



Dauerbeobachtung von Flechten in Hessen 2017



Zierliche Braunflechte (*Melanohalea elegantula*),
ein Luftgüte- und Klimawandelzeiger in Hessen (Foto: Henze)

Dauerbeobachtung von Flechten in Hessen 2017



Auftraggeber

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und
Geologie
Dez. I 1 –Fachzentrum Klimawandel und Anpassung

Betreuung: Sonja Singer-Posern
Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden
Telefon 0611-6939-250

Bearbeitung



Fraxinus GbR
Prof. Dr. rer. nat. Ute Windisch
Alexander Vorbeck, Dipl.-Ing. Umweltschutz
Am Weidenborn 11, 35625 Hüttenberg
Telefon 06441-200 8198

Kartierung

Bürogemeinschaft Angewandte Ökologie
Marion Eichler, Dipl.-Biologin
Kaupstraße 43
64289 Darmstadt

Institut für angewandte Vegetationskunde und Land-
schaftsökologie
Rainer Cezanne, Dipl.-Biologe
Lagerstraße 14
64297 Darmstadt

Fraxinus GbR
Prof. Dr. rer. nat. Ute Windisch

Hüttenberg, den 30.06.2019

Glossar

DBF	Dauerbeobachtungsfläche; In Hessen sind zehn DBF eingerichtet, an denen in einem regelmäßigen Turnus Flechtenkartierungen durchgeführt werden.
euryök	sehr unterschiedliche Umweltbedingungen tolerierend
Eutrophierungszeiger	Flechtenarten, die eine übermäßige Nährstoffversorgung tolerieren
FDW _{Eu}	Flechten-Diversitätswert der Eutrophierungszeiger; wird ermittelt aus der Anzahl der Eutrophierung tolerierenden Flechtenarten und ihrer Häufigkeit
FDW _{KWZ}	Flechten-Diversitätswert der Klimawandelzeiger; wird ermittelt aus der Anzahl der klimawandelzeigenden Flechtenarten und ihrer Häufigkeit
FDW _{Ref}	Flechten-Diversitätswert der Referenzarten; wird ermittelt aus der Anzahl der immissionsempfindlichen Flechtenarten und ihrer Häufigkeit
Flechte	Lebensgemeinschaft aus einem Pilz und einem Photosynthese betreibenden Partner (Alge oder Cyanobakterium)
„Klimabäume“	Freistehende Laubbäume, die hinsichtlich des Baumumfangs, der Baumart, etc. nicht standardisiert sind.
KWI	Klimawandelzeigerindex; stellt die mittlere Artenzahl der Klimawandelzeiger für die Bäume einer Messfläche dar
KWZ	Klimawandelzeiger; Flechtenarten, die geeignet sind, die Wirkungen von lokalen Klimaveränderungen zu dokumentieren; Einstufung nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 20
LGI	Luftgüteindex; Ergebnis der Luftgütekartierung; erlaubt Aussagen zur Luftgüte und zum Einfluss eutrophierender Verbindungen
Referenzarten	Flechtenarten, die aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber Luftschadstoffen als Indikatoren der Luftgüte dienen.
UF	Untersuchungsfläche; aufgrund der Fragestellung zusätzlich zu den DBF eingerichtete Flächen (Flughafen, Rheingau, Odenwald)
„VDI-Bäume“	standardisierte Trägerbäume nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13
WZ	Wärmezeiger; Flechtenarten mit einer Temperaturzahl von 7-9
WZI	Wärmezeigerindex; findet hier Anwendung bei den Mauerflechten; mittlere Artenzahl der Wärmezeiger für die Mauern einer Messfläche

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	1
2	Einleitung und Projektziele.....	5
3	Klimawandel.....	6
	3.1 Folgen des Klimawandels.....	6
	3.2 Auswirkungen des Klimawandels auf die Biodiversität.....	7
	3.3 Biomonitoring des Klimawandels mit Flechten	8
4	Methoden	10
	4.1 Datenbestand Dauerbeobachtung von Flechten in Hessen.....	10
	4.2 Messnetz	11
	4.3 Dokumentation der Substrat- und Flechtendaten	13
	4.4 Klima- und Depositionsdaten	13
	4.5 Luftgüteuntersuchung.....	14
	4.5.1 Flechtenkartierung nach VDI 3957 Blatt 13	14
	4.5.2 Folienvverfahren nach VDI 3957 Blatt 8	18
	4.6 Klimawandel-Biomonitoring.....	20
	4.6.1 Qualitative Erfassung der Flechten auf „Klimabäumen“	21
	4.6.2 Quantitative Erfassung der Flechten im Aufnahmegitter.....	22
	4.6.3 Erfassung der Flechten auf Mauern	22
	4.6.4 Datenauswertung.....	23
5	Ergebnisse und Diskussion.....	28
	5.1 Untersuchte Trägerbäume und Mauern	28
	5.2 Arten	31
	5.3 Luftgüteuntersuchung.....	31
	5.3.1 Flechtenkartierung nach VDI 3957 Blatt 13	31
	5.3.2 Folienvverfahren nach VDI 3957 Blatt 8	55
	5.4 Biomonitoring des Klimawandels	60
	5.4.1 Klimawandelzeiger-Index (KWI)	60
	5.4.2 Diversitätswert der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ})	64
	5.4.3 Wärmezeiger-Index (WZI), erhoben an Mauern.....	66
	5.5 Empfehlungen für das Biomonitoring mit Flechten in Hessen	68
6	Literatur.....	70

Anhang

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Lage der Flechten-Dauerbeobachtungsflächen (gelb) und der zusätzlichen Untersuchungsflächen (orange) in Hessen.....	11
Abb. 2: Messnetz einer Dauerbeobachtungsfläche (Beispiel der DBF „Spessart“).....	12
Abb. 3: Feldrechner Fieldbook (oben), Luftbildausschnitt mit kartierten Bäumen und Mauern, DBF Melsungen (unten)	13
Abb. 4: Flechtenaufnahmegitter am Baum (nach VDI 3957 Blatt 13, Anhang A).....	15
Abb. 5: Bewertungsmatrix zur Ermittlung des Luftgüteindex anhand der Kombination der Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger und der übrigen Arten (Datenerhebung nach VDI-Richtlinie 3579 Blatt 13, Anhang A)	17
Abb. 6: Erläuterung der Bewertungsmatrix nach VDI-Richtlinie 3579 Blatt 13.....	17
Abb. 7: Beispiel einer verkleinerten, gescannten Folie (Flechtenerfassung an einem Baum der DBF Gießen)	19
Abb. 8: Ansicht der Benutzeroberfläche von ‚LiMo-Analyse‘ während der Flächenauswertung.....	19
Abb. 9: Untersuchung einer Natursteinmauer auf Flechten.....	22
Abb. 10: Baumartenspektrum der Luftgüteuntersuchung 2017	28
Abb. 11: Entwicklung des Anteils häufig untersuchter Baumarten der Luftgüteuntersuchung....	29
Abb. 12: Spektrum der Baumaterialien der untersuchten Mauern zum Klimawandel-Biomonitoring	30
Abb. 13: Legende zu den folgenden Luftgütekarten.....	32
Abb. 14: Vergleich der durch Flechten angezeigten Luftgüte 2017 an den Dauerbeobachtungsflächen	32
Abb. 15: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2017 an der DBF Diemelstadt...	33
Abb. 16: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017 an der DBF Diemelstadt	34
Abb. 17: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2017 an der DBF Melsungen	35
Abb. 18: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017 an der DBF Melsungen.....	36
Abb. 19: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2017 an der DBF Rhön	37
Abb. 20: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017 an der DBF Rhön.....	38
Abb. 21: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2017 an der DBF Gießen	39

Abb. 22: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017 an der DBF Gießen.....	40
Abb. 23: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2017 an der DBF Limburg.....	41
Abb. 24: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017 an der DBF Limburg	42
Abb. 25: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2017 an der DBF Spessart.....	43
Abb. 26: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017 an der DBF Spessart	44
Abb. 27: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2017 an der DBF Biebesheim ...	45
Abb. 28: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017 an der DBF Biebesheim.....	46
Abb. 29: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2017 an der DBF Flughafen (1997, 2002: keine Daten).....	47
Abb. 30: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017 an der Untersuchungsfläche Flughafen	48
Abb. 31: Zeitlicher Verlauf der Flechten-Diversitätswerte (FDW) der Referenzarten und Eutrophierungszeiger für alle DBF (ohne Rhön und Flughafen, da diese nicht durchgehend untersucht worden waren)	50
Abb. 32: Stickstoffverbindungen, Vorkommen und Wirkungen (LUBW 2008).....	51
Abb. 33: Zeitlicher Verlauf der Stickstoffoxid-Konzentrationen an Luftmessstationen in verschiedenen hessischen Regionen; blau : an Verkehrsschwerpunkten, rot : in Städten, grün : im ländlichen Raum (HLNUG 2018)	52
Abb. 34: Entwicklung der Ammoniakkonzentrationen in verschiedenen Gebieten Deutschlands (Dämmgen et al. 2012/2013).....	53
Abb. 35: Flechten-Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger im Jahr 2017 und Stickstoffdeposition für die Landnutzungs-kategorie „Wiesen und Weiden“ aus Dreijahresmittelwerten der Jahre 2013-2015 (UBA 2018).....	54
Abb. 36: Entwicklung des Deckungsgrades von <i>Phaeophyscia orbicularis</i> aus Folienaufnahmen von jeweils drei ausgewählten Bäumen pro Dauerbeobachtungsfläche	56
Abb. 37: Entwicklung des Deckungsgrades von <i>Xanthoria parietina</i> aus Folienaufnahmen von jeweils drei ausgewählten Bäumen	57
Abb. 38: Wand-Gelbflechte (<i>Xanthoria parietina</i>), eine Zeigerart für Eutrophierung.....	57
Abb. 39: Entwicklung des Deckungsgrades von <i>Hypogymnia physodes</i> aus Folienaufnahmen von jeweils drei ausgewählten Bäumen	58
Abb. 40: Entwicklung des Deckungsgrades von <i>Parmelia sulcata</i> aus Folienaufnahmen von jeweils drei ausgewählten Bäumen	59
Abb. 41 Furchen-Schüsselflechte (<i>Parmelia sulcata</i>), eine euryöke Referenzart	59
Abb. 42: Mittlere Häufigkeit der Klimawandelzeiger in 2017 an Klimabäumen für alle Dauerbeobachtungsflächen in Hessen; ein Wert von 0,2 bedeutet, dass die jeweilige Art im Durchschnitt an jedem fünften der untersuchten Bäume vorkommt.....	60

Abb. 43: Klimawandelzeiger in Hessen; links: Gefleckte Punktflechte (<i>Punctelia subrudecta</i>), rechts: Caperatflechte (<i>Flavoparmelia caperata</i>). (Fotos: Kirschbaum).....	61
Abb. 44: Entwicklung des Klimawandelzeiger-Indexes 2007-2017 (für die DBF Flughafen liegen Daten erst ab 2012 vor)	62
Abb. 45: Veränderung des Klimawandelzeiger-Index in Deutschland seit 1996. Zusammenfassende Darstellung von Ergebnissen aus Studien einiger Mitglieder der VDI-Arbeitsgruppe „Wirkungsfeststellung an Niederen Pflanzen“. KWI für Hessen nicht dargestellt, siehe Erläuterungen im Text (Bild: JOHN et al. 2017)	63
Abb. 46: Entwicklung der Flechten-Diversität der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}) von 1992-2017 im Messgitter standardisierter Trägerbäume; die Untersuchungsfläche Flughafen wurde 1992 (Wert: 0,01), 2007, 2012 und 2017 kartiert; die DBF Rhön wurde 1997 nicht untersucht	64
Abb. 47: Entwicklung der Flechten-Diversität der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}) von 2007 bis 2017 aus der Kartierung im Messgitter standardisierter Trägerbäume	65
Abb. 48: Entwicklung der mittleren Häufigkeit der Wärmezeiger von 2007-2017 an jeweils 30 Mauerabschnitten; für die Untersuchungsfläche Flughafen liegen für 2007 keine Daten vor.....	66
Abb. 49: Mittlere Häufigkeit der Wärmezeigerarten in 2017 aus der Kartierung von Mauern für alle Dauerbeobachtungsflächen.....	67
Abb. 50: Wärmezeiger auf Mauern. Links: Ziegel-Schönfleck (<i>Caloplaca teicholyta</i>) Foto: Kirschbaum; rechts: Graue Burgenflechte (<i>Diploica canescens</i>) (Foto: Cezanne)	67

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Monitoringprogramm der Flechten-Dauerbeobachtung	10
Tab. 2: Anzahl untersuchter Flächen der Luftgütekartierung zwischen 1992 und 2017, inklusive Flughafen.....	12
Tab. 3: Baumartengruppe nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13, mit zulässigem Baumumfang	15
Tab. 4: Liste der Eutrophierungszeiger nach VDI-RICHTLINIE 3957 Blatt 13, Stand: 2005.....	16
Tab. 5: Liste der Klimawandelzeiger nach (VDI 3957 Blatt 20).....	24
Tab. 6: Wärmezeigerarten, die auf Rinde und/oder Gestein siedeln.....	26
Tab. 7: Baumartenspektrum des Klimawandel-Biomonitorings in 2017.....	30
Tab. 8: Auswahl von Trägerbäumen zur Darstellung der Ergebnisse des Folienverfahrens	55
Tab. 9: Entwicklung des Klimawandelzeiger-Index (KWI) an Trägerbäumen der hessischen Dauerbeobachtungsflächen	62

1 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht informiert über die Fortführung der Flechten-Dauerbeobachtung in Hessen. Das Biomonitoring-Programm des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie besteht seit nunmehr 25 Jahren. Seit dem Jahr 1992 werden im fünfjährigen Turnus ausgewählte Trägerbäume von sieben Dauerbeobachtungsflächen (seit 2007 drei weitere Gebiete) auf ihren Flechtenbewuchs überprüft. Seit 2007 werden zusätzlich Mauern auf ihren Flechtenbewuchs geprüft. Die Daten erlauben Rückschlüsse über die Umweltqualität. Standen zu Beginn der Untersuchungen die Wirkungen von sauren Luftverunreinigungen im Vordergrund, so haben sich die Anforderungen an die Aussagen der Flechtenkartierung bis heute kontinuierlich geändert. Neben der Dokumentation der Luftgüte können heute auch Aussagen zu den Wirkungen eutrophierender Luftschadstoffe und lokaler klimatischer Veränderungen getroffen werden.

Methodisch wurden seit Beginn der Untersuchungen die Vorgaben der jeweils gültigen VDI-Richtlinien eingehalten. Die Kartierung besteht vorwiegend aus einer Erfassung der Häufigkeit der Flechtenarten in einer Aufnahmefläche von 20 x 50 cm am Mittelstamm standardisierter Trägerbäume. Seit dem im Jahr 2007 hinzugekommenen Klimawandel-Biomonitoring wurden auch andere Substrate untersucht. Weiterhin wird zur detaillierten Dokumentation der Flechtenbestände das Folienverfahren angewendet, bei dem der Flechtenaufwuchs am Mittelstamm ausgewählter Bäume auf einer Folie nachgezeichnet wird.

An den 1.842 untersuchten Objekten (Bäumen oder Mauern) wurden insgesamt 257 Taxa gefunden, davon waren 247 Flechten. Mit *Caloplaca ulcerosa* gelang ein Neufund einer Flechtenart für das Bundesland Hessen. Erstmals im Rahmen der Dauerbeobachtung von Flechten in Hessen wurden die folgenden fünf (sehr) seltenen Arten festgestellt: *Caloplaca grimmiae*, *Gyalecta carneola*, *Lecania croatica*, *Lecanora sinuosa* und *Physciella chloantha*. Im Fall der letztgenannten Art handelt es sich bei dem Fund nahe Neumorschen um einen ungewöhnlich weit im Norden liegenden Wuchsort dieser wärmeliebenden und sich derzeit ausbreitenden Flechtenart. Erneut konnten die bekannten Vorkommen der naturschutzfachlich bedeutsamen Arten *Caloplaca luteoalba*, *C. xerica* und *Parmelina quercina* 2017 bestätigt werden. Der Wuchsort von *Caloplaca xerica* bei Lorch (Mittelrheintal) ist aktuell der einzig bekannte in Deutschland. Nachdem sämtliche Vorkommen von *Parmelina quercina* in Darmstadt erloschen sind, stellt die Population bei Weyer (Station Limburg) das letzte in Hessen bekannte Vorkommen dar. Die genannten Funde tragen zur flechtenfloristischen Datenlage in Hessen bei.

Als Ergebnis der Luftgütekartierung wird für jede Untersuchungsfläche eine Karte erstellt und die zeitliche Entwicklung der Luftgüte erläutert. Die ballungsraumnahen Gebiete am Flughafen und bei Biebesheim schneiden erwartungsgemäß schlechter ab als die ländlichen Gebiete in Rhön und Spessart. Hat sich seit 1992 und auch noch im letzten Beobachtungszeitraum die Luftgüte an fast allen Dauerbeobachtungsflächen (DBF) verbessert, so hat sich der Anstieg in den letzten fünf Jahren verlangsamt. In die Luftgütebewertung geht insbesondere die Diversität der Gütezeiger (Referenzarten) ein. Dieser Wert ist an fünf DBF (Diemelstadt, Melsungen, Limburg, Spessart, Biebesheim) in den letzten fünf Jahren kaum angestiegen oder sogar leicht abgefallen. Nur an zwei DBF zeigt sich ein leichter (Gießen, Flughafen) und auf der DBF Rhön ein deutlicher Anstieg der Referenzarten-Diversität.

Eine hohe Diversität eutrophierungstoleranter Arten wirkt sich mindernd auf die Bewertung der Luftgüte aus. In den letzten fünf Jahren haben die Eutrophierungszeiger auf allen DBF mit Ausnahme des Spessarts zugenommen. Der Anstieg fällt jedoch nicht mehr so deutlich aus wie noch im Fünf-Jahres-Zeitraum davor. Im landesweiten Mittel sind Eutrophierungszeiger seit 2007 häufiger anzutreffen als die übrigen Flechtenarten. In den letzten zehn Jahren hat sich die Begünstigung der Eutrophierungszeiger noch weiter verstärkt. Die Ergebnisse des Folienverfahrens unterstützen die Aussagen der Kartierung und liefern weitere Daten zur Flächendeckung der Arten. Die Wirkungen der eutrophierenden Luftschadstoffe manifestieren sich in einer Verschiebung des Arteninventars und der Häufigkeit der Arten. Verschlechterte Entwicklungsbedingungen oder Schädigungen der gegen einen übermäßigen Nährstoffeintrag empfindlichen Flechtenarten führen zu deren Rückgang. Hinzu kommt, dass die durch düngende Verbindungen geförderten eutrophierungstoleranten Arten konkurrenzfähiger geworden sind und die Referenzarten verdrängen können.

Es liegen keine kleinräumigen und umfassenden Daten zum Eintrag reaktiver Stickstoffverbindungen vor. Daher ist der durch die Flechten angezeigte Anstieg eutrophierender Wirkungen seit 2007 nicht abschließend zu klären. Es ist festzuhalten, dass die düngenden Effekte bis heute weiter ansteigen. Diese Beobachtung deckt sich mit der Einschätzung des Umweltbundesamtes, wonach weite Teile Deutschlands unter zu hohen Stickstoffeinträgen leiden (UBA 2018). Eine Reduktion des Eintrags reaktiver Stickstoffverbindungen ist auch für Hessen anzustreben, um empfindliche Ökosysteme zu erhalten.

Das Klimawandel-Biomonitoring umfasst die Kartierung von Flechten an Bäumen und Mauern. Dabei werden wärmeliebende und (sub)atlantische Flechtenarten herangezogen, die durch Änderungen des Lokalklimas häufiger oder sogar neu vorkommen.

Die Daten von baumbewohnenden Flechten werden nach zwei Varianten ausgewertet, die der Methode einer neu erschienenen VDI-Richtlinie zum Klimawandel-Biomonitoring entsprechen (VDI 2017). Die Ergebnisse beider Varianten zeigen, dass in den vergangenen fünf Jahren insbesondere in den südlichen und wärmeren Teilen Hessens die klimawandelzeigenden Arten auf mehr Bäumen sowie in einer höheren Frequenz im Messgitter vorkommen als noch fünf Jahre zuvor. Aktuell werden 14 der nach Richtlinie gelisteten 45 Klimawandelzeiger auf den Untersu-

chungsflächen angetroffen. Ein Vergleich mit Untersuchungen aus benachbarten Bundesländern zeigt, dass die Klimawandelindizes in Hessen deutlich niedriger sind als in den westlich angrenzenden Bundesländern Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz, wo atlantische bzw. subatlantisch verbreitete Flechtenarten naturgemäß häufiger auftreten. In den nächsten Jahren werden in Hessen entsprechend des hier festgestellten Trends weiter ansteigende Werte erwartet. Die Änderungen sind heute schon am deutlichsten in der Untersuchungsfläche am Flughafen Frankfurt am Main im Süden Hessens zu erkennen. Der Flughafen gehört mit Biebesheim zu den wärmsten und niederschlagsärmsten der untersuchten Gebiete in Hessen. Die vorliegenden Befunde legen sichtbare Wirkungen des Klimawandels auf die Flechten-Diversität im Sinne der Verschiebung des Artenspektrums nahe.

Die Ergebnisse der Untersuchung von Flechten auf Mauer erbringen keine erkennbaren Änderungen im Vergleich zu 2007.

Es werden Empfehlungen für die nächste Erfassung gegeben. Die Fortführung der Flechtenkartierung nach den standardisierten Methoden des VDI im fünfjährigen Turnus wird empfohlen, um die Entwicklung der Luftgüte und des Klimawandels kontinuierlich weiter verfolgen zu können. Sämtliche erhobenen Daten stehen auch in Zukunft für neue Fragestellungen zur Verfügung.

2 Einleitung und Projektziele

Das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie führt seit 1992 ein Biomonitoring-Programm mit Flechten durch. Im fünfjährigen Turnus werden ausgewählte Bäume auf ihren Flechtenbewuchs überprüft. Die jeweils vorherrschenden, über die Luft getragenen Einflüsse auf die Flechten werden in Form von Luftgütekarten dargestellt. Die Zunahme bzw. der Rückgang von Arten lässt darüber hinaus Rückschlüsse auf die einwirkenden Schadstoffgruppen zu. Zu Beginn der Dauerbeobachtung spielten saure Immissionen noch eine wichtige Rolle zur Erklärung der Flechten-Luftgütekarte, danach verringerten sich sowohl deren Konzentrationen als auch ihre Wirkungen aufgrund von Luftreinhaltemaßnahmen. Die Erholung der gegenüber Luftverunreinigungen empfindlichen Flechtenbestände ging zeitlich einher mit der Beobachtung, dass zunehmend eutrophierungstolerante Flechtenarten an den untersuchten Bäumen anzutreffen waren. Dieser, bei der Untersuchung 2007 beschriebene Trend wurde auf eine erhöhte Nährstoffverfügbarkeit an den untersuchten Flechtenstandorten zurückgeführt.

Zu den bisherigen Aufgaben des Wirkungsnachweises von Immissionen kommt seit dem Durchgang 2007 noch eine neue Fragestellung hinzu. Es wurden Methoden zum Biomonitoring des Klimawandels geprüft. Auch hier erwiesen sich Flechten als aussichtsreiche Bioindikatoren.

