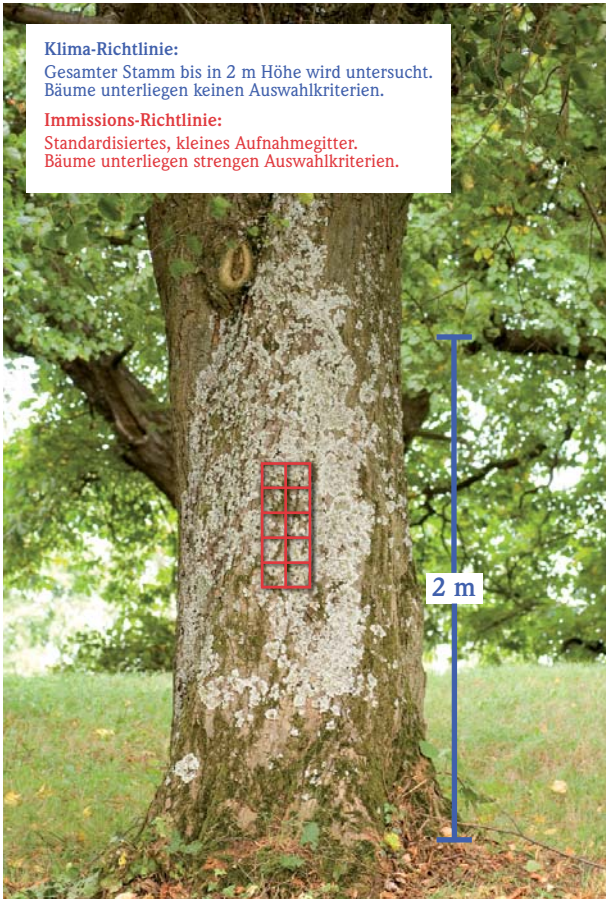


Abb. 70: Untersuchungsfläche am Baum.

in Limburg) bis zu 38 Arten (Friedhof von Poppenhausen/Rhön) reichte.

Als besonders artenreich stellten sich alte Mauern dar, wie sie insbesondere an Friedhöfen, Kirchen oder anderen historischen Anlagen zu finden sind.

Betrachtet man die Gesamtzahl der gefundenen Flechtenarten, so zeigt sich, dass die eher kühlen Untersuchungsflächen Rhön, Spessart und Odenwald die meisten Spezies aufweisen (Abb. 71).

Ein umgekehrtes Bild ergibt sich jedoch, wenn man unter diesen nur solche Arten auswählt, die als Wärmezeiger gelten: Hier weisen die Rhön, der Odenwald und Melsungen die geringste Zahl an Wärmezeigern auf. Noch deutlicher wird dieser Trend, wenn man die Häufigkeit des Vorkommens der Wärmezeiger betrachtet: Während sie in der Rhön, in Melsungen und im Spessart nur spärlich zu finden sind, kommen sie in Limburg, im Rheingau und in Biebesheim verstärkt vor. Diese Beobachtungen aus

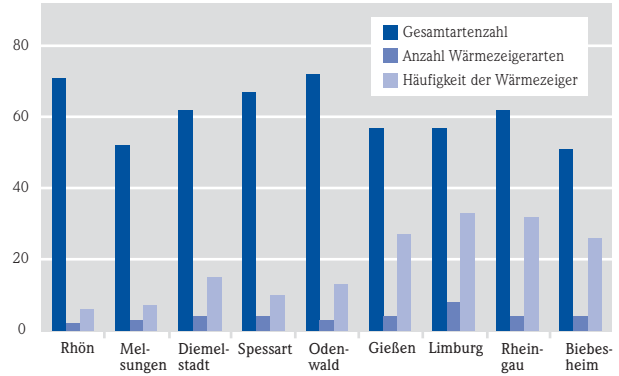


Abb. 71: Gesamtartenzahl, Anzahl von Wärmezeigerarten und deren Häufigkeit an Mauern in den hessischen Untersuchungsflächen.