Die Fortführung der „Flechten-Dauerbeobachtung 2017“ wird in der vorliegenden Arbeit präsentiert. Folgende Ziele sollten erreicht werden:

- Erstellung von aktuellen Luftgütekarten aufgrund der Ergebnisse einer Flechtenkartierung nach VDI 3957 Blatt 13 an sieben Dauerbeobachtungsflächen in Hessen
- Integration der Ergebnisse aus den immissionsbezogenen Flechtenkartierungen an der zusätzlichen Untersuchungsfläche am Flughafen Frankfurt aus den Jahren 2007, 2012 und 2017
- Interpretation der Ergebnisse zu Luftgüte und dem Einfluss eutrophierender Verbindungen
- Dokumentation der Entwicklung der Luftgüte (1992, 1997, 2002, 2007, 2012, 2017)
- Erstellung, Auswertung und Interpretation von detaillierten Folienzeichnungen zur Beobachtung von Flechtenlagern nach VDI 3957 Blatt 8
- Weiterführung der Methodenentwicklung zum Biomonitoring des Klimawandels: Kartierung von Flechten an größeren Stammabschnitten sowie Mauern; Untersuchungen an den Dauerbeobachtungsflächen der Luftgüteuntersuchung und an drei weiteren zusätzlichen Untersuchungsflächen; Interpretation der Ergebnisse und Prüfung der Eignung für ein Klimawandel-Biomonitoring in Hessen

3 Klimawandel

3.1 Folgen des Klimawandels

Der globale Klimawandel wird durch Änderungen der atmosphärischen Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen, der Sonneneinstrahlung und der Beschaffenheit der Landoberfläche beeinflusst. Der fünfte Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPCC) nennt die Folgen des Klimawandels (IPCC 2013):

- Von 1880-2012 stieg die **globale Mitteltemperatur** in Bodennähe um 0,85 °C an, mit weiter steigender Tendenz. Dabei wird seit 1950 ein Anstieg der Zahl der warmen Tage und Nächte verzeichnet, während die Anzahl der kalten Tage und Nächte sinkt. Desweiteren erhöht sich in weiten Teilen Europas, Asiens und Australiens die Häufigkeit von Hitzewellen.
- Die **Niederschläge** schwanken in vielen großräumigen Regionen Europas sowohl räumlich als auch zeitlich sehr stark. Die Daten der letzten vier Jahrzehnte zeigen einen generellen Anstieg der Intensität und Häufigkeit extremer Niederschlagsereignisse.
- Der **Anstieg des Meeresspiegels** durch das globale Abschmelzen der Schnee- und Eismassen und die Ausdehnung des Wassers wird beobachtet. Der globale Anstieg des durchschnittlichen atmosphärischen Wasserdampfgehaltes über dem Land und den Ozeanen als auch in der oberen Troposphäre seit den 1980er Jahren ist belegt.

Als Hauptursache der globalen Erwärmung identifiziert der IPCC die Freisetzung von Treibhausgasen wie CO₂. Seit 1750 sind die atmosphärischen Konzentrationen der Treibhausgase CO₂, CH₄, N₂O jeweils um 40 %, 150 % und 20 % gestiegen. Die Aktivitäten des Menschen führen dazu, dass die aktuellen Konzentrationen dieser Gase diejenigen der zurückliegenden 800 000 Jahre übersteigen und ihre mittleren Zuwachsraten in den letzten 22 000 Jahren noch nie so hoch waren wie heute.

Für das Landesgebiet von Hessen wird der beobachtete Klimawandel in einer Informationsbroschüre des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie folgendermaßen zusammengefasst (HLNUG 2018): In Hessen hat die mittlere Jahrestemperatur von 8,1 °C im Zeitraum 1901–1930 (30 Jahre) auf 9,2 °C im Zeitraum 1991–2017 (27 Jahre) zugenommen. Dabei hat sich die Temperatur in allen Jahreszeiten deutlich erhöht, vor allem in den letzten Jahrzehnten. Die Zahl der besonders kalten Tage (Eistage und Frosttage) ist seit den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts deutlich zurückgegangen. Dagegen hat die Zahl der warmen und heißen Tage stark zugenommen.

Weiter heißt es in der Broschüre: Der Niederschlag ist von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlich und zeigt auch Schwankungen zwischen den Jahrzehnten. Es ist daher große Vorsicht geboten bei der Bestimmung von Trends im Niederschlag. Seit Beginn der Niederschlagsmessungen (häufig En-

de des 19. Jahrhunderts) hat der mittlere Jahresniederschlag in Hessen leicht zugenommen. Während es bis Mitte des letzten Jahrhunderts relativ trocken war (1901–1930: 735 mm/Jahr und 1931–1960: 748 mm/Jahr), waren die nachfolgenden Zeiträume zusehends feuchter (1961–1990: 793 mm/Jahr und 1981–2010: 807 mm/Jahr). Der Niederschlag schwankt sowohl langjährig als auch im Jahresverlauf sehr stark. Im Allgemeinen fällt in Hessen im Sommer am meisten Niederschlag, gefolgt vom Niederschlag im Herbst und im Winter. Der Frühling ist in Hessen weniger regenreich. Seit 1901 hat die Niederschlagsmenge in Hessen in allen Jahreszeiten bis auf den Sommer etwas zugenommen. Alle hier diskutierten Entwicklungen der saisonalen Niederschlagsmengen sind aber aufgrund der sehr großen Variabilität des Niederschlages – sowohl zwischen einzelnen Jahren als auch zwischen Dekaden oder sogar noch längeren Zeiträumen – nicht signifikant. Es lässt sich also nicht ausschließen, dass die Trends durch Zufall entstanden sind.

Somit wird konstatiert, das sich für Extremereignisse wie Starkniederschlag, starke Winterstürme oder sommerliche Dürreperioden derzeit zwar noch kein gesicherter statistischer Trend nachweisen lässt, grundlegende physikalische Überlegungen legen jedoch nahe, dass der Klimawandel zu einer Zunahme solcher Ereignisse führen sollte.“

3.2 Auswirkungen des Klimawandels auf die Biodiversität

Der Klimawandel stellt hohe Anforderungen an das Anpassungsvermögen von Lebewesen. Diejenigen, die sich nicht anpassen können, werden aussterben oder abwandern. So ergeben sich neue räumliche Verteilungen und Zusammensetzungen der natürlichen Lebensgemeinschaften (JÄGER 1995, BAIRLEIN & HÜPPOP 2004, WALTHER et al. 2005, HICKLING et al. 2006, BRADLEY et al. 2009).

Für die überwiegende Mehrheit von Organismen und Ökosystemen wird sich eine Anpassung an den Klimawandel als schwierig erweisen. Dies betrifft insbesondere montane, alpine und polare Arten sowie solche der Insel- und Küstengemeinschaften.

Bei einer Temperaturerhöhung um 1 °C wird eine Verschiebung der Vegetationszonen um etwa 200-300 km polarwärts beziehungsweise um bis zu 200 Höhenmeter angenommen (IPCC 2007). Erscheint diese Erhöhung zunächst als gering, so muss doch davon ausgegangen werden, dass sie zumindest gebietsweise das Aussterben arktisch-alpiner Arten sowie von Glazialrelikten bedeutet. Insbesondere bei alpinen Arten ist die Migration in höhere Lagen nur begrenzt möglich. Hinzu kommt, dass als Folge der Erwärmung eine Arealerweiterung oder Zuwanderung auch gebietsfremder Arten beobachtet wird. Diese Arten können zwar die Artenvielfalt in alpinen Gebieten kurzfristig erhöhen, führen aber langfristig zu einer Auslöschung der endemischen Arten (GEBHARDT 1996, KOWARIK 2003, BAHN & KÖRNER 2003, EEA 2004, WALTHER et al. 2005, GEBHARDT et al. 2010).

3.3 Biomonitoring des Klimawandels mit Flechten

Flechten reagieren ausgesprochen sensitiv auf sich ändernde Umweltbedingungen. Als wechselfeuchte Organismen nehmen sie Wasser und darin gelöste Stoffe über ihre gesamte Oberfläche auf. Nur bei ausreichender Wasserversorgung betreiben sie Stoffwechsel. Damit wirken sich atmosphärische Änderungen direkt auf Flechten aus, was sie zu idealen Zeigerorganismen des Klimawandels macht.

Es ist anzunehmen, dass die mit dem Klimawandel einhergehenden Phänomene einen positiven Effekt auf eine Reihe epiphytischer Flechtenarten ausüben können: Sowohl der prognostizierte Anstieg der winterlichen Niederschläge und des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes als auch steigende Temperaturen und CO₂-Gehalt der Atmosphäre können die ganzjährig stoffwechselaktiven Flechten fördern. Zudem werden sie durch die prognostizierte Sommertrockenheit nicht in dem Maße geschädigt wie etwa die Gefäßpflanzen, da sie schadlos eine vorübergehende Austrocknung ertragen können.

Das Biomonitoring mit Flechten hat eine lange Tradition. In zahllosen Arbeiten wurden sie erfolgreich als Indikatoren für die Wirkungen von Luftverunreinigungen eingesetzt. Ein langjähriges Monitoring-Programm existiert in Hessen (KIRSCHBAUM & HANEWALD 1998b).

Anfang dieses Jahrhunderts beschäftigten sich die ersten Studien mit den Effekten des Klimawandels auf Flechten (INSAROV 2002, VAN HERK et al. 2002, APTROOT 2009). In jüngerer Zeit mehren sich Beobachtungen, wonach sich die Artenzusammensetzung der Flechtenbestände in Westeuropa – unabhängig von der Immissionsituation – kontinuierlich verändert. So berichtet APTROOT (2009), dass im Zeitraum 1979–2005 eine Reihe von südlichen und wärmeliebenden Arten in die Niederlande eingewandert ist. Unter den Profiteuren waren insbesondere Flechten mit *Trentepohlia*-Algen als Symbiosepartner (APTROOT & VAN HERK 2007). In weiteren Regionen wird die Ausbreitung wärmeliebender Arten beobachtet, so in Dänemark (SØCHTING 2004), Niedersachsen (DE BRUYN et al. 2009), Nordrhein-Westfalen (SCHMITZ et al. 2014, STAPPER 2017, STAPPER & FRANZEN-REUTER 2018) und Bayern (VORBECK et al. 2009, WINDISCH et al. 2011, VORBECK et al. 2016).

In Hessen besteht das Klimawandel-Biomonitoring mit Flechten seit 2007, als diese Aufgabe neu in das bestehende landesweite Flechten-Dauerbeobachtungsprogramm aufgenommen wurde (WINDISCH & VORBECK 2006, CEZANNE et al. 2008, KIRSCHBAUM et al. 2010, WINDISCH et al. 2014).

Der Länderarbeitskreis Bioindikation/Wirkungsermittlung hat das Thema Klimawandel-Biomonitoring als Arbeitsschwerpunkt aufgegriffen. Es wird vorgeschlagen, Biomonitoring-Verfahren zu verwenden, um Auswirkungen des Klimawandels auf die belebte Umwelt zu erkennen, zu bewerten und zu dokumentieren (GEBHARDT et al. 2010). Gerade für besonders empfindliche Gebiete in Deutschland sollen die Folgen des Klimawandels auf Lebensräume, Lebensgemeinschaften und Arten darstellbar werden. In der zitierten Arbeit werden die Vorteile des Klima-Biomonitorings gegenüber den bisherigen Verfahren des Klimamonitorings mittels Messung von Klimaparametern genannt. Flechten werden als Bioindikatoren klimainduzierter

Wirkungen empfohlen, dabei wird die Auswertung von Zeigerwerten (Temperatur, Kontinentalität, Feuchte) vorgeschlagen (WIRTH 2010).

Ein standardisiertes Verfahren zum Thema stellte der Verein Deutscher Ingenieure 2017 bereit (VDI-Richtlinie 3957 Blatt 20). Mit dem Verfahren lassen sich Wirkungen des Klimawandels nachweisen, bewerten und dokumentieren.

4 Methoden

In der bisherigen Flechten-Dauerbeobachtung in Hessen stand die Erfassung der Wirkungen von Luftverunreinigungen im Vordergrund. Die derzeit gültige Methode des VDI (VDI 3957 Blatt 13 2005) soll auch in der vorliegenden Arbeit wieder angewendet werden, um den zeitlichen Verlauf von Immissionswirkungen zu erkennen.

Seit der letzten Untersuchung in 2012 werden zusätzlich die Wirkungen des Klimawandels auf Flechtenbiota untersucht. Aufgrund der Überlegung, dass möglicherweise sich neu ausbreitende Arten auf der kleinen standardisierten Erfassungsfläche des Aufnahmegitters mit der bisherigen Methode nicht erfasst werden können, wurden weitere Substrate kartiert. Es werden seit 2012 größere Aufnahmeflächen (auf Bäumen und Mauern) nach klimazeigenden Flechtenarten abgesehen. Daher werden insgesamt drei Substrate untersucht, die im Folgenden näher beschrieben werden sollen. Da die verschiedenen Aufnahmeflächen innerhalb der Messfläche unter vergleichbaren Klima- und Immissionsbedingungen stehen, eröffnet sich auch der methodische Vergleich der Substrate.

4.1 Datenbestand Dauerbeobachtung von Flechten in Hessen

Nach der ersten landesweit flächendeckenden Kartierung von 1992 wurden Flechten-Dauerbeobachtungsflächen (DBF) festgelegt und bis 2017 wiederholt untersucht (Tabelle 1).

Tab. 1: Monitoringprogramm der Flechten-Dauerbeobachtung

(DBF: Dauerbeobachtungsflächen, UF: Untersuchungsfläche, Lu: Luftgüteuntersuchung nach VDI 3957 Blatt 13, Fo: Folienvverfahren nach VDI 3957 Blatt 8, Kl: Klimawandel-Biomonitoring nach VDI 3957 Blatt 20)

Ort	Typ	Höhe (m ü. NHN)	Flechtenerfassung im Untersuchungsjahr					
			1992	1997	2002	2007	2012	2017
Diemelstadt	DBF	250-350	Lu	Lu, Fo	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl
Melsungen	DBF	150-350	Lu	Lu, Fo	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl
Rhön	DBF	500-800	Lu	-	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl
Gießen	DBF	150-250	Lu	Lu, Fo	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl
Limburg	DBF	200-300	Lu	Lu, Fo	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl
Spessart	DBF	220-400	Lu	Lu, Fo	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl
Biebesheim	DBF	80-100	Lu	Lu, Fo	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl
Flughafen	UF	100-120	Lu	-	-	Lu, Kl	Lu, Kl	Lu, Kl
Rheingau	UF	100	-	-	-	Kl	Kl	Kl
Odenwald	UF	520	-	-	-	Kl	Kl	Kl

Dabei sind es sechs DBF, die seit 1992 lückenlos kartiert wurden. Die DBF „Rhön“ wurde 2002 in das Programm des HLNUG aufgenommen. Seit 2007 wurde die Untersuchung einer Fläche am Frankfurter Flughafen von „Gemeinnützige Umwelthaus GmbH, Kelsterbach“ beauftragt, die Ergebnisse fließen in den vorliegenden Bericht ein. Die Untersuchungsflächen „Rheingau“, „Odenwald“ und „Flughafen“ wurden seit 2007 zusätzlich, jedoch in einem geringeren Umfang als die DBF, im Rahmen des Klimawandel-Biomonitorings untersucht. Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen wurden in diversen Schriften veröffentlicht (KIRSCHBAUM & WINDISCH 1995, KIRSCHBAUM & HANEWALD 1998a, 1998b, 2001, KIRSCHBAUM 2009, KIRSCHBAUM et al. 2010, WINDISCH et al. 2014).

4.2 Messnetz

Die sieben Dauerbeobachtungsflächen (DBF) sowie die drei zusätzlichen Untersuchungsflächen sind im ländlichen Raum Hessens positioniert (Abb. 1).

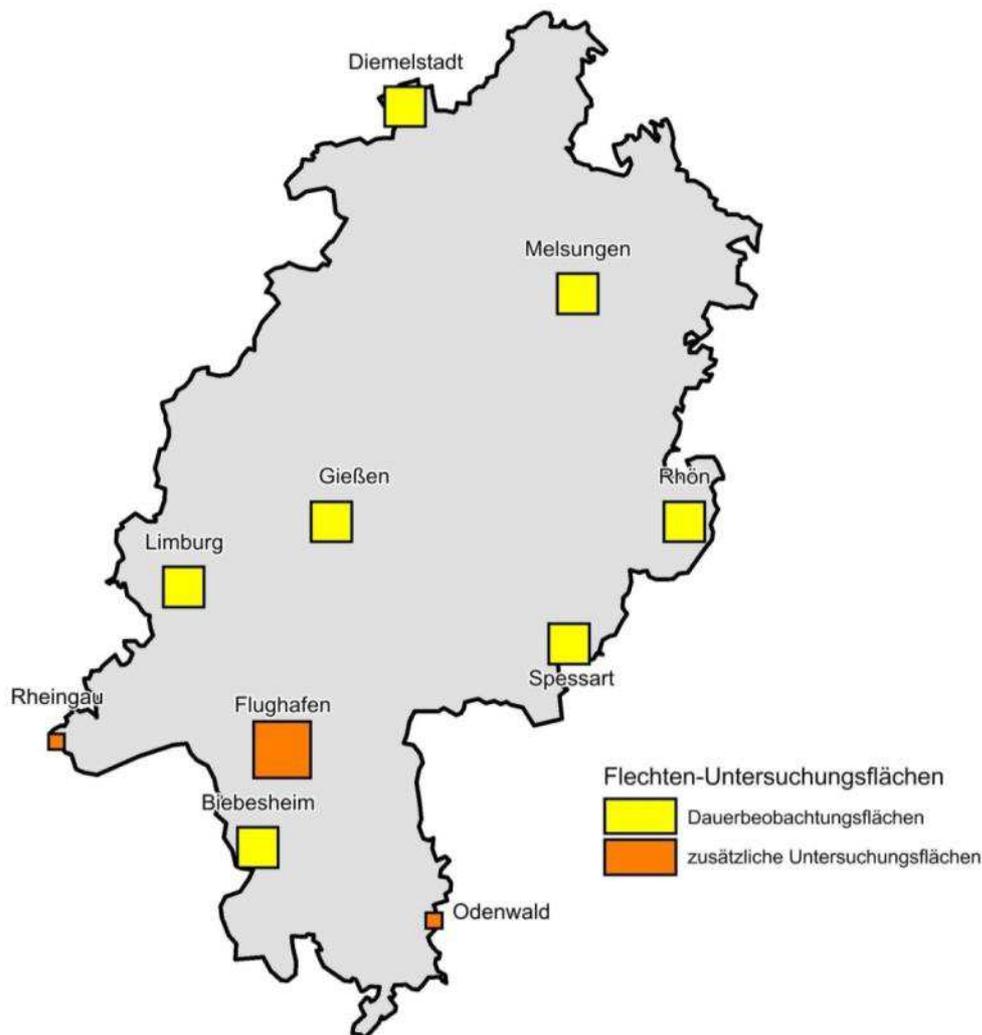


Abb. 1: Lage der Flechten-Dauerbeobachtungsflächen (gelb) und der zusätzlichen Untersuchungsflächen (orange) in Hessen

In jede DBF mit einer Ausdehnung von jeweils 8 x 8 km wurde ein Messnetz gelegt (Abb. 2). An den Kreuzungspunkten des Messnetzes wurden 25 Messflächen mit einer Größe von 1 km² eingerichtet. Die Untersuchungsflächen für das Klimawandel-Biomonitoring am Flughafen, im Rheingau (Lorch) und Odenwald (Würzburg) sind mit 1 km² kleiner. Sie befinden sich in den Orten Lorch und Würzburg.

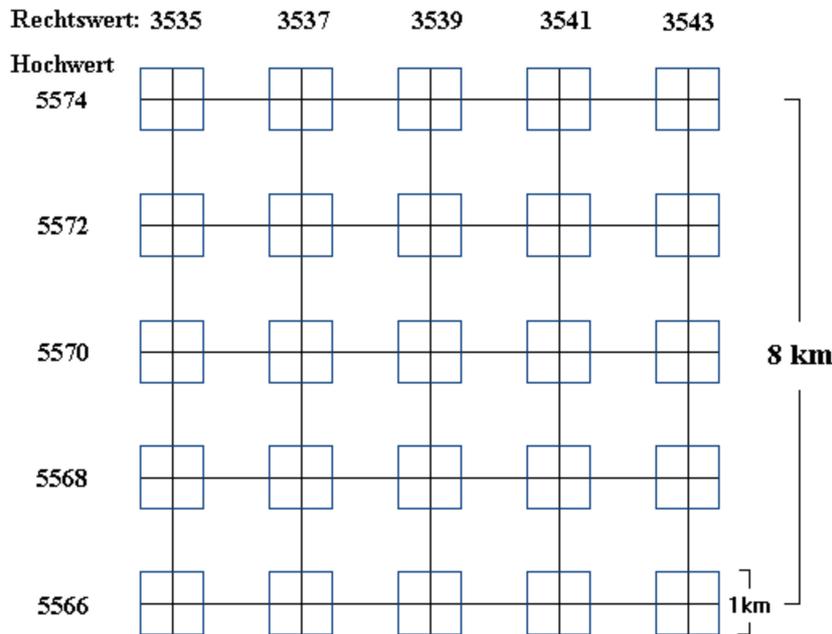


Abb. 2: Messnetz einer Dauerbeobachtungsfläche (Beispiel der DBF „Spessart“)

Die Anzahl der insgesamt untersuchten Messflächen für die Luftgütekartierung ist nicht konstant (Tab. 2). Durch das Hinzukommen der Untersuchungsfläche am Flughafen in 2007 erhöhte sie sich beispielsweise. 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. Ebenso fielen Messflächen aus, weil die Bäume gerodet oder nicht mehr geeignet waren. Als Folge ist eine gewisse Fluktuation der Anzahl von Messflächen in den DBF zu verzeichnen.

Tab. 2: Anzahl untersuchter Flächen der Luftgütekartierung zwischen 1992 und 2017, inklusive Flughafen

Jahr	1992	1997	2002	2007	2012	2017
Anzahl DBF- / Untersuchungsflächen	8	6	7	8	8	8
Anzahl untersuchter Messflächen	100	114	109	135	155	158

4.3 Dokumentation der Substrat- und Flechtendaten

Zur Dokumentation der untersuchten Substrate (Bäume, Mauern) im Gelände wird ein Feldrechner Fieldbook A1 (Abb. 3) mit integriertem GPS und der Software Arcpad 10.2 verwendet .

Die Position der Trägerbäume konnte durch die GPS-Anzeige direkt in ein hinterlegtes Luftbild eingetragen werden.

Außerdem wurden in diesem Zuge auch Standortdaten digital erfasst. So ist sichergestellt, dass bei einer Wiederholungsuntersuchung – sofern noch vorhanden – dieselben Bäume bzw. Mauern untersucht werden.



Die zur Luftgüteuntersuchung kartierten Bäume werden zusätzlich mit einem Edelstahl Nagel markiert, der in der Mitte der Messgitter-Oberkante in 1,5 m Höhe dauerhaft eingeschlagen wird.

Die Flechtendaten wurden im Gelände in einen Aufnahmebogen eingetragen und anschließend in eine MS Access-Datenbank überführt.

Abb. 3: Feldrechner Fieldbook (oben), Luftbildausschnitt mit kartierten Bäumen und Mauern, DBF Melsungen (unten)



Darstellung auf Grundlage von Daten des HLNUG, ergänzt

4.4 Klima- und Depositionsdaten

Die über lange Zeiträume erhobenen Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes wurden in der Vorkartierung 2012 für die Untersuchungsflächen extrahiert (WINDISCH et al. 2014) und sind dem Anhang 2 zu entnehmen.

4.5 Luftgüteuntersuchung

Zur Luftgüteuntersuchung werden mit der Flechtenkartierung und dem Folienverfahren zwei nach Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) entwickelte Methoden angewendet.

4.5.1 Flechtenkartierung nach VDI 3957 Blatt 13

Die Flechtenkartierung erfolgt nach VDI 3957 Blatt 13, Anhang A. Dazu werden die Flechten an standardisierten Trägerbäumen erfasst. Es wird ein Messgitter an den Mittelstamm der freistehenden Bäume angelegt, das Vorkommen und die Häufigkeit (Frequenz) der Flechten im Messgitter werden notiert. Aus den Daten wird der Luftgüteindex berechnet.

Auswahl der Trägerbäume

In jeder Messfläche werden 6-10 geeignete Bäume auf ihren Flechtenbewuchs untersucht. Sinkt die Zahl der in den vorigen Kartierungen noch verfügbaren Bäume (z. B. wegen Überalterung, Fällungen, Windwurf), 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 Schwankung der Anzahl von Messflächen pro DBF zu verzeichnen (vgl. Kap. 4.2)

Sowohl die Auswahl der standardisierten Trägerbäume als auch die Erfassung der Flechten erfolgt nach VDI 3957 Blatt 13. Die Standardisierung betrifft Baumart, Umfang, Beschattung, Einflüsse der Umgebung, etc. Die Baumarten werden entsprechend ihres Borken-pH-Wertes in Gruppen eingeteilt. Bäume innerhalb einer Gruppe gelten als vergleichbar. In der vorliegenden Arbeit werden die Baumarten der Gruppe 1 gewählt.

Tab. 3: Baumartengruppe nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13, mit zulässigem Baumumfang

Gruppe 1 Baumrinden unter natürlichen Verhältnissen subneutral
Spitzahorn (<i>Acer platanoides</i>), 70-280 cm
Esche (<i>Fraxinus excelsior</i>), 70-280 cm
Ulme (<i>Ulmus spec.</i>), 70-280 cm
Walnussbaum (<i>Juglans regia</i>), 70-280 cm
Manna-Esche (<i>Fraxinus ornus</i>), 70-280 cm
Hybrid-Pappel (<i>Populus x canadensis agg.</i>), 70-280 cm
Bergahorn (<i>Acer pseudoplatanus</i>), 70-280 cm
Apfelbaum (<i>Malus domestica</i>), 70-160 cm
Birnbaum (<i>Pyrus communis</i>), 70-160 cm
Winterlinde (<i>Tilia cordata</i>), 100-280
Sommerlinde (<i>Tilia platyphyllos</i>), 100-280 cm

Erfassung der Flechten

Zur Erfassung der Flechten wird das Gitter mit zehn Gitterfeldern (je 10 x 10 cm) an der am stärksten bewachsenen Stammseite angelegt (VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13, Anhang A). Es werden alle Flechtenarten aufgenommen. Für jede vorgefundene Art wird notiert, in wie vielen der zehn Felder des Gitters die Art vorkommt (Frequenz). Ist eine Identifikation der Flechten vor Ort nicht sicher möglich, werden unter Schonung des Bestandes Proben genommen und im Labor bestimmt.

Als Bestimmungsliteratur dient das Werk von WIRTH (WIRTH et al. 2013) und diverse gattungsspezifische Flechtenwerke. Deutsche Flechtennamen wurden dem Buch von WIRTH und KIRSCHBAUM (WIRTH & KIRSCHBAUM 2014) entnommen.

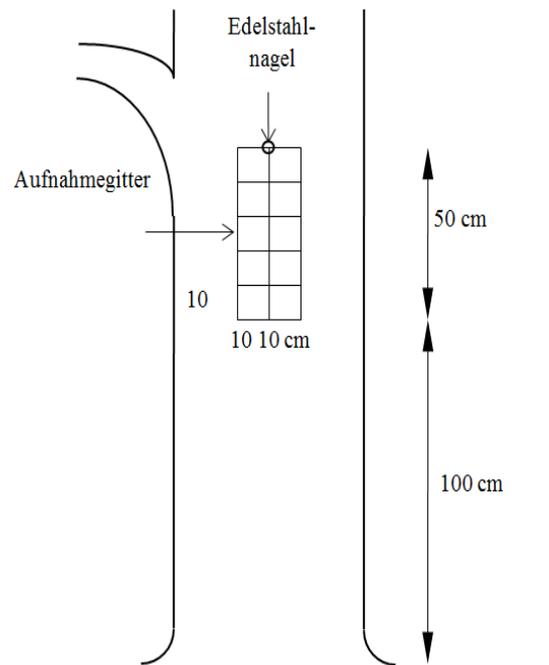


Abb. 4: Flechtaufnahmegitter am Baum (nach VDI 3957 Blatt 13, Anhang A)

Berechnung der Luftgüteindizes (LGI)

Die Berechnung der Luftgüteindizes erfolgt nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 (VDI 3957 Blatt 13, 2005). Aus der Anzahl der im Aufnahmegitter vorhandenen Arten und deren Häufigkeit wurden zunächst Flechten-Diversitätswerte (FDW) errechnet. Die FDW wurden für die Eutrophierung anzeigenden Arten (Eutrophierungszeiger) und für die übrigen Arten (Referenzarten) getrennt berechnet. Eutrophierungszeiger sind die in Tab. 4 genannten Arten. Die Einschätzung der Arten als Eutrophierungszeiger basiert auf den Zeigerwerten für Pflanzen nach WIRTH (1991). In einer neunstufigen Skala werden dabei die Ansprüche der Arten gegenüber wichtigen ökologischen Faktoren wie Temperatur, Feuchte, Nährstoffangebot und pH-Wert ausgedrückt.

Dazu ist zu bemerken, dass seit 2010 eine aktualisierte Liste (WIRTH 2010) existiert. Die entsprechenden Änderungen sind in der VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 (Stand 2005) aber bislang noch nicht umgesetzt.

Tab. 4: Liste der Eutrophierungszeiger nach VDI-RICHTLINIE 3957 Blatt 13, Stand: 2005

Flechtenarten
<i>Caloplaca citrina</i>
<i>Caloplaca holocarpa</i>
<i>Lecanora dispersa</i>
<i>Lecanora hagenii</i>
<i>Lecanora muralis</i>
<i>Phaeophyscia nigricans</i>
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>
<i>Physcia adscendens</i>
<i>Physcia caesia</i>
<i>Physcia dubia</i>
<i>Physcia tenella</i>
<i>Physconia grisea</i>
<i>Rinodina spp.</i>
<i>Xanthoria candelaria</i>
<i>Xanthoria parietina</i>
<i>Xanthoria polycarpa</i>

Bewertung des Luftgüteindex (LGI)

Für die ermittelten Flechten-Diversitätswerte können in der Bewertungsmatrix (Abb. 5) die entsprechenden Luftgüteindizes (LGI), zum Beispiel „4.2“, ausgelesen werden. Für jede Messfläche wird ein LGI ermittelt. Der Luftgüteindex repräsentiert die Belastung durch saure und eutrophierende Luftverunreinigungen. Der Index setzt sich aus zwei Ziffern zusammen, die durch einen Punkt getrennt sind. Die erste Ziffer des Indexes entspricht der Luftgüte und ist mit einer Farbe gekoppelt, die zweite Ziffer symbolisiert das Vorkommen von Eutrophierungszeigern (Abb. 6). Dabei wird die Luftgüte verbal mit „sehr hoch - hoch - mäßig - gering - sehr gering“ bewertet und mit der entsprechenden Farbe in der Luftgütekarte gekennzeichnet.

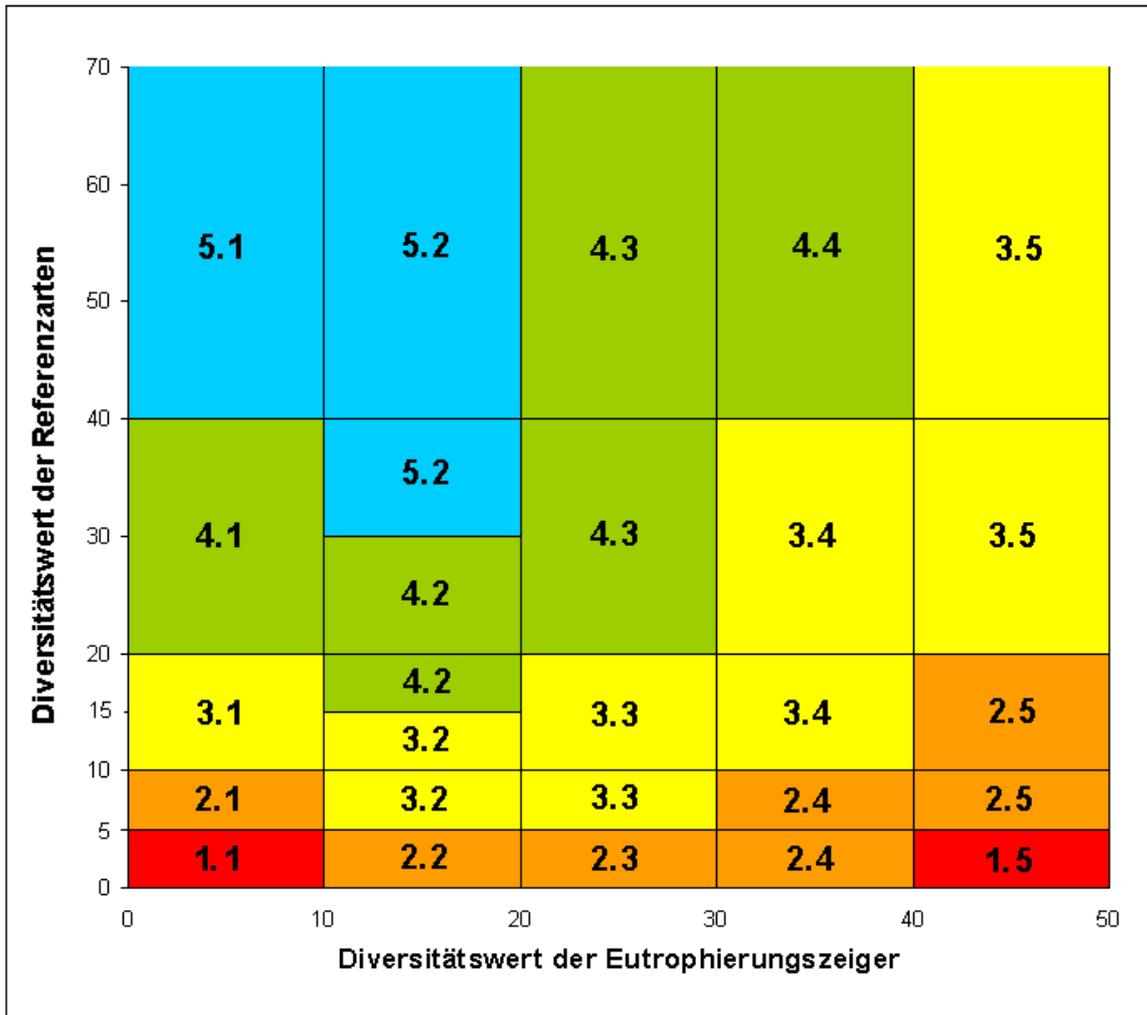


Abb. 5: Bewertungsmatrix zur Ermittlung des Luftgüteindex anhand der Kombination der Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger und der übrigen Arten (Datenerhebung nach VDI-Richtlinie 3579 Blatt 13, Anhang A)

Bewertung der Luftgüte ohne Berücksichtigung eutrophierender Luftschadstoffe			Bewertung eutrophierender Luftschadstoffe	
5	sehr gute 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	

Folgende Beispiele erläutern die verbale Beschreibung des Luftgüteindex:

- 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.

Abb. 6: Erläuterung der Bewertungsmatrix nach VDI-Richtlinie 3579 Blatt 13

4.5.2 Folienverfahren nach VDI 3957 Blatt 8

Mit dem Folienverfahren nach VDI 3957 Blatt 8 wird eine Dokumentation auf der Ebene einzelner Flechtenlager und Flechtenrasen vorgenommen (VDI 3957 Blatt 8 2015).

An jeder Messfläche wurde in zurückliegenden Kartierungen einer der standardisierten Bäume der Luftgütekartierung für das Folienverfahren ausgewählt; dieser wird seitdem wiederholt untersucht. Die Untersuchung erfolgt am Mittelstamm der Bäume im Bereich des Messgitters. Innerhalb der 10 Messgitterflächen werden vier beieinanderliegende Teilaufnahmeflächen ausgewählt, wodurch sich ein Quadrat mit 20 cm Seitenlänge ergibt.

Voraussetzung für das Verfahren ist trockenes Wetter. Es wird eine Folie auf der Fläche befestigt, die Folie muss stramm anliegen. Dann werden die äußeren Konturen der Thalli mit Hilfe von wasserfesten, dünnen Filzstiften auf der Folie nachgezeichnet. Jeder Art wird eine Farbe zugeordnet. Der Filzstift wird so geführt, dass der Strich sich noch auf dem Flechtenrand befindet. Es werden alle mit bloßem Auge erkennbaren Flechtenlager übertragen. Am Rand der Folie befindet sich ein Beschriftungsetikett, auf dem die Farbgebung der Arten und weitere Angaben notiert werden. Die Eckpunkte der 20 x 20 cm umfassenden Beobachtungsfläche werden am Baum mit Edelstahlnägeln dauerhaft markiert.

Zur Vorbereitung der digitalen Auswertung werden die Folien gescannt (Abb. 7) und als Vorbereitung auf die folgende Analyse nachbearbeitet. Die Flächenberechnung der gezeichneten Flechtenthalli erfolgt mittels der Software ‚LiMo-Analyse‘ (Abb. 12). Das Programm wurde für diese Anwendung neu entwickelt und steht seit 2013 auf den Seiten der Technischen Hochschule Mittelhessen unter dem Link ‚<http://limo.mni.thm.de/>‘ zum Download bereit. Nähere Informationen zur Benutzung geben Handbuch und Publikation (WINDISCH & MENZEL 2013).



Abb. 7: Beispiel einer verkleinerten, gescannten Folie (Flechtenerfassung an einem Baum der DBF Gießen)

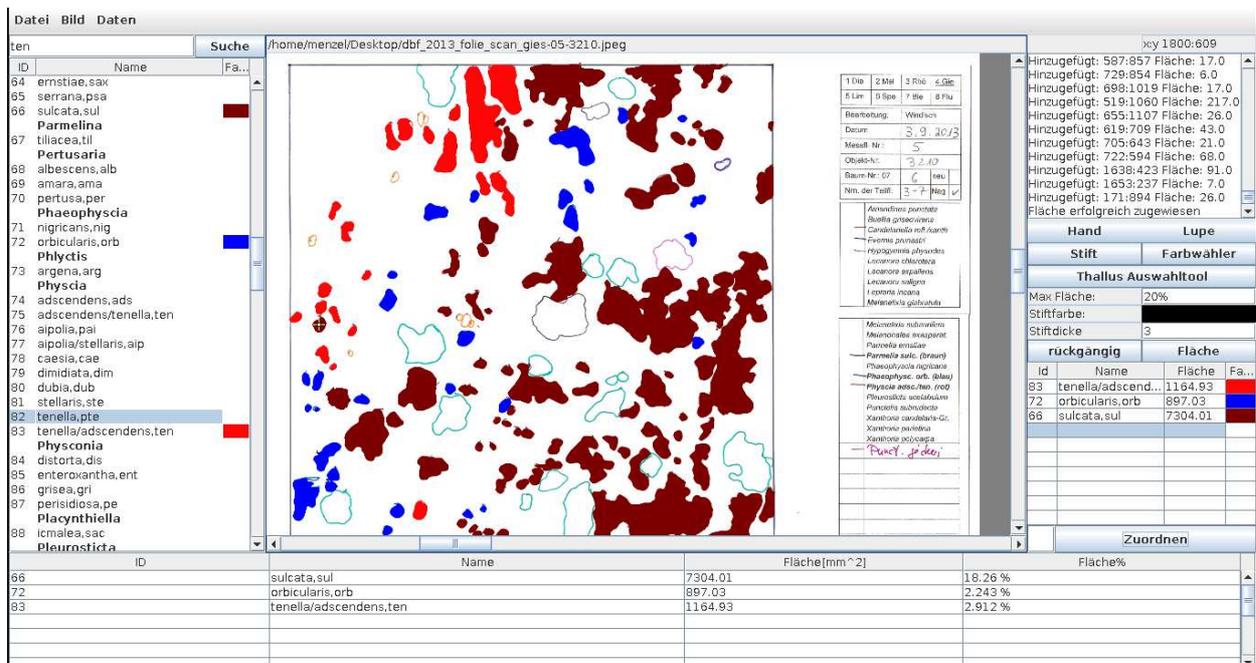


Abb. 8: Ansicht der Benutzeroberfläche von ‚LiMo-Analyse‘ während der Flächenauswertung

4.6 Klimawandel-Biomonitoring

Der Einsatz der Flechten zum Klimawandel-Biomonitoring ist ein neueres Arbeitsgebiet des Biomonitorings. Die erste Arbeit zum Thema in Hessen fand ergänzend zum Flechten-Dauerbeobachtungsprojekt statt und wurde 2008 veröffentlicht (CEZANNE et al. 2008).

Zusätzlich zu den Dauerbeobachtungsflächen der Luftgütekartierung werden seit 2007 zusätzliche Untersuchungsflächen („Flughafen“, „Rheingau“ und „Odenwald“) für das Klimawandel-Biomonitoring untersucht. Diese Untersuchungen finden auf einer Fläche von etwa 1 km² statt. Auch an den bisher untersuchten Dauerbeobachtungsflächen wird die Methode des Klimawandel-Biomonitorings eingesetzt.

Die Ergebnisse aus dem vorliegenden Projekt trugen zur Entwicklung der Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) zur Ermittlung der Wirkung von lokalen Klimaveränderungen mittels Flechtenkartierung bei. Die Richtlinie erschien 2017 im Weißdruck (VDI 3957 Blatt 20 2017).

Zu Beginn des Klimawandel-Biomonitorings in Hessen in 2007 erfolgte die Flechtenkartierung im Rahmen einer Methodenentwicklung auf drei unterschiedlichen Aufnahmeflächen. Die Zahl und Häufigkeit der Klimawandelzeiger war in Hessen anfangs ausgesprochen gering, wenn auch erste Arbeiten, vornehmlich aus den Meeresanrainern Niederlande und Dänemark, von der Ausbreitung atlantischer Flechtenarten berichten (vgl. Kap. 3.3). Es erschien als nicht zielführend, eine mögliche Ausbreitung von Klimawandelzeigern mit einer kleinen standardisierten Messfläche von 0,1 m² pro Aufnahmefläche (z. B. an einem Baum), wie sie das Messgitter der immissionsbezogenen Kartierung standardisierter Trägerbäume darstellt, zu dokumentieren. Folgerichtig wurde in der Arbeit zusätzlich ein breiteres Spektrum an Substraten untersucht. Dabei sollten sowohl Epiphyten als auch Gesteinsflechten in die Untersuchung mit einbezogen werden. Zum anderen soll durch eine ausreichende Zahl und Größe der Erfassungsflächen sichergestellt werden, dass klimawandelrelevante Arten – falls vorhanden – auch nachgewiesen werden können.

In der aktuellen VDI-Richtlinie zum Klimawandel-Biomonitoring ist lediglich die Kartierung von Epiphyten vorgesehen. Möglich sind qualitative oder quantitative Aufnahmen (VDI 3957 Blatt 20, 2017). Bei der qualitativen Aufnahme werden alle Flechtenarten notiert, die am Stamm zwischen 50 und 200 cm Höhe angetroffen werden. Die quantitative Aufnahme bedient sich eines Messgitters und einer Frequenzbestimmung, so wie dies bei der Luftgüteuntersuchung praktiziert wird.

4.6.1 Qualitative Erfassung der Flechten auf „Klimabäumen“

Auf jeder Untersuchungsfläche wurden 20 Bäume erfasst. Der Begriff „qualitativ“ bedeutet hier, dass nicht die Häufigkeit, z. B. in einem Messgitter, erfasst wird, sondern lediglich das Vorkommen einer Art an einem Baum.

Die 2017 neu erschienene Richtlinie (VDI 3957 Blatt 20) schreibt die Flechtenkartierung an standardisierten Trägerbäumen nach folgenden Anforderungen vor:

- Kartierung an Bäumen bestimmter Arten (*Acer platanoides*, *Fraxinus excelsior*, *Acer pseudoplatanus*, *Salix spp.*, *Juglans regia*, *Malus spp.*, *Ulmus spp.*, *Populus spp.*, *Robinia pseudoacacia*, alle Baumartengruppe 1)
- freistehend
- Stammumfang 50 bis 250 cm
- Stamm unbeschädigt und nicht von Kletterpflanzen bewachsen
- Neigung < 20°

Zur Wahrung einer gleichbleibenden Kartierungstiefe wird der Stamm solange auf neue Artvorkommen untersucht, bis zwei Minuten lang keine neuen Arten mehr nachgewiesen werden.“

Um die Chance zu erhöhen, die vor zehn Jahren erst vereinzelt eingewanderten Klimawandelzeiger zu erfassen, wurde zu Beginn der Untersuchung in 2007 im Konsens mit den Diskussionen in der VDI-Arbeitsgruppe für das vorliegende Projekt festgelegt, dass die Standardisierung der Trägerbäume nicht in dem Maße streng geregelt sein soll wie bei der Luftgütekartierung. Die Methode weicht in folgenden Punkten von den oben genannten Anforderungen ab:

- Von den 200 untersuchten Bäumen gehört mit 30 Bäumen ein Anteil von 15 % nicht der Baumartengruppe 1 der Richtlinie an. Es sind Vertreter von *Quercus robur* (20 Bäume), *Betula pendula* (3 Bäume), *Acer campestre* (2 Bäume), *Prunus domestica* (3 Bäume) sowie *Sorbus aria* (2 Bäume).
- Der empfohlene Stammumfang von 50 bis 250 cm wurde bei fünf Bäumen (2,5 %) unterschritten und bei elf Bäumen (5,5 %) überschritten.

Bei den Folgeuntersuchungen in 2012 und 2017 wurde kontinuierlich eine Angleichung an die aktuelle Richtlinie vorgenommen. Das bedeutet, dass Bäume, die ersetzt werden müssen, aus Baumartengruppe 1 gewählt werden und den erforderlichen Stammumfang haben.

Es wird jeweils der gesamte Baumstamm, von ca. 50-200 cm nach Flechten abgesucht. Das Vorkommen aller Arten pro Baum wird notiert. Es ist zulässig, einige der „VDI-Bäume“ (vgl. Kapitel 0) auch als Klimabäume zu untersuchen.

4.6.2 Quantitative Erfassung der Flechten im Aufnahmegeritter

Die quantitative Erfassung der Flechten auf einer definierten Aufnahme­fläche entspricht der Erfassung zur Luftgütebestimmung und wurde im Kapitel 0 beschrieben.

4.6.3 Erfassung der Flechten auf Mauern

Pro Untersuchungsfläche wurden 30 Mauerabschnitte mit jeweils 2 m² ausgewählt. Die Mauern stehen innerorts, auf einer Fläche von etwa 1 km². Dabei wurde versucht, möglichst unterschiedliche Mauer­materialien (silikatische Gesteine und Kalksteine, Ziegelsteine, Beton, Mörtel), unterschiedliche Expositionen (N, S, W, O, Horizontal- bzw. Vertikalflächen) und unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen zu erfassen, um eine möglichst repräsentative Auswahl zu erhalten. Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass sowohl junge als auch alte Mauern in die Untersuchung eingehen.

Ungeeignet sind Mauern, die einer starken Beeinträchtigung unterliegen. Dazu gehören Störungen in Verkehrsbereichen und auf Privatgrundstücken, übermäßige Beschattung, Ausbesserung und Reinigung der kompletten Mauer, Neuverputzung oder Neuerrichtung der Mauer.

Auf den untersuchten Mauerstücken wurde das Vorkommen aller Arten erfasst. Auf eine Markierung der untersuchten Mauerabschnitte wurde verzichtet.