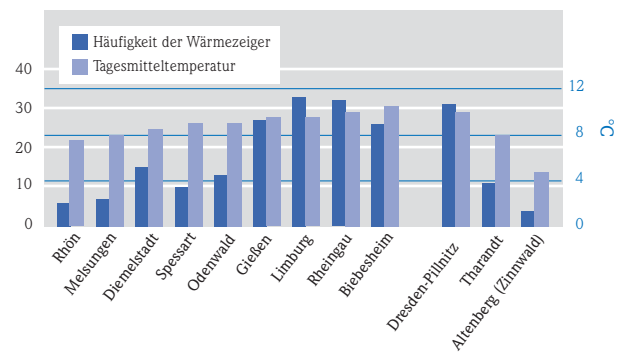


Abb. 72: Vergleich des Vorkommens wärmezeigender Flechtenspezies mit den Durchschnittstemperaturen.

unseren Untersuchungen sind ein erster Hinweis dafür, dass Flechten als Klimazeiger gelten können.

Vergleicht man die Tagesmitteltemperaturen mit der Häufigkeit der Wärmezeiger (Abb. 72), ergibt sich – trotz geringer Temperaturunterschiede zwischen der kältesten Messfläche (Rhön) und der wärmsten (Biebesheim) von knapp 3 °C – ebenfalls eine deutliche Beziehung. Dies gilt übrigens nicht nur für Hessen, sondern auch für Sachsen, wo eine gleichartige Untersuchung an drei Messflächen mit sehr unterschiedlichen Durchschnittstemperaturen vorgenommen wurde (für die Überlassung der sächsischen Daten danke ich Dr. Stetzka aus Tharand).

Korrelationsberechnungen zwischen den Wärmezeigern und den mittleren Temperaturen ergaben einen r-Wert von 0,85. Dies ist eine für Freilanduntersuchungen erstaunlich deutliche Korrelation.

Vergleicht man die Korrelationskoeffizienten der Flechten mit den Temperaturwerten der vier Jahres-

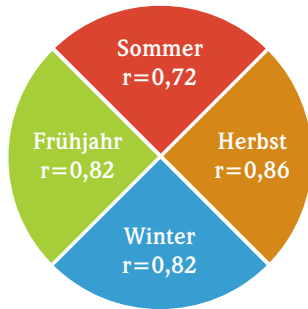


Abb. 73: Korrelationen zwischen der Häufigkeit des Vorkommens wärmeanzeigender Gesteinsflechten und Temperatur-Mittelwerten der vier Jahreszeiten.

zeiten (Abb. 73), so ist eine offensichtlich bessere Beziehung zu den Werten des Winterhalbjahres zu erkennen. Diese Tatsache ist insofern nachvollziehbar, als die poikilohydrischen Flechten in der wärmeren Sommerzeit öfter wegen Wassermangels in einen stoffwechsellinaktiven Zustand (Anabiose) übergehen und demzufolge von den Temperaturverhältnissen im Sommer weniger stark beeinflusst werden als im Winterhalbjahr.

Zusätzlich zu den Temperaturkorrelationen wurde auch eine Korrelationsberechnung zu den Faktoren Niederschlagshöhe und Dampfdruck vorgenommen (Daten zur rel. Luftfeuchte waren nicht vorhanden). Auch hier besteht zwischen der Höhe des Niederschlags und der Artenzusammensetzung an den untersuchten Mauerabschnitten eine offensichtliche Beziehung; der r-Wert von 0,79 ist hoch. Eine – wenn auch eher schwache – negative Korrelation von $-0,56$ ergab sich zum Dampfdruck (er beschreibt den Partialdruck des Wasserdampfes und dient zur Beschreibung der Luftfeuchte: Je geringer der Dampfdruck, um so höher die Luftfeuchte). Auch diese Resultate erscheinen verständlich: Da Flechten nur im gequollenen Zustand stoffwechselaktiv sind, führt eine Verminderung der Luftfeuchte zu ungünstigeren Existenzmöglichkeiten.

4.4.2.2 Baumflechten

Das Ergebnis dieser Erhebung ist in Abb. 74 wiedergegeben.