Abb. 9: Untersuchung einer Natursteinmauer auf Flechten

4.6.4 Datenauswertung

In den vergangenen Jahren entwickelte der Verein Deutscher Ingenieure eine Richtlinie zur Kartierung von Flechten zur Ermittlung der Wirkung von lokalen Klimaveränderungen (VDI-Richtlinie 3957 Blatt 20). Die Erkenntnisse der Flechten-Dauerbeobachtung sind in die Richtlinie eingeflossen. In der Richtlinie erfolgte eine Beschränkung auf die Untersuchung von Bäumen, nicht aber von Mauern. Daher entspricht die Auswertung der Epiphytendaten der Richtlinie, während die Auswertung der Mauern anhand von Zeigerwerten erfolgt.

Klimawandelzeigerindex (KWI), erhoben an Baumstämmen

Aus den Flechtendaten der qualitativen Erfassung (vgl. Kapitel 4.6.1) wird der Klimawandelindex (KWI) errechnet. Es wird die mittlere Artenzahl der Klimawandelzeiger für die Bäume einer Messfläche (folgend als Probenahme­fläche bezeichnet) nach folgender Formel ermittelt.

$$KW I_j = \frac{(KWZ_{B1} + KWZ_{B2} + KWZ_{B3} + \dots + KWZ_{Bn})}{n}$$

Dabei sind

KWZ Anzahl der Klimawandelzeiger an jedem Baum (B1, B2, usw.)
der Probenahme­fläche j

n Anzahl der untersuchten Bäume in der Probenahme­fläche j

Zum Beispiel sagt ein Wert von 1 aus, dass im Mittel an jedem Baum eine Wärmezeigerart gefunden wird.

Zu den Klimawandelzeigern gehören 45 epiphytische Flechtenarten (Tab. 5). Die Einstufung von Arten als Klimawandelzeiger erfolgte in einer mehrstufigen Auswahl, die auf ökologischen Zeigerwerten nach WIRTH (2010) und KIRSCHBAUM & WIRTH (2010) beruht. Relevant waren Zeigerwerte für Kontinentalität, Temperatur und Eutrophierung. Darüber hinaus wurden Arten ergänzt, für die kein Zeigerwert nach WIRTH existiert, die aber nach der niederländischen Checkliste der Flechten von APTROOT & SPARRIUS (2009) als gemäßigt-mediterran oder subatlantisch-submediterranean-gemäßigt verbreitet gelten. Das Auswahlverfahren wird in der Richtlinie (VDI-Richtlinie 3957 Blatt 20) detailliert erläutert.

Tab. 5: Liste der Klimawandelzeiger nach (VDI 3957 Blatt 20)

Klimawandelzeiger		
<i>Arthonia pruinata*</i>	<i>Hypotrachyna laevigata</i>	<i>Parmotrema reticulatum</i>
<i>Arthonia ruana</i>	<i>Hypotrachyna revoluta</i>	<i>Pertusaria hymenea</i>
<i>Bacidina neosquamulosa</i>	<i>Lecanographa amylacea</i>	<i>Pertusaria trachythallina</i>
<i>Bactrospora dryina</i>	<i>Lecanora hybocarpa*</i>	<i>Phaeographis inusta</i>
<i>Coniocarpon cinnabarinum</i>	<i>Melanohalea elegantula</i>	<i>Physcia tribacioides*</i>
<i>Collema fasciculare</i>	<i>Melanohalea laciniatula</i>	<i>Porina leptalea</i>
<i>Degelia plumbea</i>	<i>Micarea adnata</i>	<i>Punctelia borrieri</i>
<i>Diploicia canescens</i>	<i>Micarea viridileprosa*</i>	<i>Punctelia jeckeri</i>
<i>Fellhanera bouteillei</i>	<i>Nephroma laevigatum</i>	<i>Punctelia subrudecta</i>
<i>Flavoparmelia caperata</i>	<i>Opegrapha ochrocheila</i>	<i>Pyrenula nitida</i>
<i>Flavoparmelia soredians</i>	<i>Opegrapha vermicellifera</i>	<i>Pyrenula nitidella</i>
<i>Fuscidea lightfootii*</i>	<i>Parmelina quercina</i>	<i>Ropalospora viridis</i>
<i>Graphis elegans*</i>	<i>Parmelia submontana</i>	<i>Schismatomma decolorans</i>
<i>Halecania viridescens*</i>	<i>Parmotrema perlatum</i>	<i>Thelotrema lepadinum</i>
<i>Hypotrachyna afrorevoluta</i>	<i>Parmotrema pseudoreticulatum*</i>	<i>Usnea florida</i>

* Arten ohne Zeigerwert nach WIRTH, die aber nach APTROOT & SPARRIUS (APTROOT & SPARRIUS 2009) als gemäßigt-mediteran oder subatlantisch-submediterrän-gemäßigt gelten

Diversitätswert der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}), erhoben im Messgitter standardisierter Trägerbäume

Aus den Flechtendaten der quantitativen Erfassung (vgl. Kapitel 4.6.2.) wird der Diversitätswert der Klimawandelzeiger berechnet. In diesen Index fließt die Flechtenfrequenz im Aufnahmegeritter ein. Auch hier wird ein Mittelwert aus den untersuchten Bäumen einer Messfläche (folgend als Probenahme-fläche bezeichnet) berechnet.

$$FDW_{KWZ_j} = \frac{(FDW_{KWZ_{B1}} + FDW_{KWZ_{B2}} + FDW_{KWZ_{B3}} + \dots + FDW_{KWZ_{Bn}})}{n}$$

Dabei sind

FDW_{KWZ} Frequenzsumme der Klimawandelzeiger-Arten an jedem Baum (B1, B2, usw.) der Probenahme-fläche j

n Anzahl der untersuchten Bäume in der Probenahme-fläche j

Zum Beispiel bedeutet ein Wert von 2, dass im Mittel an jedem der kartierten Bäume in dem zehn-felderigen Messgitter zwei Datensätze mit Klimawandelzeigern erfasst werden. Diese Methode hat den Vorteil, dass Daten aus früheren Erhebungen verwendet werden können (früher wurde nur im Messgitter kartiert).

Es wird eine Prüfung auf signifikante Änderungen des FDW_{KWZ} für den Zeitraum 2012 bis 2017 vorgenommen. Dazu wird der nicht-parametrische Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben verwendet. Es werden Paardifferenzen ausgewertet ($p < 0,05$); dabei besteht jedes Datenpaar aus den FDW_{KWZ} zweier, in beiden Untersuchungsjahren kartierter, Bäume. Die Zahl der Datenpaare pro Dauerbeobachtungsfläche liegt zwischen 81 und 176.

Wärmezeiger-Index (WZI), erhoben an Mauern

Mauern stellen Ersatzlebensräume für gesteinsbewohnende (epilithische) Flechten dar. Für epilithische Arten existiert derzeit keine Klimawandelzeigerliste. Bei einer Auswertung der Mauerflechtendaten nach dem Auswahlschema, wie es für Epiphyten angewandt wird, ergeben sich keine entsprechenden Klimawandelzeigerarten. Nicht zuletzt liegt dies daran, dass die Ökologie der Gesteinsflechten nicht in dem Maße erforscht wurde, wie dies für Epiphyten der Fall ist. So haben ein Drittel der gefundenen Arten keine Zeigerwerte und für die übrigen Arten ist der Kenntnisstand lückenhaft.

In dieser Auswertungsvariante wird ausschließlich die Temperaturzahl herangezogen. Die Temperaturzahl (T) beschreibt das Vorkommen der Flechten im Wärmegefälle von den hohen Gebirgslagen bis in die wärmsten Tieflagen Mitteleuropas. Damit liegt ein besonderes Augenmerk auf den sogenannten Wärmezeigern unter den Mauerflechten. Alle Arten, die nach WIRTH (WIRTH 2010) eine Temperaturzahl zwischen 7 und 9 haben, werden als Wärmezeiger (WZ) bezeichnet.

Aus der Gesamtheit der 516 Arten, für die Temperaturzeigerwerte vorliegen, resultieren 58 Wärmezeigerarten (Tab. 6). Da nicht nur Gesteinsflechten, sondern auch substratvage Rindenflechten auf Mauern angetroffen werden können, sind diese ebenfalls gelistet.

Tab. 6: Wärmezeigerarten, die auf Rinde und/oder Gestein siedeln

Flechtenart	Temperaturzahl	bevorzugtes Substrat (R: Rinde, G: Gestein)
<i>Arthonia cinnabarina</i>	7	R
<i>Bagliettoa marmorea</i>	9	G
<i>Buellia ocellata</i>	7	G
<i>Caloplaca albolutescens</i>	9	G
<i>Caloplaca aurantia</i>	9	G
<i>Caloplaca dalmatica</i>	8	G
<i>Caloplaca demissa</i>	7	G
<i>Caloplaca flavescens</i>	7	G
<i>Caloplaca granulosa</i>	9	G
<i>Caloplaca lactea</i>	8	G
<i>Caloplaca teicholyta</i>	8	G
<i>Candelariella medians</i>	9	G
<i>Candelariella plumbea</i>	9	G
<i>Candelariella viae-lacteae</i>	9	R
<i>Catillaria lenticularis</i>	7	G
<i>Catillaria minuta</i>	7	G
<i>Diploicia canescens</i>	7	GR
<i>Dirina stenhammarii</i>	8	G
<i>Enterographa hutchinsiae</i>	7	GR
<i>Flavoparmelia caperata</i>	7	RG
<i>Flavoparmelia soredians</i>	9	R
<i>Flavopunctelia flaventior</i>	8	R
<i>Hyperphyscia adglutinata</i>	9	RG
<i>Hypotrachyna afrorevoluta</i>	7	RG
<i>Hypotrachyna laevigata</i>	9	RG
<i>Hypotrachyna revoluta</i>	7	G
<i>Lecanographa amylacea</i>	7	R
<i>Lecanora pannonica</i>	8	G
<i>Lecanora rouxii</i>	8	G
<i>Lobothallia radiosa</i>	7	G
<i>Melanohalea elegantula</i>	7	R
<i>Melanohalea laciniatula</i>	7	R
<i>Ochrolechia parella</i>	7	G
<i>Opegrapha ochrocheila</i>	7	R
<i>Opegrapha vermicellifera</i>	8	R
<i>Oxneria fallax</i>	8	G
<i>Oxneria huculica</i>	8	R

<i>Parmotrema perlatum</i>	7	R
<i>Parmotrema reticulatum</i>	9	R
<i>Pertusaria flavicans</i>	8	G
<i>Pertusaria hymenea</i>	7	R
<i>Pertusaria trachythallina</i>	7	R
<i>Phaeographis inusta</i>	7	R
<i>Physciella chloantha</i>	9	RG
<i>Physconia grisea</i>	7	RG
<i>Placocarpus schaereri</i>	9	G
<i>Porina leptalea</i>	7	R
<i>Protoparmelia hypotremella</i>	7	R
<i>Psora testacea</i>	9	G
<i>Punctelia borreri</i>	8	R
<i>Punctelia jeckeri</i>	7	R
<i>Punctelia subrudecta</i>	7	R
<i>Pyrenula nitida</i>	7	R
<i>Pyrenula nitidella</i>	7	R
<i>Rinodina lecanorina</i>	8	G
<i>Sarcopyrenia gibba</i>	9	G
<i>Schismatomma decolorans</i>	7	R
<i>Toninia toniniana</i>	9	G
<i>Xanthomendoza fallax</i>	8	RG

Aus den Daten der Flechtenkartierung an Mauern, die eine qualitative Erfassung darstellt (vgl. Kapitel 4.6.3) wird der Wärmezeigerindex (WZI) errechnet. Es wird die mittlere Artenzahl der Wärmezeiger für die Mauerabschnitte einer Messfläche (folgend als Probenahme­fläche bezeichnet) nach folgender Formel ermittelt.

$$WZI_j = \frac{(WZ_{M1} + WZ_{M2} + WZ_{M3} + \dots + WZ_{Mn})}{n}$$

Dabei sind

WZ Anzahl der Flechtenarten mit einem Temperaturzeigerwert von 7-9 an jedem Mauerabschnitt (M1, M2, usw.) der Probenahme­fläche j

n Anzahl der untersuchte Mauerabschnitte in der Probenahme­fläche j

Zum Beispiel bedeutet ein WZI von 2, dass im Mittel an jedem der kartierten Mauerabschnitte zwei Wärmezeigerarten erfasst werden.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Untersuchte Trägerbäume und Mauern

Im aktuellen Untersuchungszeitraum wurden 1.342 Trägerbäume für die Luftgüteuntersuchung („VDI-Bäume“) kartiert. Für das Klimawandel-Biomonitoring wurden 199 weitere Bäume („Klimabäume“) und 301 Mauerabschnitte auf ihren Flechtenbewuchs geprüft.

Für die Luftgütekartierung nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 wurden im Wesentlichen Baumarten mit unter natürlichen Verhältnissen subneutralen Baumrinden (vgl. Tab. 4) verwendet. Es ergibt sich folgendes Spektrum (Abb. 10).

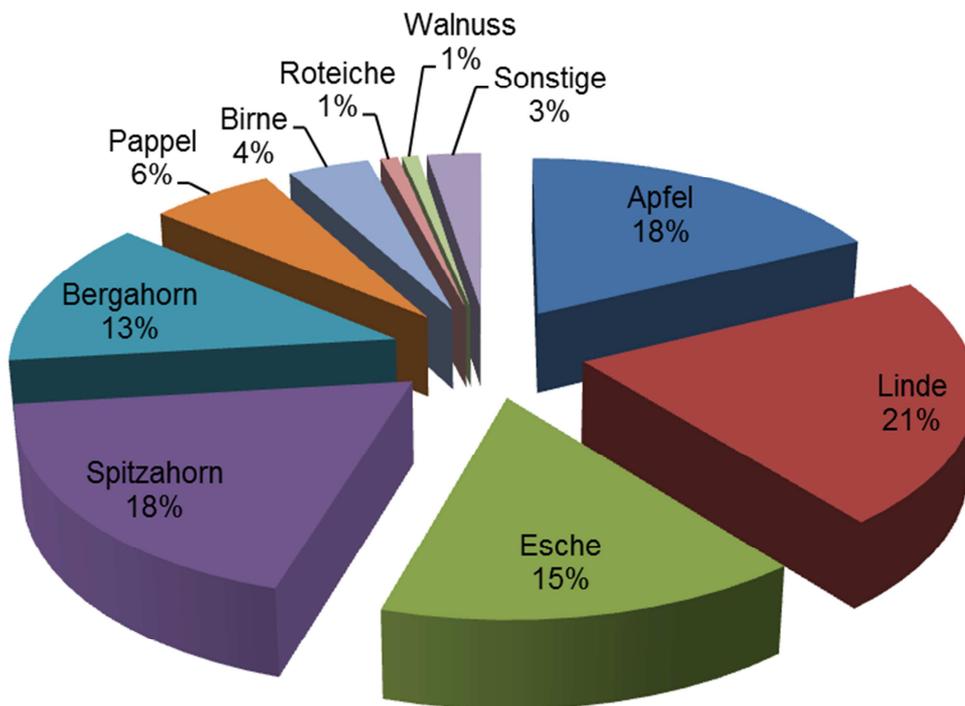


Abb. 10: Baumartenspektrum der Luftgüteuntersuchung 2017

Die Landnutzung der Dauerbeobachtungsflächen ist – wie die des gesamten Bundeslandes – einem stetigen Wandel unterworfen. So waren nicht alle der bisher untersuchten Bäume noch vorhanden oder noch für eine Flechtenkartierung geeignet. Bei jeder Wiederholungsuntersuchung muss ein Teil der Trägerbäume durch neue Bäume ersetzt werden, was sich langfristig in einer Verschiebung des Baumartenspektrums bemerkbar macht (Abb. 11). Stellten Apfelbaum und Pappel zu Beginn der Untersuchungsreihe noch 86 % der Trägerbaumarten, so sind es aktuell nur noch 24 %. Rodungen überalterter Bestände und fehlende Nachpflanzungen führten insbesondere bei Pappeln und hochstämmigen Obstbäumen zu einer geringeren Berücksichtigung dieser Gehölzarten in der aktuellen Untersuchung.

Anders stellt sich die Situation bei Esche, Linde, Spitzahorn und Bergahorn dar. Diese Baumarten wurden in den vergangenen Jahrzehnten verstärkt angepflanzt. Da sie sich ebenfalls für die Flechtenkartierung nach VDI 3957 Blatt 13 eignen, wurden diese Baumarten zunehmend häufiger kartiert.

Die in 2002 bzw. 2007 neu hinzugekommenen Dauerbeobachtungsflächen Rhön und Flughafen tragen ebenfalls zu Verschiebungen im Baumartenspektrum bei. Aktuell ist in der Rhön die Esche als Trägerbaum am häufigsten (56 %), am Flughafen ist es mit 41 % der Spitzahorn. Alle hier dargestellten Trägerbaumarten sind nach VDI-Richtlinie zur gemeinsamen Auswertung ihrer Flechtenbestände geeignet (VDI 3957 Blatt 13 2005).

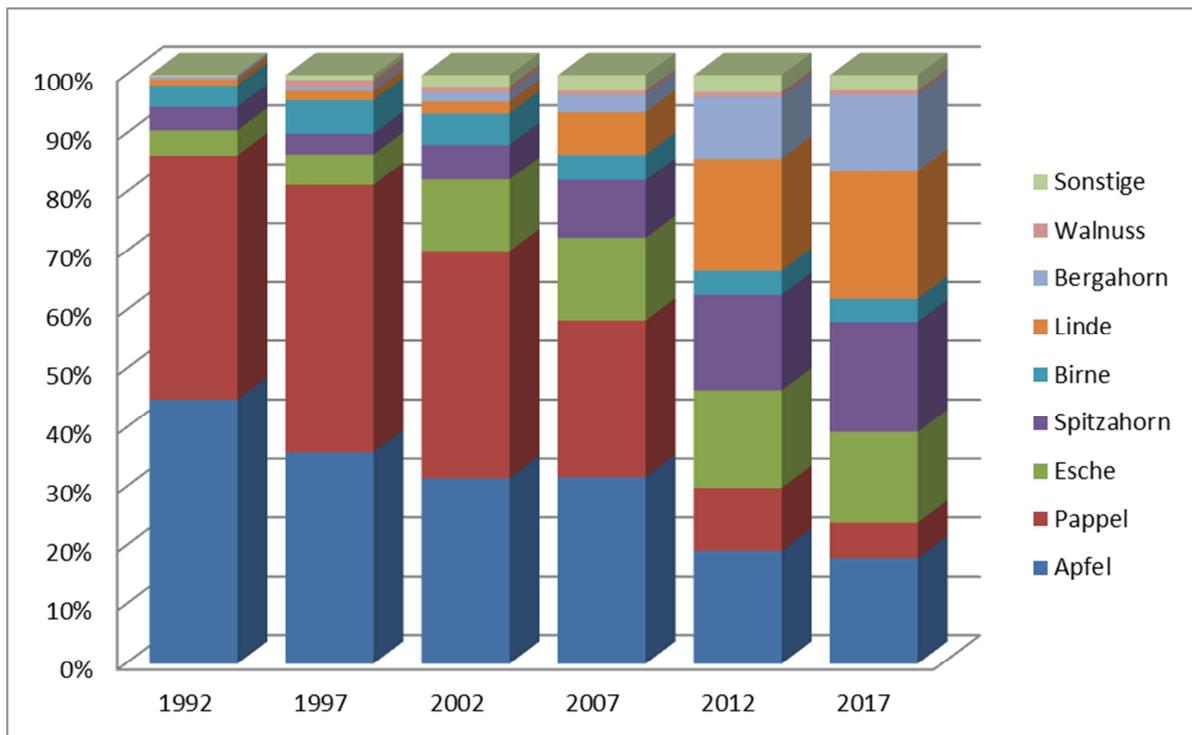


Abb. 11: Entwicklung des Anteils häufig untersuchter Baumarten der Luftgüteuntersuchung

Beim Klimawandel-Biomonitoring wurde bei der Baumartenwahl Wert auf Vielfalt gelegt, was sich im Baumartenspektrum bemerkbar macht (Tab. 7). Auf die Baumarten Apfel und Pappel wurde weitgehend verzichtet. Dahingegen wurden in geringem Umfang Baumarten, die im Rahmen der VDI-Erfassung aufgrund ihres natürlicherweise sauren Borken-pH-Wertes nicht zulässig wären, verstärkt mit einbezogen. Dazu gehören z. B. verschiedene Eichenarten oder die Hänge-Birke.

Tab. 7: Baumartenspektrum des Klimawandel-Biomonitorings in 2017

Baumart	Anteil in %	Baumart	Anteil in %
Linde	36,46	Hänge-Birke	3,31
Spitzahorn	14,36	Roskastanie	1,66
Eiche	11,05	Walnuss	2,21
Bergahorn	11,05	Pappel	2,21
Kirsche	2,21	Feldahorn	1,10
Apfel	3,31	Weißdorn	1,10
Esche	3,87	Weide	0,55
Robinie	4,97	Mehlbeere	0,55

Bei der Kartierung der Mauern wurden diverse Baumaterialien angetroffen und auf ihren Flechtenbewuchs untersucht (Abb. 12). Natürliche Materialien wie Sandstein und sonstige Natursteine stellen mit 55 % etwa die Hälfte der Untergründe. Das Spektrum entspricht weitestgehend dem der letzten Untersuchung.

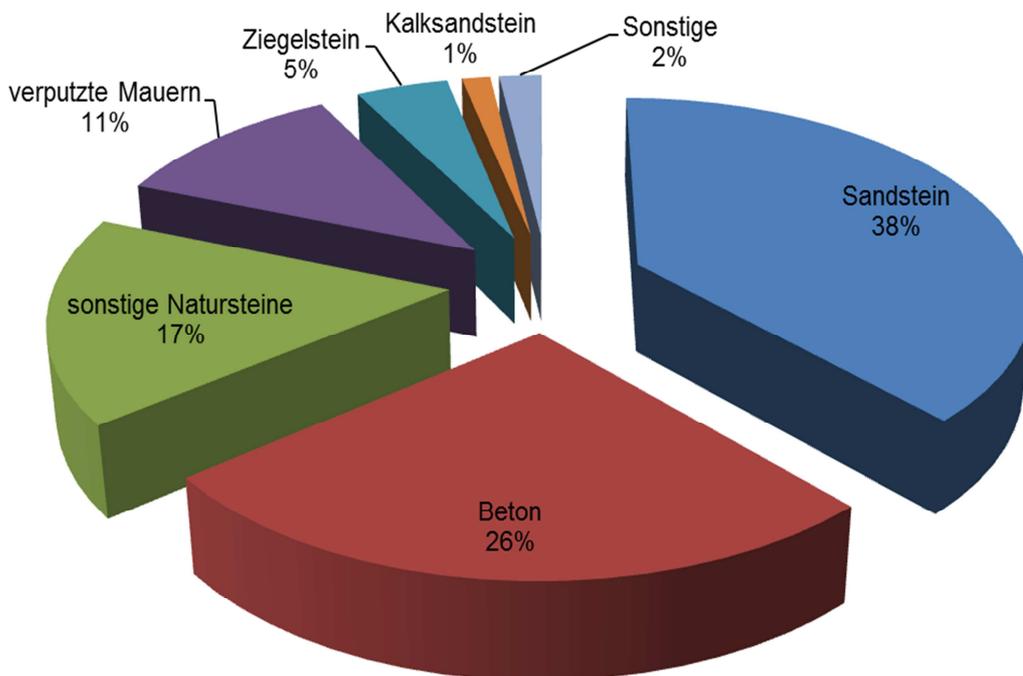


Abb. 12: Spektrum der Baumaterialien der untersuchten Mauern zum Klimawandel-Biomonitoring

5.2 Arten

An den 1.847 untersuchten Objekten (Bäumen oder Mauern) wurden insgesamt 257 Taxa gefunden, davon waren 247 Flechten. Zusätzlich wurden auf Flechten wachsende Pilze mit erfasst: Es wurden zehn verschiedene flechtenbewohnende (lichenicole) Pilze dokumentiert. Die Artenliste ist dem Anhang zu entnehmen.

Schwerpunkt dieser Arbeit ist das Biomonitoring. Naturschutzfachliche Aspekte wurden bisher nicht bearbeitet. Die überwiegende Beschränkung der Kartierung auf standardisierte Bäume lässt kaum flechtenfloristische Besonderheiten erwarten. Dennoch gelangen naturschutzfachlich interessante Funde. Ein Neufund für Hessen ist *Caloplaca ulcerosa*. Erstmals im Rahmen der landesweiten Dauerbeobachtung wurden die folgenden fünf (sehr) seltenen Arten festgestellt: *Caloplaca grimmiae*, *Gyalecta carneola*, *Lecania croatica*, *Lecanora sinuosa* und *Physciella chloantha*. Im Fall der letztgenannten Art handelt es sich bei dem Fund nahe Neumorschen um einen ungewöhnlich weit im Norden liegenden Wuchsort dieser wärmeliebenden und sich derzeit ausbreitenden Flechtenart. Erfreulicherweise konnten die bekannten Vorkommen der naturschutzfachlich bedeutsamen Arten *Caloplaca luteoalba*, *C. xerica* und *Parmelina quercina* 2017 bestätigt werden. Der Wuchsort von *Caloplaca xerica* bei Lorch (Mittelrheintal) ist aktuell der einzig bekannte in Deutschland. Nachdem sämtliche Vorkommen von *Parmelina quercina* in Darmstadt erloschen sind, stellt die Population bei Weyer (Dauerbeobachtungsfläche Limburg) das letzte in Hessen bekannte Vorkommen dar. Die genannten Funde tragen zur flechtenfloristischen Datenlage in Hessen bei.

5.3 Luftgüteuntersuchung

5.3.1 Flechtenkartierung nach VDI 3957 Blatt 13

Die Bewertung der Luftgüte erfolgt nach der Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI-RL 3957 Blatt 13, Anhang A) Die Berechnung des Luftgüteindex basiert auf Flechten-Diversitätswerten (FDW). Der FDW quantifiziert die Artenzahl und Häufigkeit der vorkommenden Flechtenarten. Er wird getrennt für Referenzarten und Eutrophierungszeiger ermittelt. Die zeitliche Entwicklung dieser Diversitätswerte gibt einen wichtigen Hinweis zur lufthygienischen Situation. Ein Anstieg der Diversität bei den Referenzarten ist als Verbesserung der Luftgüte zu werten, während ein Anstieg der Artenzahl und Häufigkeit eutrophierungstoleranter Flechtenarten zunehmende Auswirkungen luftgetragener Nährstoffverbindungen anzeigt.

Entwicklung der Luftgüteindizes (1992-2017)

Die Luftgüteindizes ergeben sich aus der Häufigkeit (Diversität) der Referenzarten und der Eutrophierungszeiger (Abb. 13).

Flechten-Dauerbeobachtung Hessen		Einfluss eutrophierender Luftverunreinigungen	
Bewertung der Luftgüte nach VDI-Richtlinie 3957, Blatt 13			
5.	sehr hohe Luftgüte	.5	sehr stark
4.	hohe Luftgüte	.4	stark
3.	mäßige Luftgüte	.3	mäßig
2.	geringe Luftgüte	.2	gering
1.	sehr geringe Luftgüte	.1	sehr gering

Abb. 13: Legende zu den folgenden Luftgütekarten

Im Mittel erreichten die Dauerbeobachtungsflächen Luftgütebewertungen von „gering“ (Klasse 2) bis „hoch“ (Klasse 4) (Abb. 14). Die ballungsraumnahen Gebiete am Flughafen und bei Biebesheim schnitten erwartungsgemäß schlechter ab als die ländlichen Gebiete in Rhön und Spessart. Im Folgenden werden die Dauerbeobachtungsflächen differenziert dargestellt.

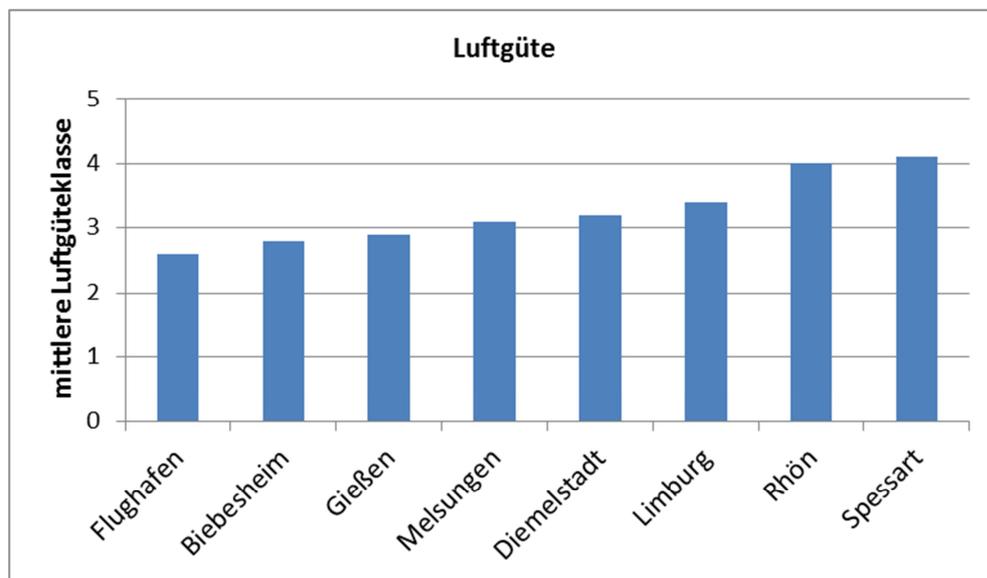


Abb. 14: Vergleich der durch Flechten angezeigten Luftgüte 2017 an den Dauerbeobachtungsflächen

Diemelstadt

In der Dauerbeobachtungsfläche (DBF) Diemelstadt, deren Luftgüte zu Beginn der Erhebungen in 1992 im Mittel als mäßig eingestuft worden war, bleibt die Flechten-Diversität der Referenzarten über Jahre hinweg relativ konstant auf einem mittleren Niveau (Abb. 15). Erst 2012 steigen Häufigkeit und Artenzahl im Raum Diemelstadt deutlich an. Die Eutrophierungszeiger starteten 1992 mit niedrigen Flechten-Diversitätswerten. Diese stiegen jedoch im Laufe der Jahre weiter an und erhöhten sich in den letzten Jahren sprunghaft. Zwischen 2007 und 2012 wirkten sich eutrophierende Luftinhaltsstoffe deutlicher auf die Diversität der Flechten aus. So werden eutrophierungstolerante Arten hier besonders gefördert. Bis zum Jahr 2017 sind die eutrophierenden Effekte noch geringfügig höher geworden.

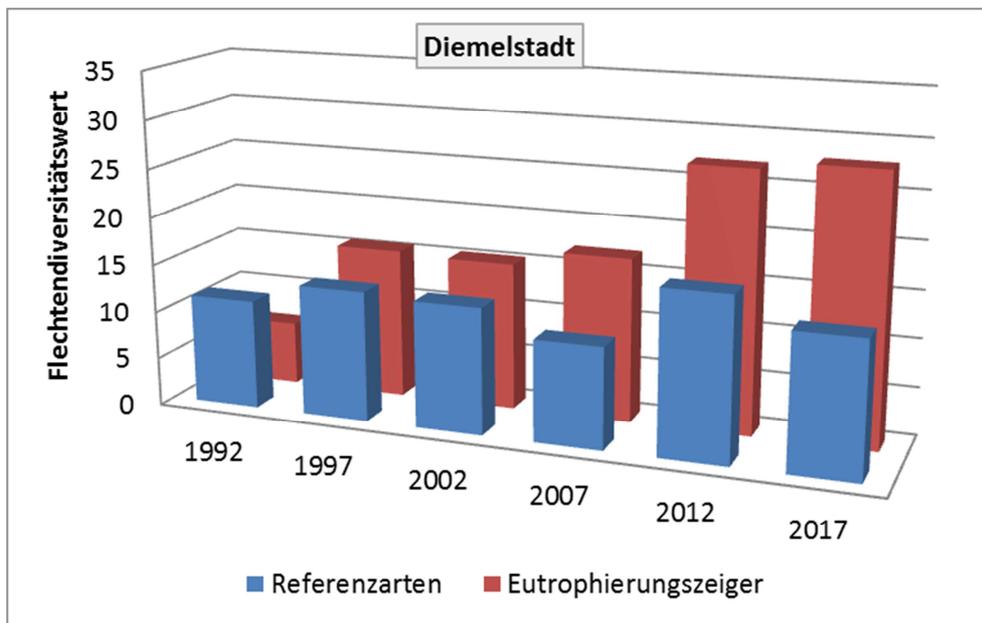


Abb. 15: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2017 an der DBF Diemelstadt

Trotz des Anstiegs der Eutrophierungszeiger, der sich negativ auf die Luftgütebewertung auswirken kann, zeigt die langfristige Entwicklung der Luftgüte an den Messflächen (Abb. 16) bis 2012 einen insgesamt positiven Trend. Waren 2007 noch zwei Messflächen einer geringen Luftgüte (orange) zugeordnet, ist diese Luftgüteklasse in 2012 nicht mehr anzutreffen. Alle Messflächen sind in 2012 gelb (mäßige Luftgüte) mit Ausnahme von zweien, die günstigere Werte (grün, hohe Luftgüte) erreichen. Ursache ist die Erholung der Bestände der Referenzarten, die eine verbesserte lufthygienische Situation im Raum Diemelstadt belegen. In den letzten fünf Jahren bis 2017 verzeichneten die Referenzarten einen Rückgang, der sich im Süden der Dauerbeobachtungsfläche Diemelstadt in einer schlechteren Bewertung von drei Messflächen (geringe Luftgüte, orange) als noch 2012 äußert.

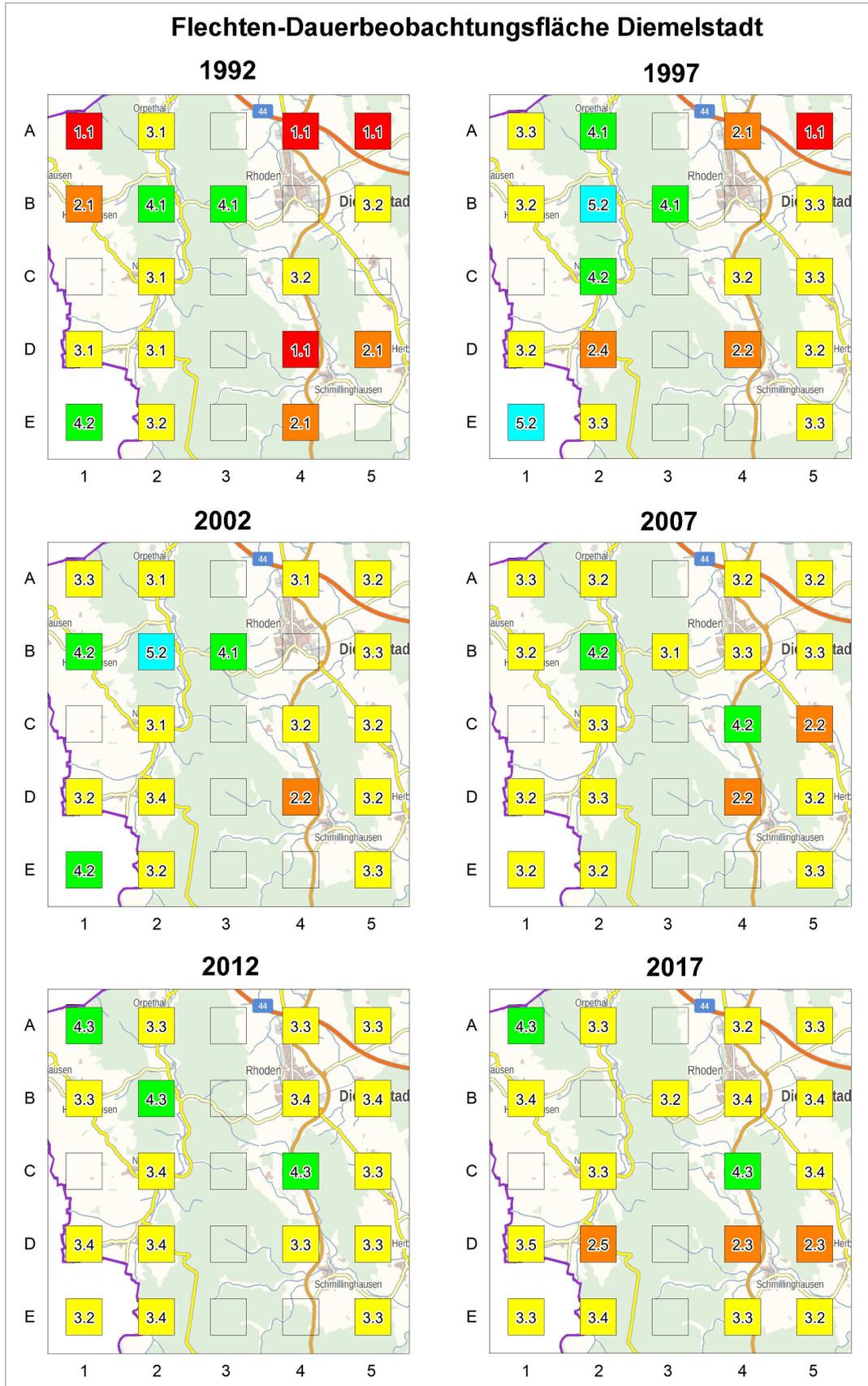


Abb. 16: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017 an der DBF Diemelstadt

Melsungen

Der Raum Melsungen, als ursprünglich am stärksten belastete DBF eingestuft, beginnt 1992 mit der geringsten Flechten-Diversität aller Dauerbeobachtungsflächen (Abb. 17). Dies trifft sowohl für die Referenzarten als auch für die Eutrophierungszeiger zu. Nach der Stilllegung der östlich gelegenen großen 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 seit 2007 übertrifft die Flechten-Diversität der Eutrophierungszeiger diejenige der Referenzarten. In den letzten fünf Jahren stagnieren die Flechten-Diversitätswerte der Referenzarten, während die der Eutrophierungszeiger deutlich weiter zugenommen hat.

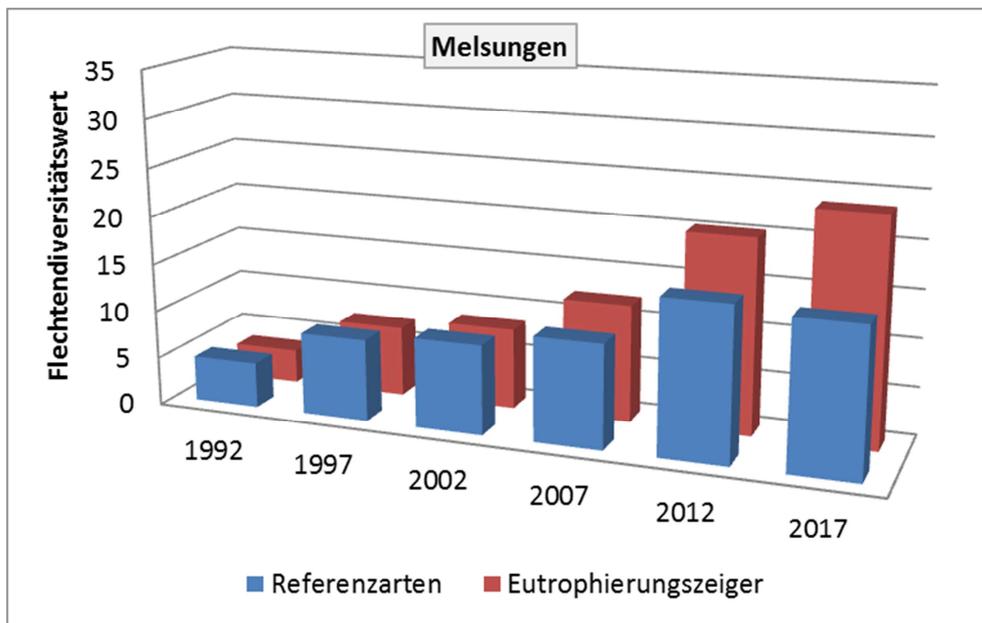
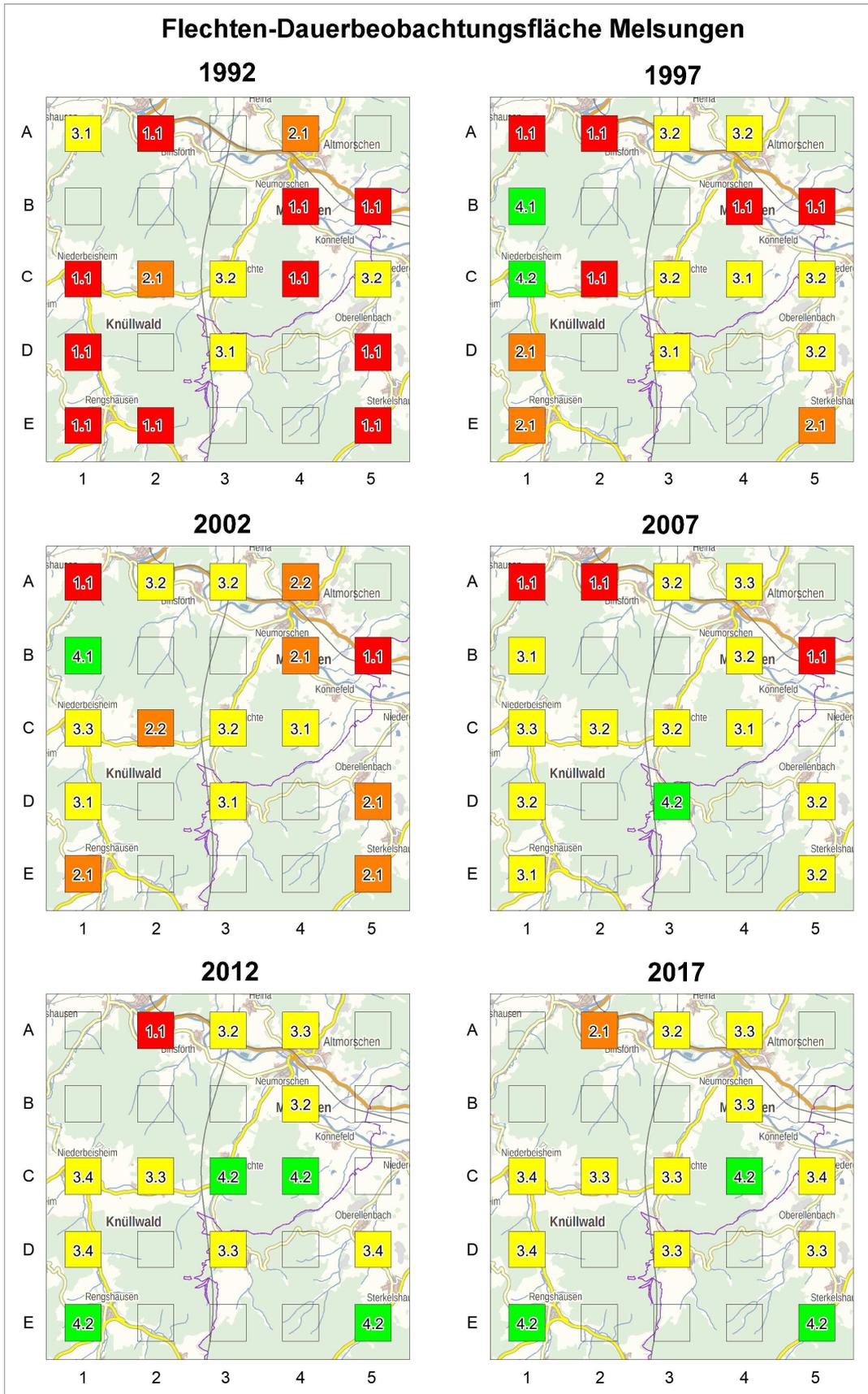


Abb. 17: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2017 an der DBF Melsungen

Die Übersichtskarte (Abb. 18) der Dauerbeobachtungsfläche belegt, dass in den vergangenen fünf Jahren an allen Messflächen gleiche oder bessere Luftgüteklassen erreicht werden. Die ungünstige Luftgüte „sehr gering“ (rot) wird aktuell nicht mehr gefunden. Der Süden der Dauerbeobachtungsfläche, der den Knüllwald betrifft, zeigt – wie auch vor fünf Jahren – eine hohe Luftgüte (grün).



Kartengrundlage TK 100: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation

Abb. 18: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017 an der DBF Melsungen

Rhön

Die DBF Rhön wies 1992 von allen Dauerbeobachtungsflächen die höchste Flechten-Diversität der Referenzarten auf (Abb. 19). Da sie 1997 nicht untersucht wurde, kann über diesen Zeitraum keine Aussage getroffen werden. In der Zeitspanne von 1992 bis 2002 ist ein deutlicher Rückgang der Referenzarten festzustellen. Von 2002 bis 2012 stagniert die Diversität der Referenzarten, um bis 2017 wieder anzusteigen. Bei den Eutrophierungszeigern hingegen ist ein steter Anstieg zu konstatieren.