Es zeigt sich, dass keine Korrelation zwischen den gefundenen Wärmezeigern und den dazu gehörigen Temperaturdaten zu bestehen scheint. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu den Befunden, die wir bei den Gesteinsflechten gemacht haben. Der Wi-

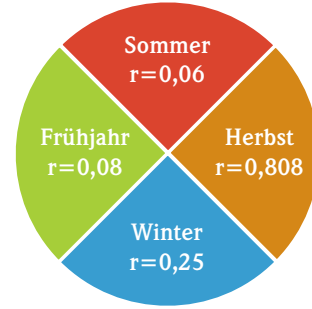


Abb. 74: Korrelationsberechnungen zwischen Temperaturmittelwerten der vier Jahreszeiten (1991–2000) und dem Vorkommen wärmeanzeigender, epiphytischer Flechtenarten.

derspruch ist vermutlich jedoch nur ein scheinbarer: Die Epiphytenvegetation war – infolge jahrzehntelanger Belastung durch Immissionen – in Mitteleuropa viel stärker verarmt als die gesteinsbewohnenden Flechten; sie kehrt erst in jüngster Zeit allmählich zurück. Unsere Dauerbeobachtungen der Gießen/Wetzlarer Flechtenvegetation belegen dies (Abb. 75):

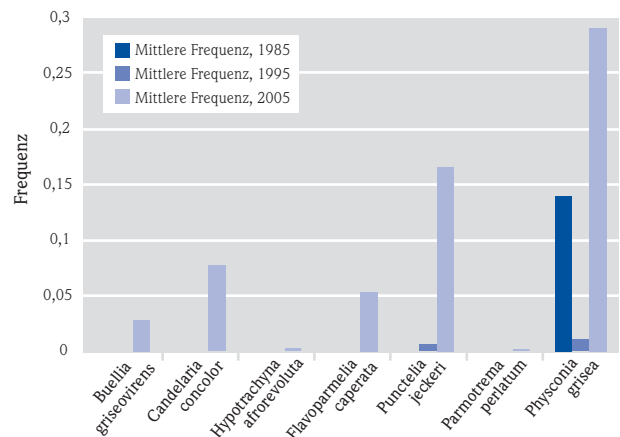


Abb. 75: Einwanderung wärmeanzeigender Flechtenarten in Gießen/Wetzlar (1985–2005).

Obwohl in beiden Städten im Verlauf der letzten 25 Jahre jeweils ca. 500 Bäume untersucht worden sind, fand sich 1985 nur ein einziger Wärmezeiger; 2005 waren es sieben. Ihre Häufigkeit ist äußerst gering; z. T. wurde lediglich ein Exemplar gefunden. Weil also die Wärmezeiger bisher erst in geringer Anzahl und Häufigkeit in Gießen/Wetzlar (und auch in den DBF) vorhanden sind, kann man davon ausgehen, dass hierin der Grund für die schlechte Korrelierbarkeit mit den Klimadaten zu suchen ist → wir haben es bei den wärmezeigenden Epiphyten bisher noch mit vereinzelt Zufallsfunden zu tun.

Auch unsere Berechnungen der mittleren Zeigerwerte für Temperatur aus den Flechtenfunden der immissionsbezogenen Flechtenkartierung in den hessischen DBF zeigen, dass die Flechten auf die veränderten klimatischen Verhältnisse reagieren. Zum besseren Verständnis ist in Tabelle 5 das Prinzip der Zeigerwerte-Darstellung noch einmal wiedergegeben.

Temperatur-Zeigerwert 1	Kältezeiger (alpin-nival; arktisch-boreal)
⋮	⋮
Temperatur-Zeigerwert 5	Kältezeiger (hauptsächlich in mäßig kühlen bis mäßig warmen Lagen; hauptsächlich montan-submontan (400–1 000 m ü. NN; meist bis ins mittlere Fennoskandien verbreitet)
⋮	⋮
Temperatur-Zeigerwert 9	Extreme Wärmezeiger (nur in das südliche Mitteleuropa vom mediterran-submediterranen Raum übergreifend)

Tab. 5: Temperatur-Zeigerwerte für Flechten in Mitteleuropa.

Wie aus Abb. 76 hervorgeht, ist in allen DBF eine Erhöhung der Zeigerwerte zwischen 1992 und 2007 deutlich zu erkennen (z. T. um 1,5 Stufen). Dieser Befund bedeutet, dass sich im gesamten Bundesland in den letzten 15 Jahren die Anzahl und Häufigkeit von Kühlezeigern verringert, diejenige von Arten mit höheren Temperaturansprüchen aber erhöht hat.