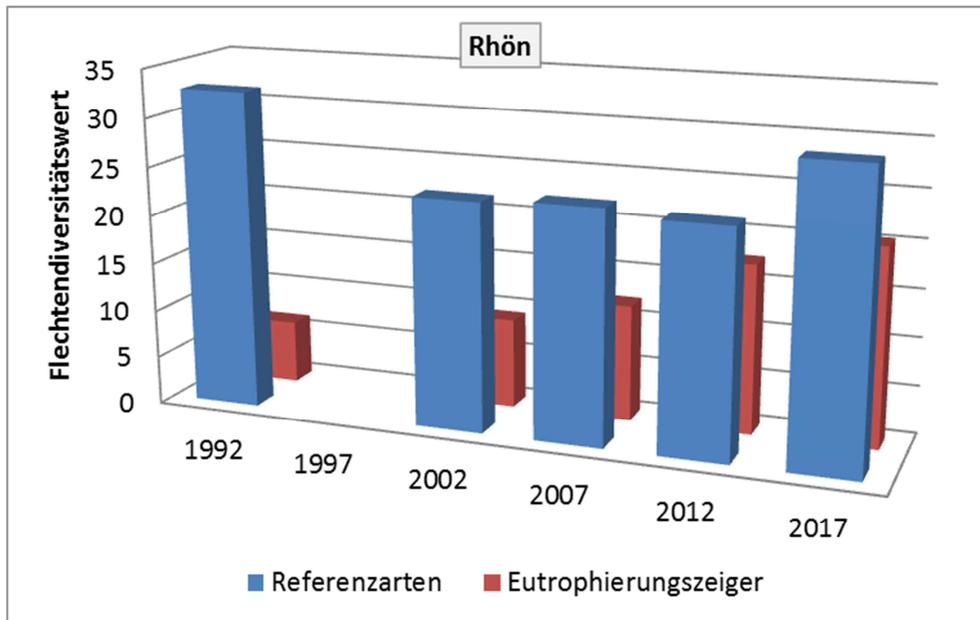
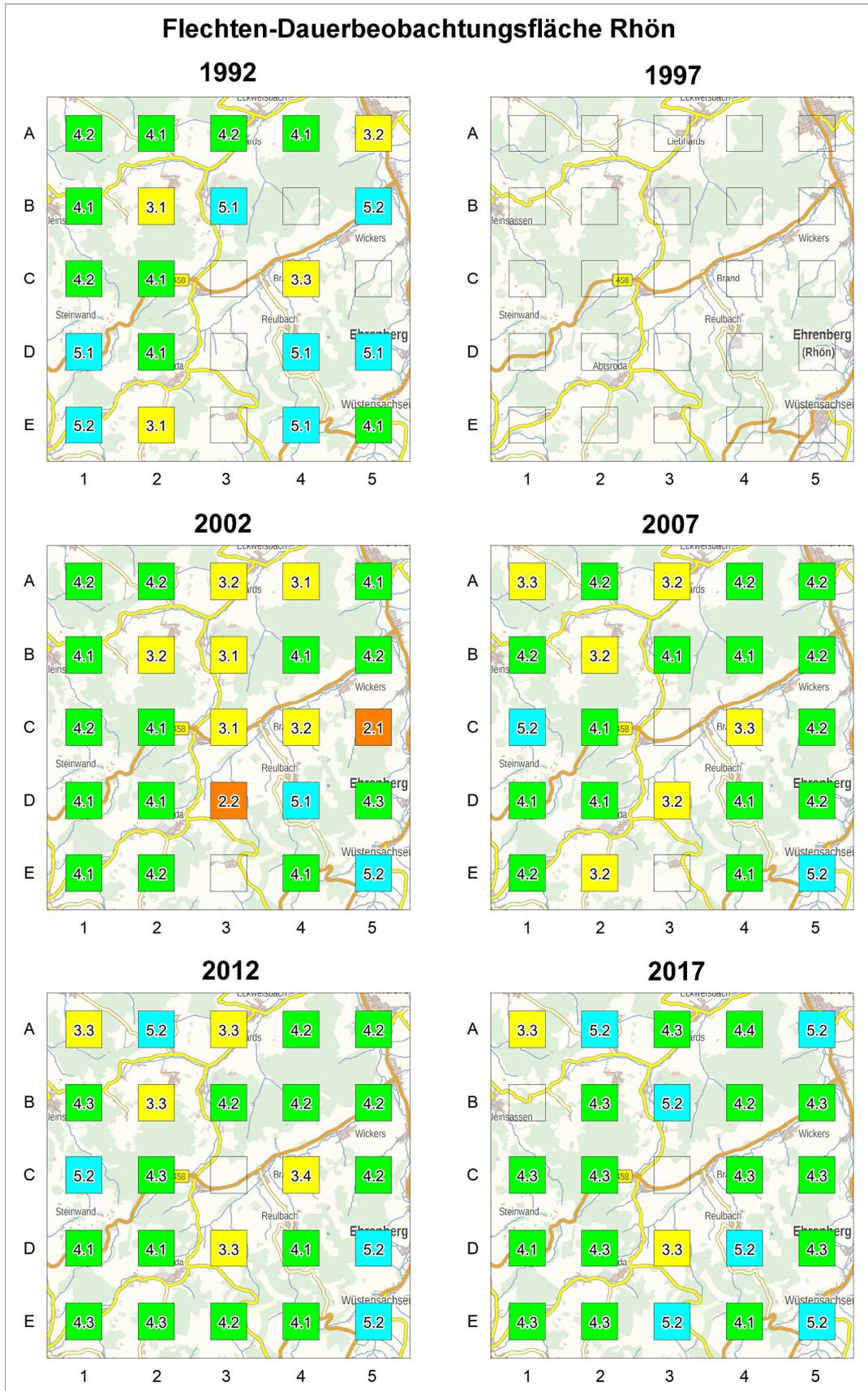


Abb. 19: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2017 an der DBF Rhön

Die Messflächenkarte (Abb. 20) der DBF Rhön zeigt, dass die ohnehin günstige lufthygienische Situation sich in den letzten fünf Jahren noch weiter verbessert hat. Statt fünf sind nur noch zwei Messflächen gelb (mäßige Luftgüte) und die Zahl der blau gekennzeichneten Messflächen hat sich von vier auf sechs erhöht. Bei einem weiteren Anstieg der Eutrophierungszeiger ist allerdings in Zukunft auch an der DBF Rhön mit einer Umkehr dieses Trends zu rechnen.



Kartengrundlage TK 100: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation

Abb. 20: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017 an der DBF Rhön

Gießen

Die Dauerbeobachtungsfläche Gießen, 1992 als hoch belastet eingestuft, verhält sich in ihrer Flechtenentwicklung ähnlich wie Melsungen (Abb. 21). Von einem geringen Anfangsniveau ausgehend, nimmt sowohl die Zahl der Referenzarten als auch die der Eutrophierungszeiger stetig zu. Im Gegensatz zu Melsungen tritt die Dominanz der Eutrophierungszeiger jedoch bereits 1997 zutage.

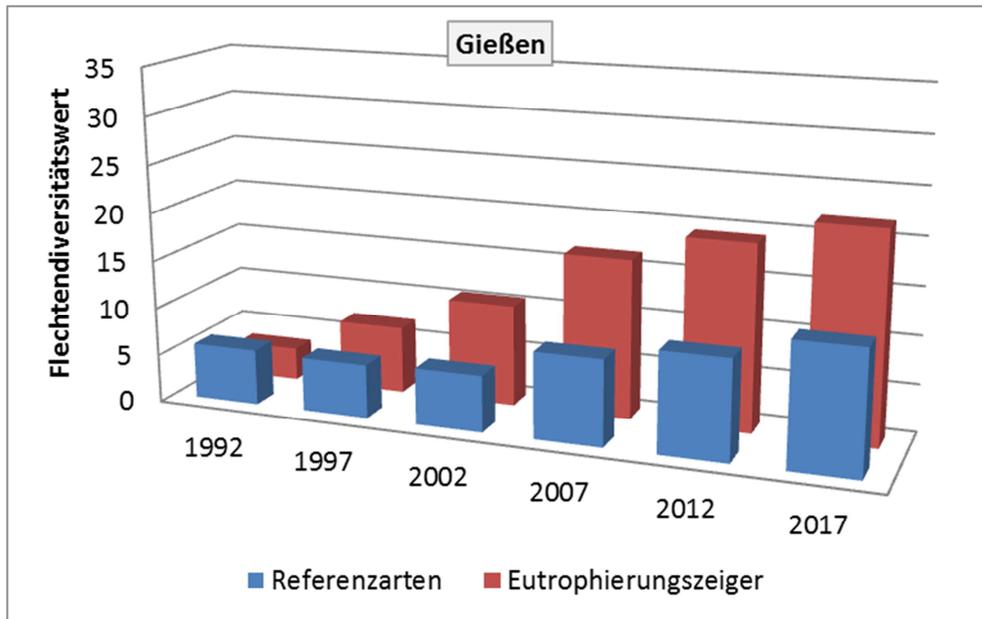
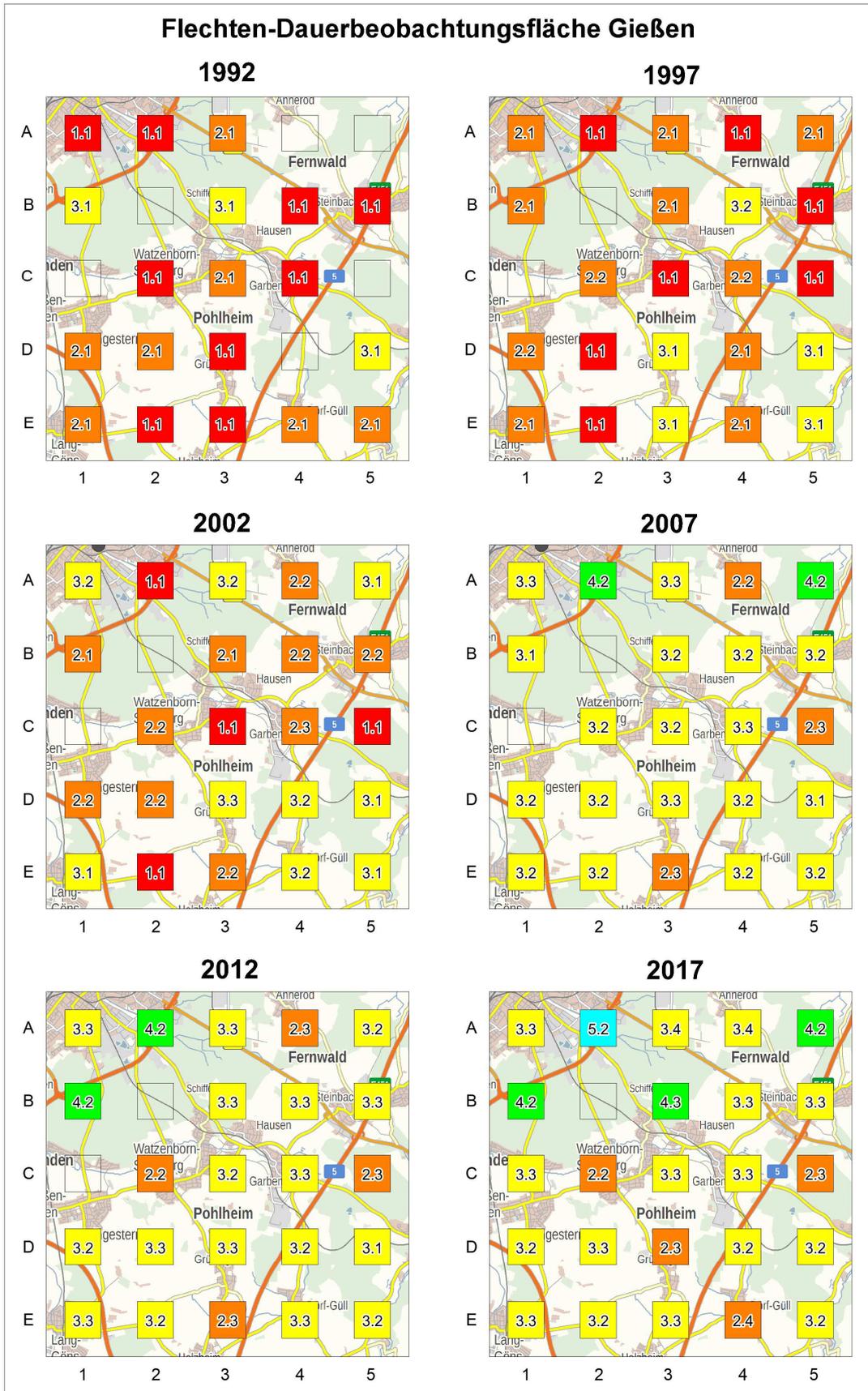


Abb. 21: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2017 an der DBF Gießen

Die Übersichtskarte (Abb. 22) der Dauerbeobachtungsfläche zeigt, dass die positive Entwicklung, die von 2002 bis 2007 eingetreten war, sich bis 2012 nicht fortgesetzt hat. Die Zahl der als orange (geringe Luftgüte) markierten Messflächen hat sich von drei auf vier vergrößert, so dass die Luftgüte sich insgesamt leicht verschlechtert hat. Im letzten Beobachtungszeitraum von 2012 bis 2017 weisen drei Messflächen schlechtere Luftgütebewertungen auf, während sich fünf Messflächen verbessert haben. Dabei haben sich die waldnahen Messflächen im Norden der Dauerbeobachtungsfläche besser entwickelt als die landwirtschaftlich geprägten südlichen gelegenen Flächen.

Die positive Entwicklung der Referenzarten ist durch eine überproportional starke Zunahme der Diversität der Eutrophierungszeiger hinsichtlich der Luftgüte abgewertet worden.



Kartengrundlage TK 100: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation

Abb. 22: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017 an der DBF Gießen

Limburg

Die zu Anfang der Untersuchungen als vergleichsweise gering belastet eingestufte Dauerbeobachtungsfläche Limburg startete mit hohen Flechten-Diversitätswerten – insbesondere der Referenzarten (Abb. 23). Die Häufigkeit dieser Arten nimmt bis 2007 ab, erholt sich in den Folgejahren aber wieder. Die Eutrophierungszeiger verzeichnen gleichzeitig einen steten Anstieg, der ungebrochen bis 2017 anhält. Seit 2007 ist die Diversität der Eutrophierungszeiger höher als die der Referenzarten.

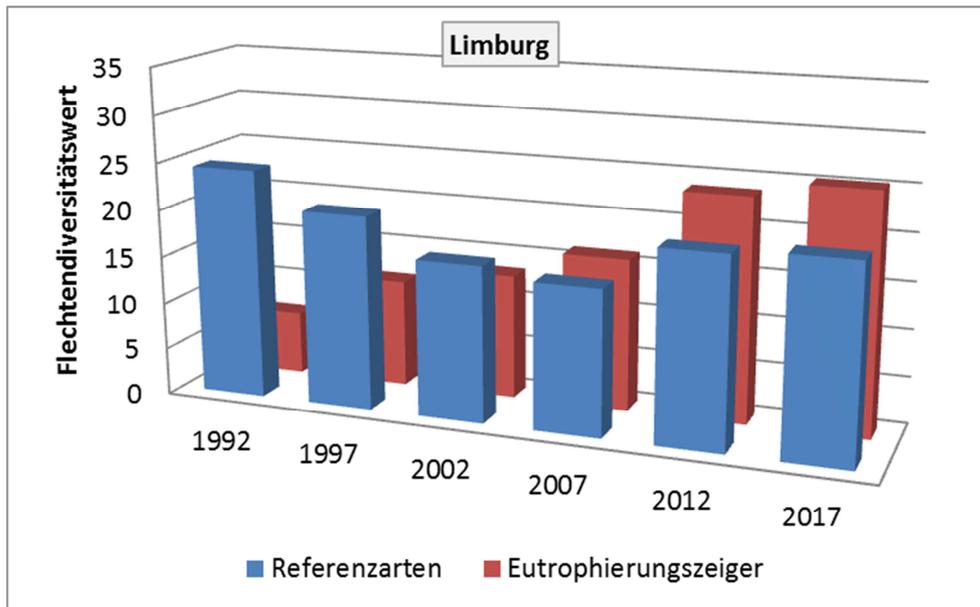
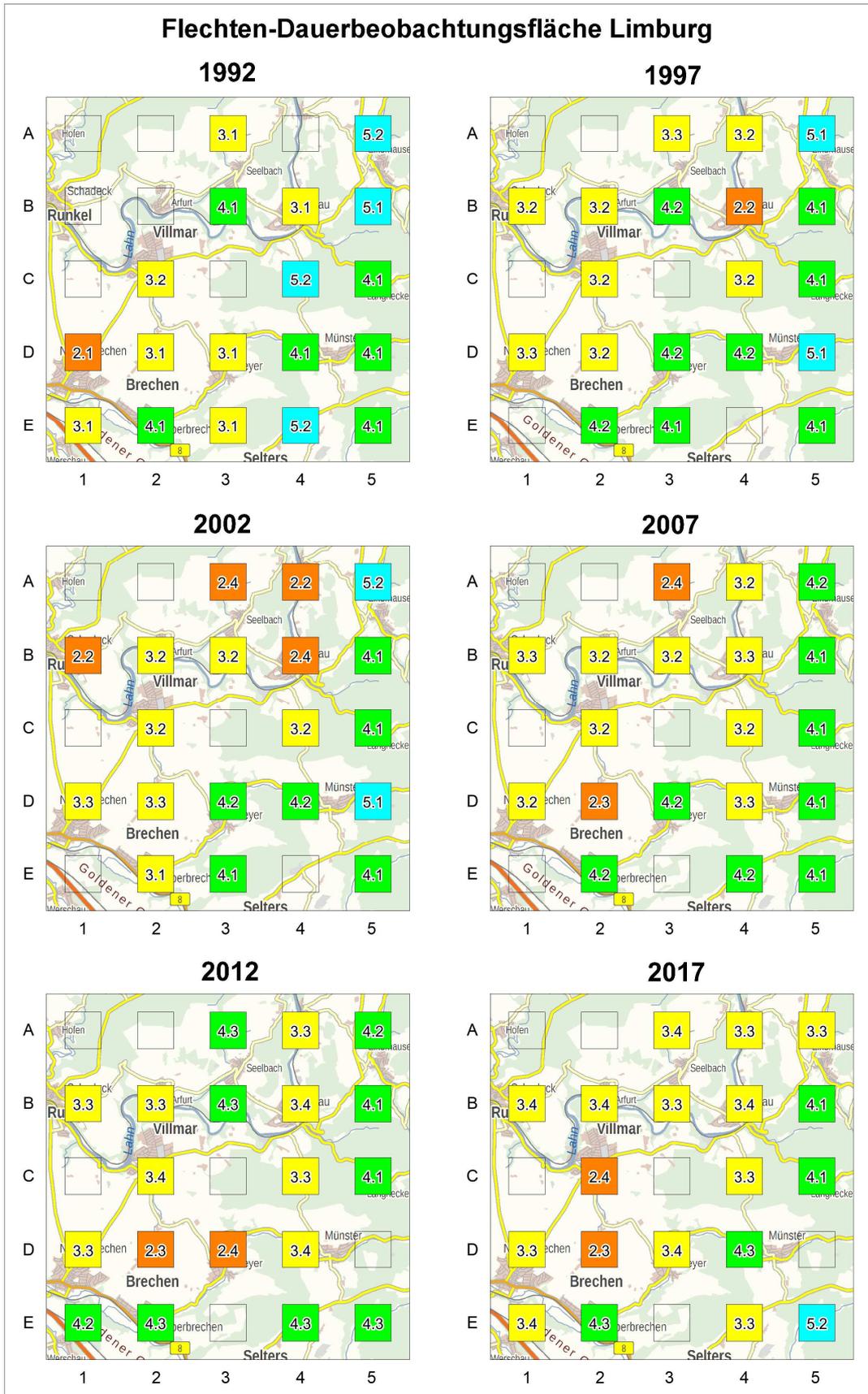


Abb. 23: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2017 an der DBF Limburg

Die Luftgütekarte (Abb. 24) der ursprünglich gering belasteten DBF Limburg zeigt im Verlauf des fünfundzwanzigjährigen Untersuchungszeitraumes eine relative Konstanz der Belastungssituation auf. Über den gesamten Untersuchungszeitraum ist keine Messfläche der Kategorie „Luftgüte sehr gering“ (rot) zuzuordnen. In der Kategorie „Luftgüte gering“ (orange) gibt es 2002 einen Anstieg auf vier Flächen, der aber von 2007 bis 2017 wieder auf zwei Messflächen zurückgeht. Im Kartierungsjahr 2017 wird erstmalig seit 15 Jahren wieder eine Messfläche mit sehr hoher Luftgüte (blau) kartiert.

Die Messfläche in Weyer (D3) hat entgegen der sonstigen Entwicklung in der DBF Limburg im Jahr 2012 deutlich schlechtere Werte erreicht (geringe Luftgüte, orange) als bei der letzten Untersuchung in 2007 (hohe Luftgüte, grün). Dies hat methodische Ursachen. Die in 2007 kartierten Apfel- und Birnbäume waren nicht mehr geeignet und mussten durch junge Spitzahorne und Eschen ersetzt werden. Letztere trugen überwiegend Eutrophierungszeiger, die möglicherweise mit den neu gepflanzten, jungen Bäumen dorthin verbracht worden waren. Bis zum Jahr 2017 hat die Situation sich normalisiert.



Kartengrundlage TK 100: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation

Abb. 24: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017 an der DBF Limburg

Spessart

Die DBF Spessart – ursprünglich ebenfalls als gering belastet eingestuft – verhält sich hinsichtlich der Häufigkeitsentwicklung beider Flechtengruppen (Abb. 25) ähnlich wie Limburg. Einer vorübergehenden Abnahme der Referenzarten in 2002 und 2007 und anschließenden Erholung der Bestände steht eine Zunahme der Eutrophierungszeiger gegenüber. Allerdings ist hier bis heute noch keine Dominanz der Eutrophierungszeiger-Diversitätswerte zu verzeichnen.

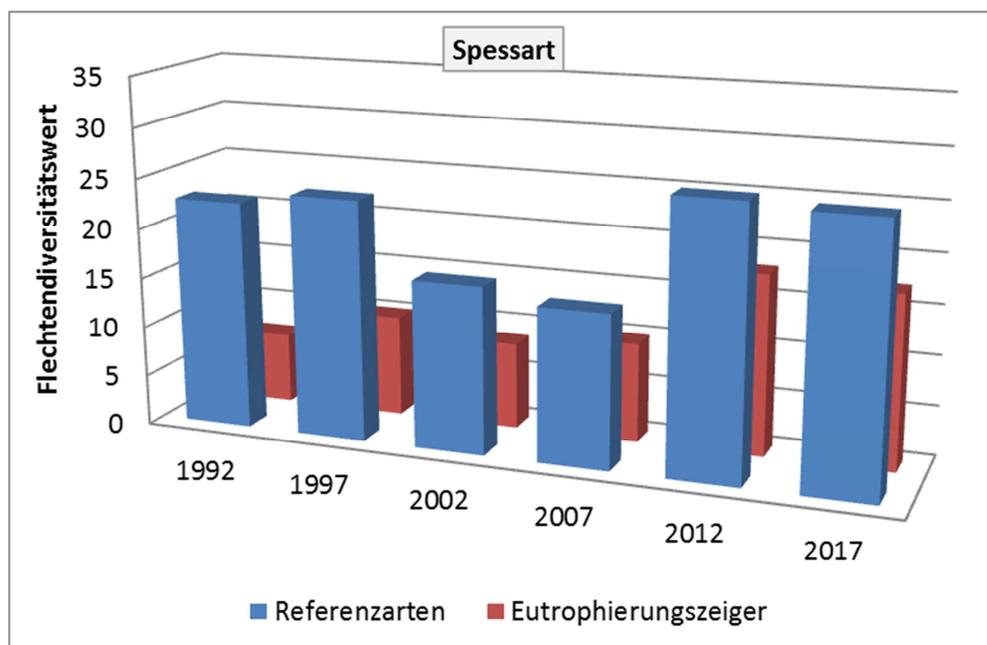
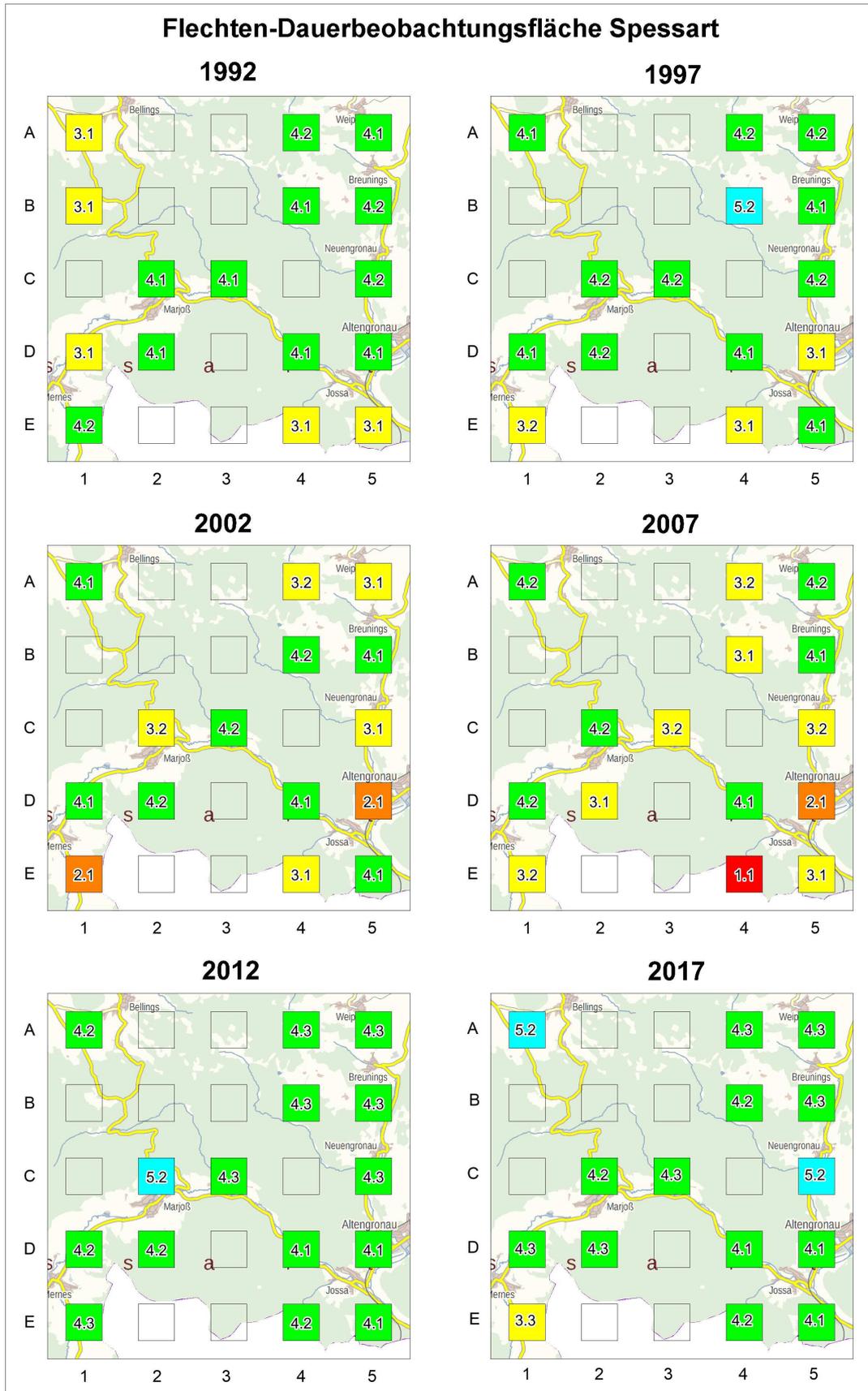


Abb. 25: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2017 an der DBF Spessart

Die Luftgütekarte der Messflächen (Abb. 26) zeigt eine Kehrtwende in den letzten fünf Jahren an. Von 1997 bis 2002 sanken die Luftgüteindizes immer weiter – allerdings bei insgesamt hohem Niveau der Werte. Im Jahr 2012 stellte sich die Situation wieder ausgesprochen gut dar. Nahezu alle Messflächen belegen eine mindestens hohe Luftgüte (grün), eine erreicht sogar mit „sehr hohe Luftgüte“ die beste Kategorie – ein Ergebnis des sprunghaften Anstiegs der Diversität der Referenzarten. In den letzten fünf Jahren sind kaum Änderungen eingetreten.

Im Südosten der Dauerbeobachtungsfläche fand von 2007 bis 2012 an zwei Messflächen eine Erhöhung des Luftgüteindex um mehr als eine Güteklasse statt. An der Messfläche nordwestlich Altengronau (D5) stieg die Luftgüte um zwei Stufen von „geringe Luftgüte“ (orange) auf „hohe Luftgüte“ (grün) an. Hier war die Bewertung 2007 methodisch bedingt möglicherweise zu niedrig ausgefallen. Der Verdacht, dass die Flächen, auf denen die Trägerbäume stehen, zeitweise beweidet wurden, bestätigte sich im Jahr 2012. Es wurden Ersatzbäume gewählt, die in 2012 eine hohe Luftgüte belegen. An der Messfläche südlich Jossa (E4) wurden 2012 dieselben Bäume wie 2007 kartiert. In den fünf Jahren bis 2012 kamen im Messgitter der neun untersuchten Apfelbäume sieben Flechtenarten durch Neubesiedelung hinzu und erhöhten folglich den Luftgüteindex.



Kartengrundlage TK 100: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation

Abb. 26: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017 an der DBF Spessart

Biebesheim

In der DBF **Biebesheim** verläuft die Entwicklung (Abb. 27) – beginnend mit einem sehr niedrigen Ausgangsniveau – ähnlich wie in den beiden anderen als ursprünglich hoch belasteten Dauerbeobachtungsflächen Melsungen und Gießen. Die Häufigkeit der Referenzarten nimmt zunächst zu; von 2002 bis 2007 ist hier allerdings ein leichter Rückgang zu verzeichnen. In den Untersuchungen in 2012 und 2017 ist die Flechten-Diversität der Referenzarten wieder angestiegen. Die Häufigkeit der Eutrophierungszeiger nimmt bis heute deutlich zu; der rasante Anstieg von 2007 bis 2012 hat sich in den Folgejahren bis 2017 verlangsamt.

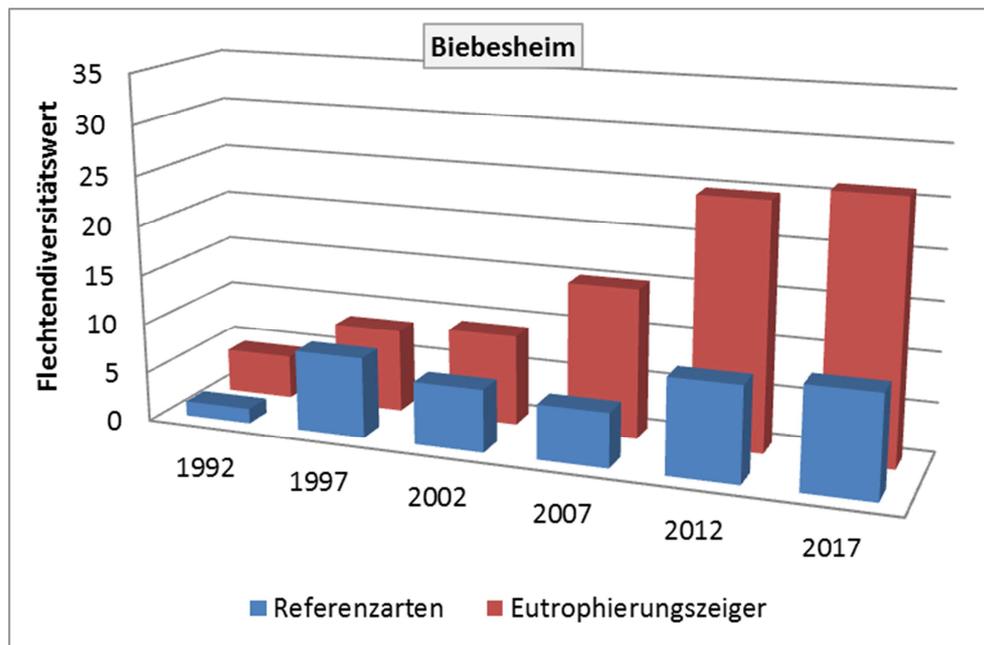
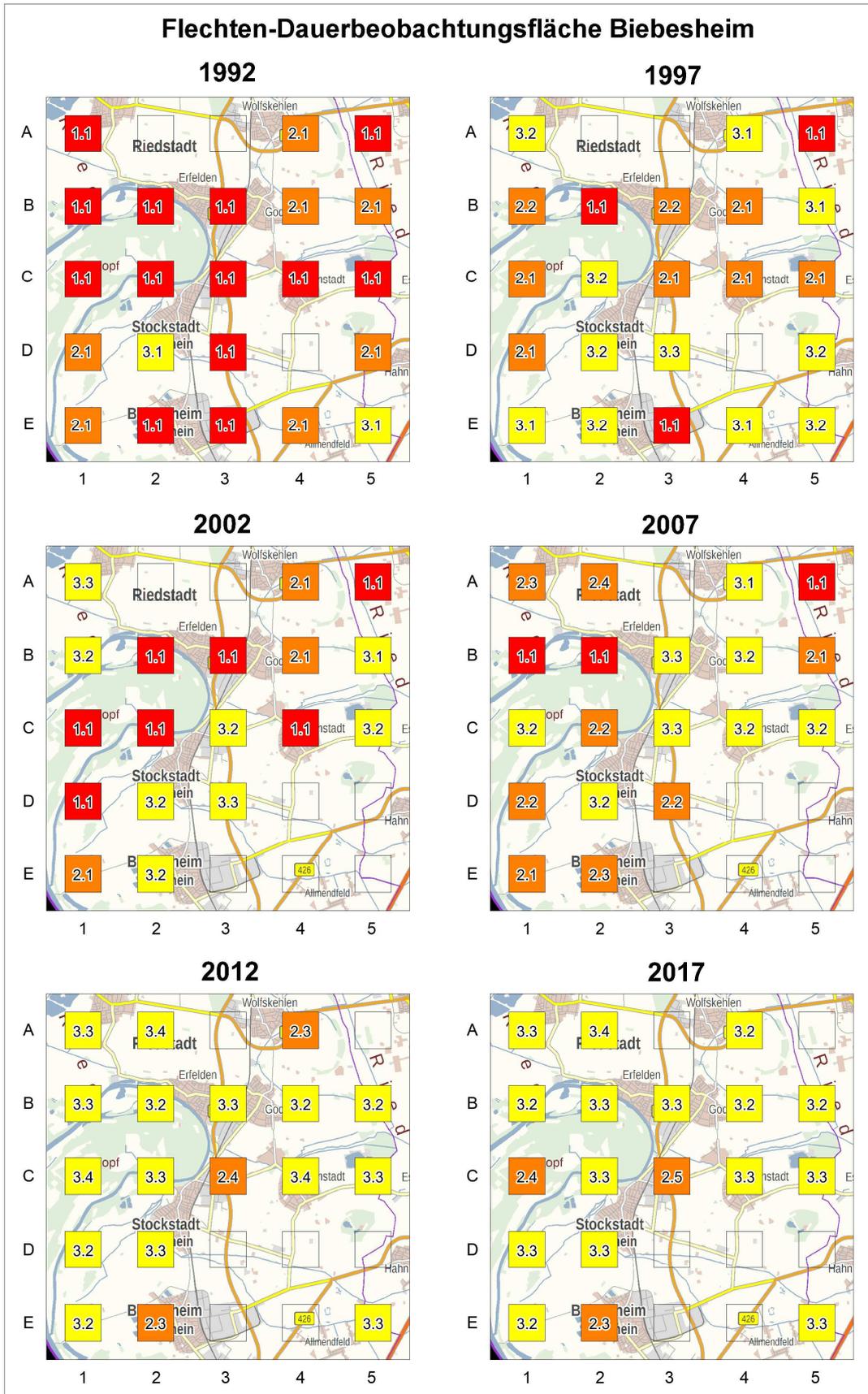


Abb. 27: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2017 an der DBF Biebesheim

Nach der Luftgütekarte der Messflächen (Abb. 28) war der Raum Biebesheim zu Beginn der Erhebungen als stark belastet eingestuft worden. Im Vergleich zu den DBF Melsungen und Gießen verbesserte sich die Situation nur sehr langsam. Erst 2012 konnte eine deutliche Erhöhung der Luftgüteindizes verzeichnet werden. In den vergangenen fünf Jahren ist keine weitere Verbesserung eingetreten. Noch immer werden drei Messflächen mit „geringer Luftgüte“ (orange) bewertet worden.



Kartengrundlage TK 100: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation

Abb. 28: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017 an der DBF Biebesheim

Flughafen

Die Zusatzuntersuchungsfläche Flughafen wird seit 2007 regelmäßig untersucht. Bei Betrachtung der lückenhaften Daten liegt der Schluss nahe, dass der Flughafen eine ähnliche Entwicklung wie Melsungen und Gießen zeigt. Sowohl die Flechten-Diversitätswerte der Referenzarten als auch die der Eutrophierungszeiger sind stetig angewachsen, wobei die Eutrophierungszeiger einen Vorsprung zeigen.

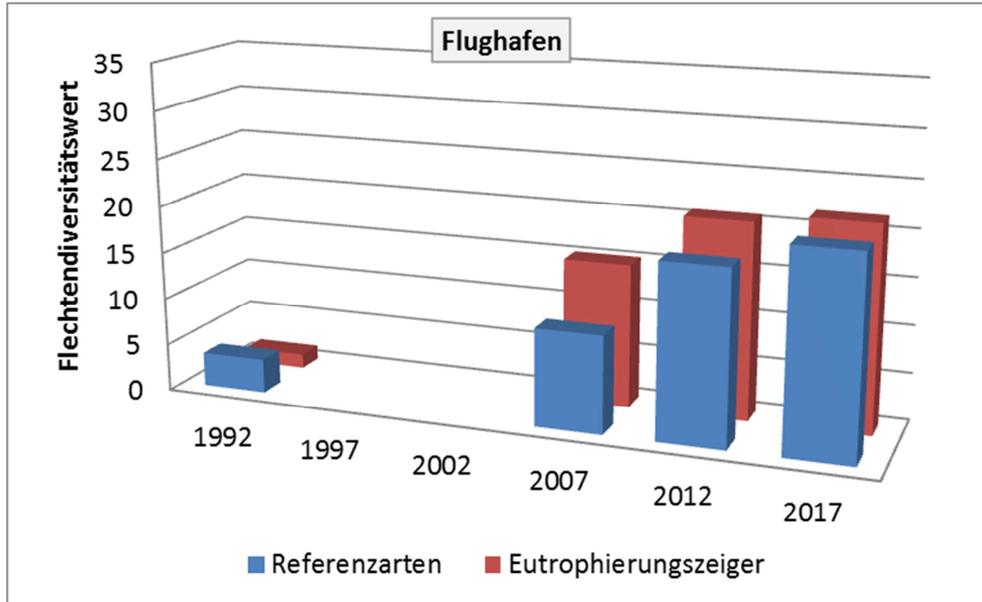


Abb. 29: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2017 an der DBF Flughafen (1997, 2002: keine Daten)

Die zeitliche Entwicklung der Luftgüte an den Messflächen im Umfeld des Frankfurter Flughafens zeigt Abb. 30. Der zeitliche Sprung von 1992 bis 2007 hängt damit zusammen, dass die Dauerbeobachtungsfläche Flughafen 1997 und 2002 noch nicht in das Messprogramm eingebunden war. Die räumlichen Lücken auf der Karte sind damit zu erklären, dass das Betriebsgelände des Frankfurter Flughafens und die Waldgebiete methodisch bedingt nicht kartiert werden konnten. Es befinden sich dort keine freistehenden Bäume, die die Anforderungen an Trägerbäume erfüllen.

Es lässt sich deutlich erkennen, dass sowohl von 1992 bis 2007, als auch in den letzten fünf Jahren jeweils eine deutliche Verbesserung der Luftgüte stattgefunden hat. In der ersten Untersuchung im Jahr 1992 gehörten 75 % der damals untersuchten 20 Messstellen der schlechtesten Kategorie an (rot, sehr geringe Luftgüte). 15 % der Messstellen besaßen eine geringe Luftgüte und nur 10 % im Süden der Untersuchungsfläche hatten eine mittlere Luftgüte. Bis 2007 haben sich die Verhältnisse grundlegend gewandelt. Es ergab sich ein deutlich günstigeres Bild – eine Entwicklung, die sich bis heute fortgesetzt hat. So können aktuell elf Messflächen mit „hohe Luftgüte“ (grün) bewertet werden und die Messfläche G7 nördlich Egelsbach zeigt 2017 erstmalig eine sehr hohe Luftgüte (blau).

Flechten-
Dauerbeobachtungsfläche
Flughafen

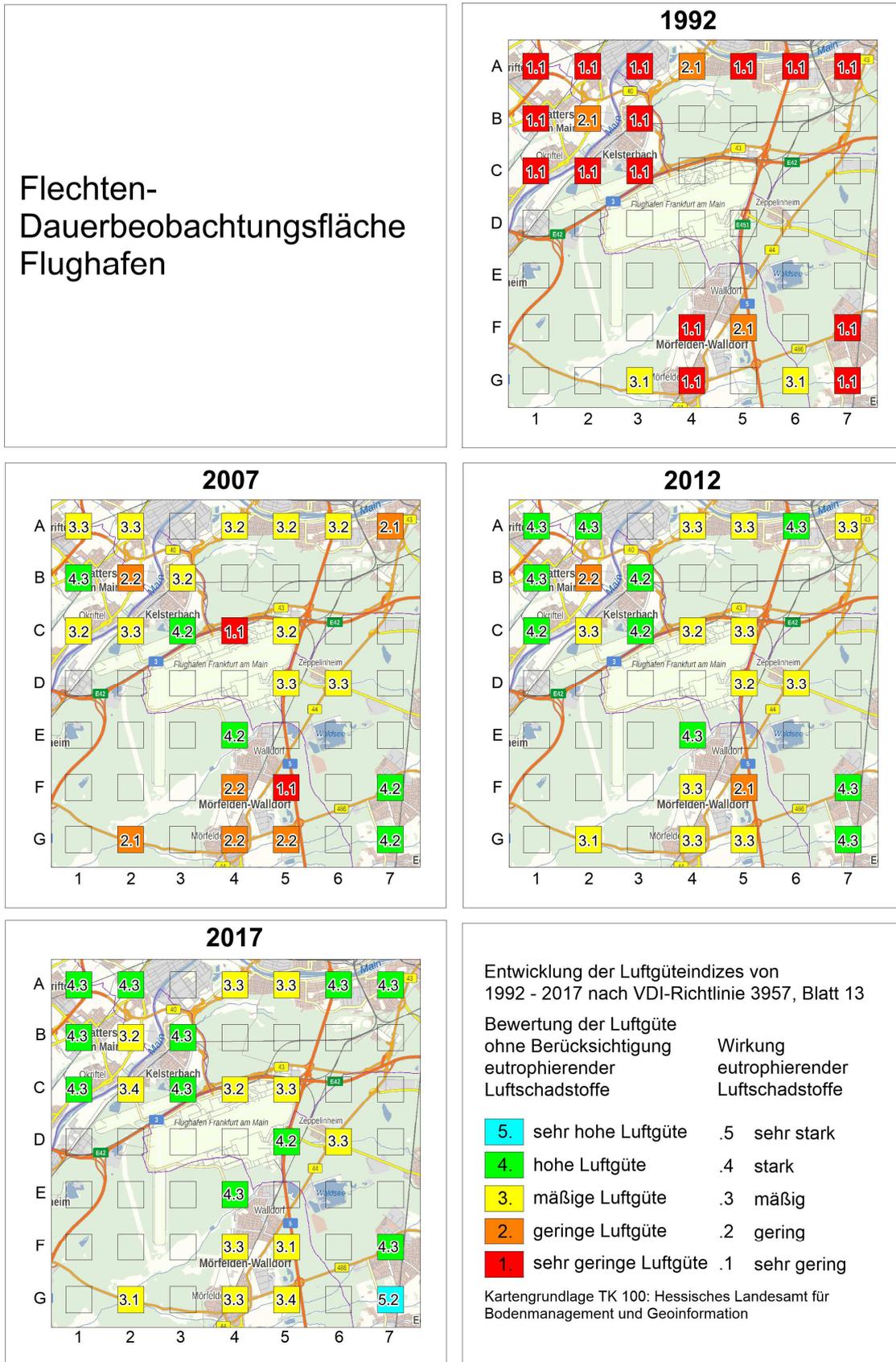


Abb. 30: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017 an der Untersuchungsfläche Flughafen

Für keines der Untersuchungsjahre im Zeitraum 1992 bis 2017 lässt sich eine räumliche Verteilung der Flechten-Indizes nachweisen, die einen Bezug zum Flughafen erlaubt. Dies lässt jedoch nicht den Schluss zu, dass keine lufthygienischen Belastungen vorliegen. Die Aussagekraft der Flechtenkartierung liegt auf der allgemeinen Luftgüte mit Schwerpunkt auf den säurebildenden und eutrophierenden Luftschadstoffkomponenten. Im Umfeld des Flughafens bieten sich zusätzliche Untersuchungen zur Akkumulation von Schwermetallen und organischen Schadstoffe in Bioindikatoren an. Für diese stehen andere Methoden des Biomonitorings zur Verfügung wie die Weidelgras- oder Grünkohlexposition sowie die *Sphagnum*-bag-technique (VDI 3957 BLATT 2, 3 und 17). Das Thema wird weiter ausgeführt im Bericht zur Flechtenkartierung am Flughafen Frankfurt (WINDISCH et al. 2018).

Zusammenfassung der lufthygienischen Entwicklung

Zusammenfassend für alle Dauerbeobachtungsflächen in Hessen ist zu sagen, dass die durch die Flechten angezeigte lufthygienische Situation in den letzten fünf Jahren nicht in dem Maße verbessert hat wie noch im Fünfjahreszeitraum davor.

In den Dauerbeobachtungsflächen (DBF) Gießen, Rhön, Limburg und Flughafen werden aktuell höhere Luftgütewerte erreicht als 2012. In den DBF Melsungen und Biebesheim ist die Luftgütebewertung nahezu gleich geblieben, in den DBF Diemelstadt und Spessart hat sie sich sogar etwas verschlechtert.

Da der Luftgüteindex, neben eutrophierenden, insbesondere auch die Wirkungen der sauren Luftverunreinigungen widerspiegelt, wäre eine positivere Entwicklung zu erwarten gewesen, denn die Konzentrationen der säurebildenden Immissionen sind in Hessen weiter rückläufig (HLNUG 2017). Die säurebildenden Immissionen in Hessen sind inzwischen so gering, dass sie die Flechtenvitalität aktuell kaum beeinträchtigen. So haben augenscheinlich andere Schadstoffgruppen, wie etwa die der eutrophierenden Luftverunreinigungen, einen negativen Einfluss auf den Luftgüteindex.

Betrachtet man die Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte (FDW) aller Dauerbeobachtungsflächen, so sind die Werte für Referenzarten auf gleichem Niveau geblieben, während die Werte für Arten, die durch einen übermäßigen Nährstoffeintrag gefördert werden, noch weiter zugenommen haben. Im landesweiten Mittel erreichen Eutrophierungszeiger seit 2007 höhere FDW als Referenzarten. In den letzten zehn Jahren hat sich die Dominanz der Eutrophierungszeiger gegenüber der Referenzarten noch weiter verstärkt (Abb. 31).

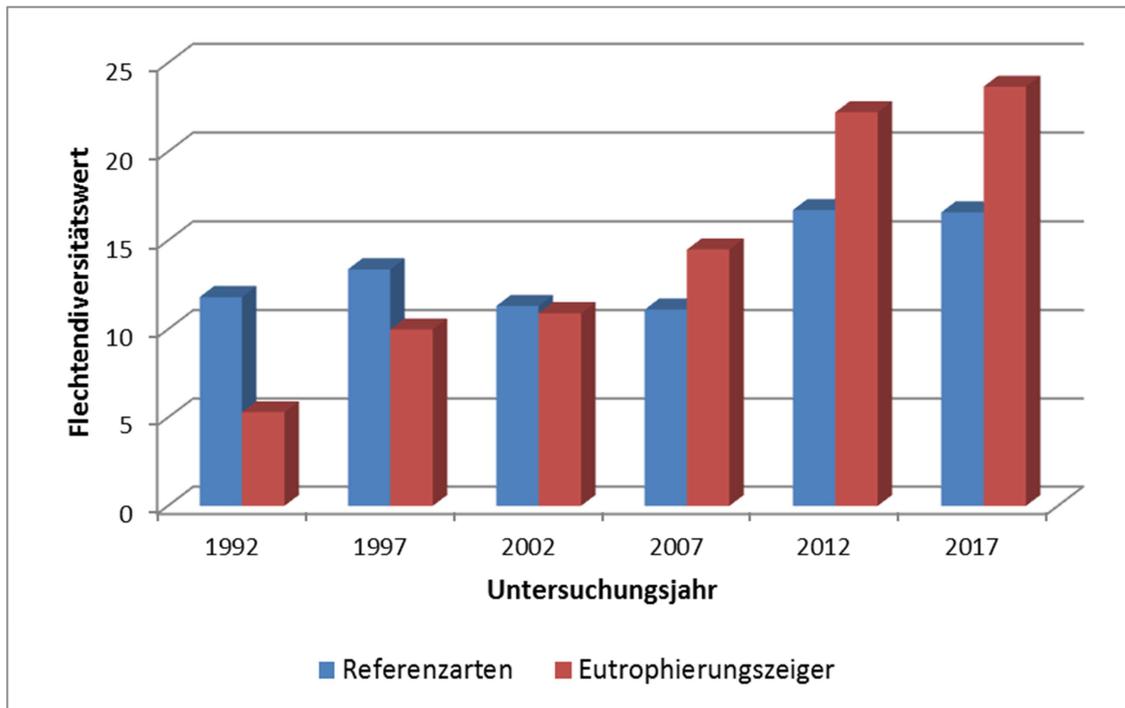


Abb. 31: Zeitlicher Verlauf der Flechten-Diversitätswerte (FDW) der Referenzarten und Eutrophierungszeiger für alle DBF (ohne Rhön und Flughafen, da diese nicht durchgehend untersucht worden waren)

So ist festzuhalten, dass die weiter zunehmenden Wirkungen eutrophierender Immissionen offenbar einer Verbesserung der lufthygienischen Situation entgegenstehen. Der günstige Trend in der Entwicklung des Luftgüteindex, der seit 1992 dokumentiert ist, hat sich abgeschwächt.