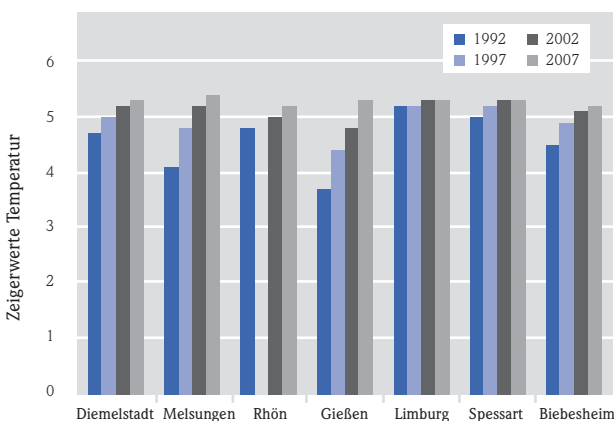


Abb. 76: Entwicklung der Temperaturzeigerwerte von Flechten in den hessischen DBF (1992–2007).

Da die Einwanderung von Wärmezeigern in Nordwestdeutschland bereits wesentlich weiter vorangeschritten ist (Düsseldorf/Kölner Raum), empfiehlt es sich, diese Untersuchung in Hessen fortzuführen: Wenn der Trend zu weiteren Wärmezeigern anhält, sollten in 5 bis 10 Jahren auch bei uns statistisch besser absicherbare Stichproben vorhanden sein.

4.4.3 Zusammenfassung

- Neben anderen Organismen sind auch Flechten Indikatoren für den Klimawandel. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird beim VDI zzt. an der Erstellung einer standardisierten Richtlinie gearbeitet, die Flechten als Bioindikatoren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung des Klimawandels verwendet.
- Da es zu dieser Frage bisher wenig konkrete Untersuchungen gibt, wurden in der vorliegenden Erhebung an neun klimatisch unterschiedlichen Flächen in Hessen jeweils 30 Mauerabschnitte und 20 Bäume auf ihren Flechtenbewuchs untersucht.
- Die Ergebnisse wurden mit Klima-Parametern korreliert.
- Bei den Baumflechten ergab sich (wegen der noch geringen Zahl von einwandernden Wärmezeigern) kein nachweisbarer Zusammenhang zwischen gemessenen Klimaparametern und Flechten.
- Bei den Gesteinsflechten zeigte sich dagegen eine deutliche Abhängigkeit des Flechtenvorkommens von klimatischen Faktoren – insbesondere der Temperatur.
- Weil die wechselfeuchten Flechten sehr rasch auf klimatische Veränderungen reagieren, können sie als Frühwarnsysteme für die Auswirkungen von Temperaturveränderungen in Ökosystemen eingesetzt werden.
- Da sie – im Gegensatz zu vielen Höheren Pflanzen – auch im Winterhalbjahr stoffwechselaktiv sind, haben ihre Aussagen Gültigkeit für das ganze Jahr.

5 In den Untersuchungen verwendete Richtlinien

VDI-Richtlinie 3799, Blatt 1 (1995): Ermittlung und Beurteilung phytotoxischer Wirkungen von Immissionen mit Flechten: Flechtenkartierung. – Beuth-Verlag, Berlin.

VDI-Richtlinie 3957, Blatt 8 (2003): Flächenbestimmung epiphytischer Flechten zur immissionsökologischen Langzeitbeobachtung. – Beuth-Verlag, Berlin.

VDI 3957 Blatt 13 (2005): Biologische Messverfahren zur

Ermittlung und Beurteilung der Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation): Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für die Luftgüte. – Beuth-Verlag, Berlin.

VDI-Richtlinie 3957, Blatt 20 (2009): Kartierung von Flechten zur Indikation von lokalen Klimaverschiebungen. – Vorentwurf, Düsseldorf.

Die vorliegende Broschüre ist in wesentlichen Teilen die Kurzfassung eines Arbeitsberichtes („Flechtendauerbeobachtungsflächen Hessen, 2007“); dieser

kann, einschließlich der verwendeten Literatur, unter der E-Mail ulrich.kirschbaum@tg.fh-giessen.de oder beim HLUG angefordert werden.