Wirkungen eutrophierender Luftverunreinigungen

Zunächst einmal sollen eutrophierende Wirkungen auf die Umwelt im Allgemeinen betrachtet werden (vgl. Abb. 32). Sie sind aus folgenden Gründen kritisch zu bewerten: Nitrophytische Arten dringen in ursprünglich nährstoffarme Ökosysteme ein und verdrängen dort solche Pflanzen, die nährstoffarme Standorte mit geringer Konkurrenz bevorzugen; eine Verringerung der Diversität innerhalb der Lebensgemeinschaften ist die Folge (BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT 2005). 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 Wirkungen ausüben (z.B. NO_x und SO_2), so gilt doch Ammoniak als ein Hauptverursacher der Bodenversauerung (Beitrag ca. 40 %). Eine Erniedrigung des pH-Wertes im Boden erhöht die Bioverfügbarkeit von Nährstoffen und toxischen Metallkomplexen (Ionenaustausch), was wiederum die Eutrophierung ansteigen lässt und gleichzeitig – bei hohen Konzentrationen – zu toxischen Erscheinungen führen kann (LFU 2004). Im humiden mitteleuropäischen Klima wird ein Teil der infolge der Versauerung mobilisierten Ionen ausgewaschen und dem Grundwasser zugeführt – und somit dem Pflanzenwachstum entzogen. Andererseits führt eine erhöhte Stickstoffzufuhr bei Pflanzen zu

übermäßigem Wachstum und – damit einhergehend – zu verminderter Trocken- und Frostresistenz sowie zu geringeren Abwehrkräften gegenüber Schaderregern.

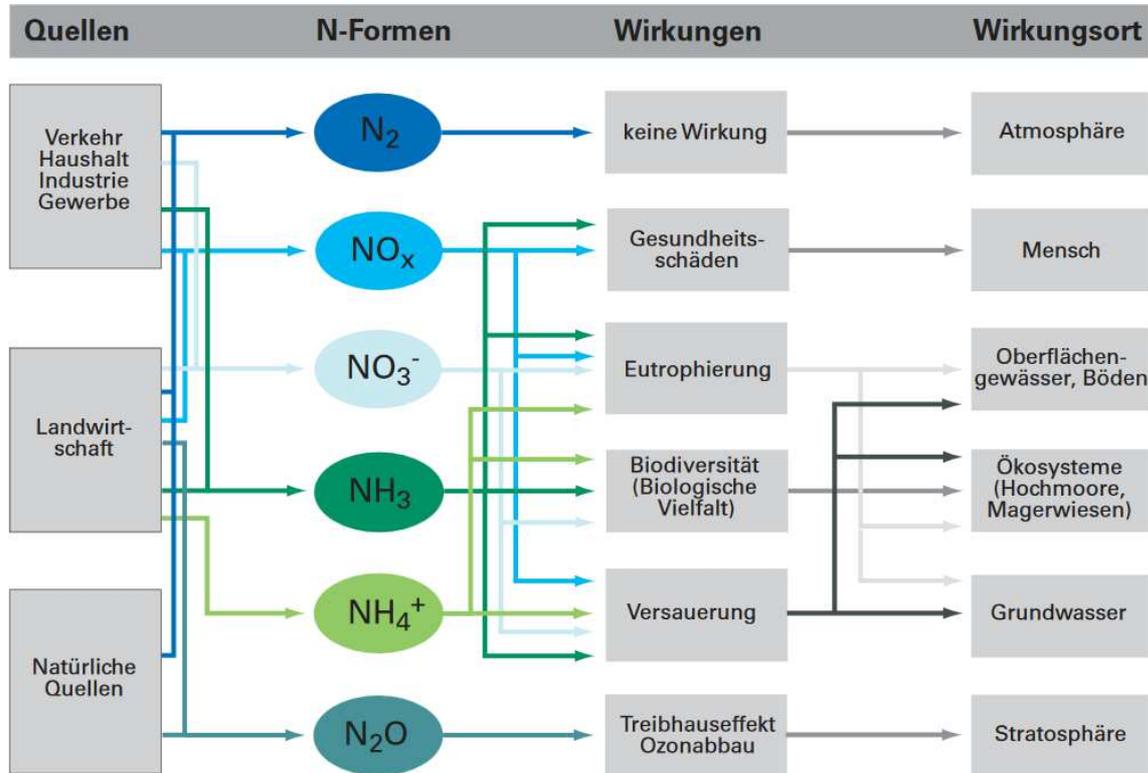


Abb. 32: Stickstoffverbindungen, Vorkommen und Wirkungen (LUBW 2008)

Von Flechten (und Pflanzen) werden nicht alle chemischen Verbindungen in gleichem Maße als Nährstoffe genutzt. Neben diversen Nährstoffverbindungen (wie die des Magnesiums, Phosphors und Kalium) sind dies insbesondere die reaktiven Stickstoffverbindungen. Nährstoffe können in der Atmosphäre gasförmig, gelöst oder an Partikel gebunden sein. Die Stickstoffoxide NO und NO_2^- sind von Flechten nicht unmittelbar nutzbar, können jedoch durch Umwandlungsprozesse in der Atmosphäre zu pflanzenverfügbarem Nitrat (NO_3^-) oxidiert werden. Flechten nutzen als Stickstoffquellen vor allem Nitrat (NO_3^-) und Ammoniak/Ammonium (NH_3/NH_4) (VAN DOBBEN 1996; VAN DOBBEN & DE BAKKER 1996; VAN HERK 1999; FRANZEN-REUTER 2004; HAUCK 2011).

In den kontinuierlichen Messprogrammen des HLNUG werden Stickstoffoxide (die nicht unmittelbar düngend wirken) erfasst. Die NO_x -Konzentrationen ändern sich über lange Zeit nicht wesentlich; an einem Teil der Messstationen lässt sich ein abnehmender Trend beobachten (HLNUG 2018). Diese Werte alleine sind somit kaum geeignet, Eutrophierungswirkungen auf Flechten zu erklären.

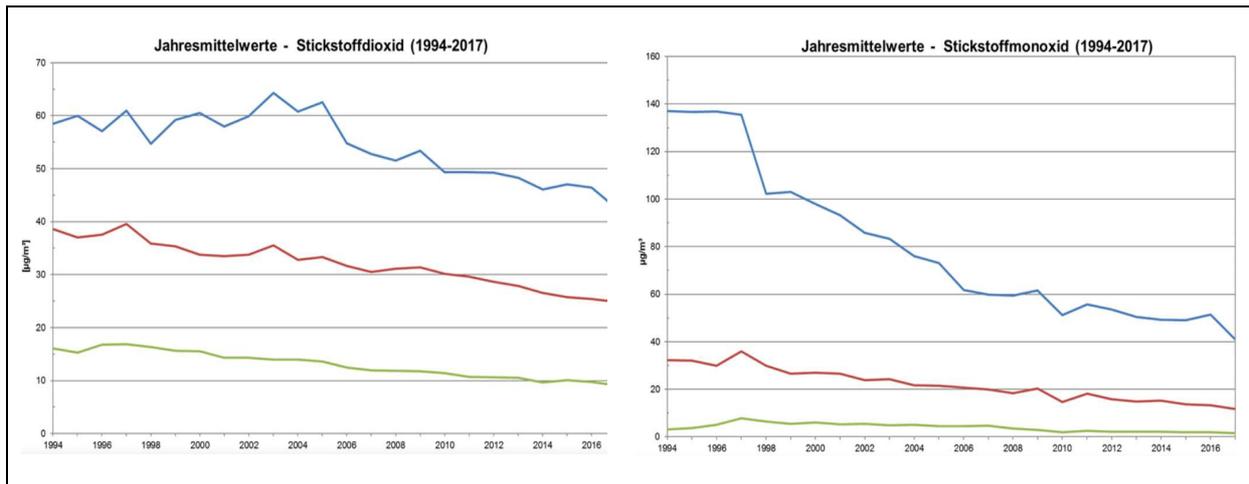


Abb. 33: Zeitlicher Verlauf der Stickstoffoxid-Konzentrationen an Luftmessstationen in verschiedenen hessischen Regionen; **blau**: an Verkehrsschwerpunkten, **rot**: in Städten, **grün**: im ländlichen Raum (HLNUG 2018)

Eine bedeutende Rolle für die Nährstoffversorgung stellen Ammoniakemissionen dar. Sie werden aber wegen messtechnischer Probleme nur in geringem Umfang erfasst. Die in Mitteleuropa durch Ammoniak emittierte Menge an Stickstoff liegt etwa in der gleichen Größenordnung wie die Gesamtemission von NO und NO₂ (LFU 2004). Ammoniak entstammt hauptsächlich landwirtschaftlichen Quellen (Tierhaltung; Gülleausbringung). Es wird innerhalb weniger Stunden zu Ammonium oder Ammoniumsalzen abgebaut. Deshalb werden nur in unmittelbarer Nähe von Quellen erhöhte Ammoniakkonzentrationen gemessen. Die Abbauprodukte (Ammonium bzw. Ammoniumsalze) können dagegen als Aerosole über weite Strecken verfrachtet werden. So muss davon ausgegangen werden, dass diese Verbindungen flächendeckend vorhanden sind (LFU 2004).

Während man bisher angenommen hat, dass die NH₃-Emission aus Autoabgasen eher unbedeutend ist, gehen neuere Untersuchungen von beträchtlichen Ammoniakkonzentrationen aus den Abgasen belegter, kalter oder gealterter Katalysatoren aus (FRAHM 2006, LUBW 2008; BARTHOLMEß et al. 2011). Nach Angaben des UMWELTBUNDESAMTES (2004) emittieren die benzinbetriebenen Kraftfahrzeuge je nach Katalysatortyp und Verkehrsfluss zwischen 20 und 50 mg Ammoniak je Kilometer.

Seit einigen Jahren gibt es auch einen messtechnischen Hinweis auf den Anstieg der Ammoniakkonzentration in Hessen. Wie DÄMMGEN et al. (2012/2013) nachweisen konnten, steigen die NH₃-Werte seit 2000 an verschiedenen Messstationen Deutschlands (darunter auch in Hessen) an (Abb. 34).

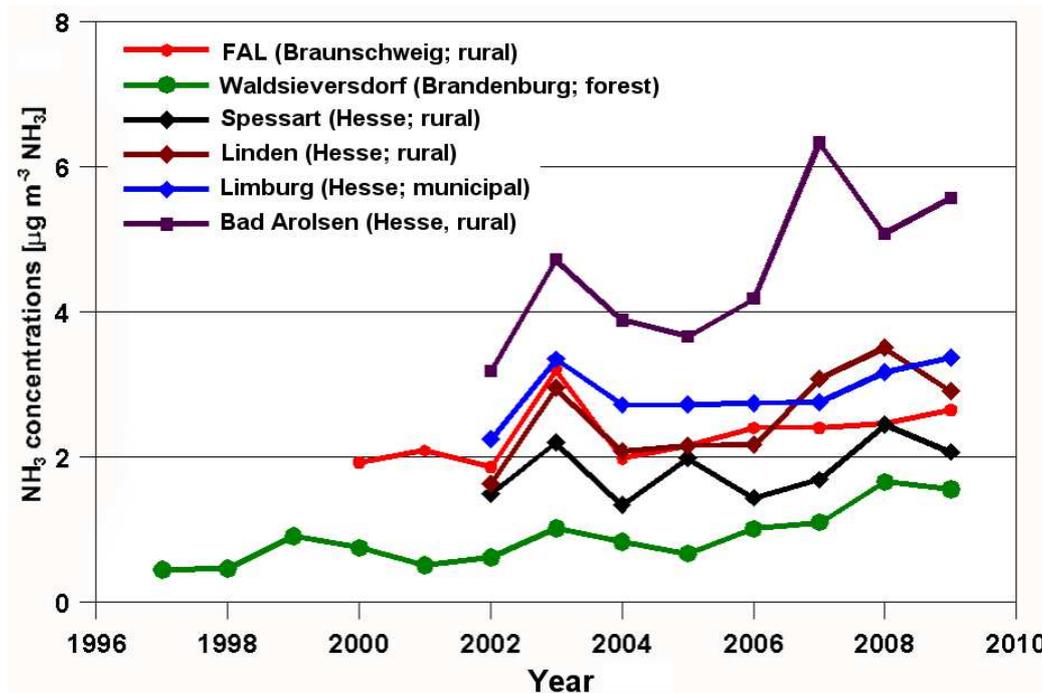


Abb. 34: Entwicklung der Ammoniakkonzentrationen in verschiedenen Gebieten Deutschlands (Dämmgen et al. 2012/2013)

Ammoniak hat eine nur kurze Verweilzeit in der Atmosphäre. Eine eutrophierende Wirkung auf Pflanzen tritt daher nur in der unmittelbaren Umgebung der Emissionsquelle auf. Nach dem Ammoniak-Abbau sind es die Folgeprodukte wie Ammonium, die als Nährstoffe wirken.

Hinlänglich bekannt ist der Verkehrssektor als Emissionsquelle für Stickstoffoxide. Diese reagieren in der Atmosphäre weiter zu Folgesubstanzen wie Nitrat und Ammonium, welche so für Pflanzen und auch für Flechten als Nährstoffe dienen. Düngende Verbindungen können an Partikel gebunden und in der Atmosphäre über weite Strecken verfrachtet werden (LFU 2004). So sind die Effekte von Stickstoffoxidemissionen nicht in unmittelbarer Nähe des Emittenten durch eine Wirkung zu belegen, sondern tragen großräumig zur Eutrophierung bei.

Um Anhaltspunkte für räumliche Unterschiede des Nährstoffeintrags in Hessen zu erhalten, wurden aus Modellen entwickelte Daten des Umweltbundesamtes zur Gesamtd deposition reaktiven Stickstoffs herangezogen (UBA 2018). Die Daten stammen aus dem Projekt „Modellierung und Kartierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystemspezifischen Gefährdung von Biodiversität in Deutschland“. Sie basieren unter anderem auf Emissions- und Luftkonzentrationsmessungen und berücksichtigen meteorologische Daten. Das Projekt nutzt einen interaktiven Kartendienst, dem Dreijahresmittelwerte der Jahre 2013, 2014 und 2015 entnommen. Gewählt wurde die Landnutzungsklasse „Wiesen und Weiden“, da sie dem Offenland nahe kommt, in dem die Flechtenträgerbäume kartiert worden waren. Die N-Depositionswerte für die Flechten-Dauerbeobachtungsflächen liegen demnach zwischen $9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (DBF Gießen, Limburg und Biebesheim) und $13 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (DBF Diemelstadt) (UBA 2018).

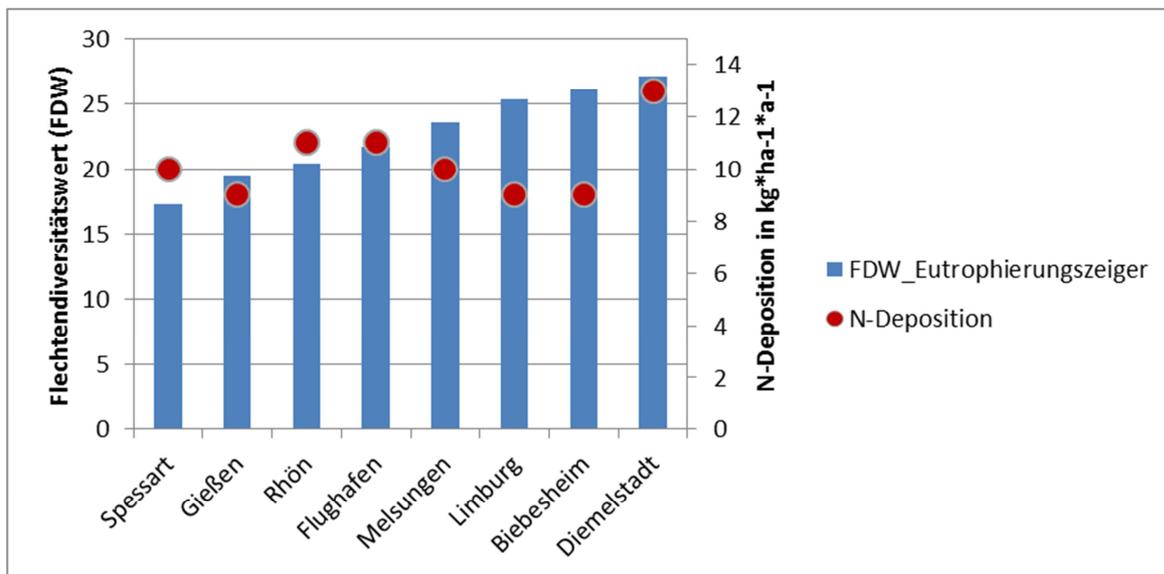


Abb. 35: Flechten-Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger im Jahr 2017 und Stickstoffdeposition für die Landnutzungsclassen „Wiesen und Weiden“ aus Dreijahresmittelwerten der Jahre 2013-2015 (UBA 2018)

Die DBF Spessart und Gießen zeigen vergleichsweise geringe Flechten-Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger bei relativ geringer N-Deposition. Hingegen erreichen die Eutrophierungszeiger im Nordwesten Hessens (DBF Diemelstadt) bei der höchsten N-Deposition ebenfalls hohe Flechten-Diversitätswerte. Eine Korrelationsanalyse der Stickstoff-Depositionsdaten und der Flechten-Diversität der Eutrophierungszeiger ließ jedoch keinen Zusammenhang erkennen ($r = +0,22$). Diese Spanne ist zum einen wohl zu gering, um eine Differenzierung erwarten zu lassen. Zum anderen spielen weitere Faktoren eine Rolle. So wurde beispielsweise in der Rhön trotz der vergleichsweise hohen N-Deposition nur eine geringe Häufigkeit von Eutrophierungszeigern kartiert (Abb. 35). Da die Rhön die Untersuchungsfläche mit den höchsten Niederschlägen ist, spielen hier möglicherweise Auswaschungsvorgänge eine Rolle. Auch die geringe Vorbelastung der DBF Rhön und Spessart könnte eine Rolle spielen. Die Baumstämme sind hier bereits dicht mit Flechten bewachsen und geben den sich ausbreitenden Eutrophierungszeigern wenig neue Besiedelungsfläche.

Des Weiteren liefert die N-Depositionskarte methodisch bedingt keine Aussagen zu Nahdepositionen von Stoffen aus einzelnen Emissionsquellen, sondern stellt die Hintergrundbelastung eines Gebietes dar (UBA 2018). Hingegen werden bei der Flechtenkartierung die Wirkungen reaktiven Stickstoffs räumlich feiner aufgelöst. Diese werden mittels Flechten auch kleinräumig erfasst, etwa, wenn die Trägerbäume an Straßen oder in unmittelbarer Umgebung einer Tierhaltung stehen.

Das Umweltbundesamt stuft Stickstoffeinträge als eine der Hauptursachen für den Verlust biologischer Vielfalt in Europa ein und konstatiert, dass 68 % der Fläche empfindlicher Ökosysteme Deutschlands 2015 durch zu hohe Stickstoffeinträge bedroht war. Die Bundesregierung strebt mit der Neuauflage der Nachhaltigkeitsstrategie 2016 an, den Anteil dieser

Flächen bis 2030 auf 50 % zu senken (Umweltbundesamt 2018). In Hessen kann die landesweite Stagnation der Diversitätswerte der nährstoffempfindlichen Referenzarten zugunsten der Eutrophierungszeiger in den vergangenen fünf Jahren ein Hinweis auf einen beginnenden Verlust der Flechten-Biodiversität an den untersuchten freistehenden Trägerbäumen sein.

5.3.2 Folienverfahren nach VDI 3957 Blatt 8

An jeder Messfläche von sieben Dauerbeobachtungsf lächen wurde an einem ausgewählten Baum eine Folienaufnahme erstellt. In jedem Untersuchungs jahr wurde die Aufnahme nach Möglichkeit am selben Baum wiederholt. Wenn ein Baum nicht mehr geeignet war (Nutzungsänderung, Alterserscheinungen) oder dieser mittlerweile gefällt war, musste auf einem Ersatzbaum eine neue Zeitreihe begonnen werden. Es sollen die Ergebnisse einer Auswahl von Bäumen (Tab. 8) beispielhaft dargestellt werden. An diesen Bäumen wurde in jedem Untersuchungs jahr eine Folie gezeichnet. Dargestellt wird die Entwicklung von vier häufigen Blattflechtenarten, die sich aufgrund ihrer ökologischen Ansprüche deutlich unterscheiden.

Auf den untersuchten Folien erreichte die Artengruppe *Physcia adscendens/tenella* in 2017 an allen Dauerbeobachtungsf lächen die höchsten mittleren Deckungsprozente. Beide Arten sind aufgrund der Ähnlichkeit ihrer Initialstadien und ihres rasigen Wachstums bei der Folienaufnahme nicht zu trennen. Daher wurden für die folgende Betrachtung andere – ebenfalls häufige – Arten ausgewählt.

Tab. 8: Auswahl von Trägerbäumen zur Darstellung der Ergebnisse des Folienverfahrens

Nr..		Diemelstadt	Melsungen	Rhön	Gießen	Limburg	Spessart	Biebesheim
1	Baumnr. 2017	02-1523	11-1274	05-1151	04-1040	15-816	13-871	06-620
	Baumart	Apfelbaum	Esche	Esche	Apfelbaum	Birnbaum	Apfelbaum	Apfelbaum
	Umfang in cm	142	132	225	178	87	128	106
2	Baumnr. 2017	10-1505	12-1421	12-1044	17-1086	22-723	17-863	11-453
	Baumart	Spitzahorn	Esche	Spitzahorn	Pappel	Pappel	Birnbaum	Pappel
	Umfang in cm	209	162	200	206	252	178	330
3	Baumnr. 2017	20-1589	16-1267	19-1089	03-1013	05-952	01-416	16-570
	Baumart	Apfelbaum	Spitzahorn	Spitzahorn	Esche	Spitzahorn	Birnbaum	Pappel
	Umfang in cm	129	141	200	330	300	105	386

Die Flechte *Phaeophyscia orbicularis* ist ein typischer Eutrophierungszeiger. Die schmalblättrige Art bevorzugt nährstoffreiche, staubimprägnierte Rinde von Laubbäumen (WIRTH & KIRSCHBAUM 2014). Zu Beginn der Untersuchungsreihe wurde sie bei den Folienaufnahmen nur an wenigen Dauerbeobachtungsflächen in Südhessen (Biebesheim, Spessart, Limburg) in geringer Deckung erfasst. Die Art hat seitdem ihren Flächenanteil in allen DBF deutlich erhöht (Abb. 36). An den ausgewählten drei Bäumen der DBF Gießen nimmt sie aufgrund offensichtlich sehr guter Wuchsbedingungen seit 10 Jahren deutlich zu und erreicht aktuell eine mittlere Deckung von etwas über 50 %. Das Ergebnis zeigt, wie auch in der Flechtenkartierung bereits ausgeführt, dass an den Bäumen landesweit eine erhöhte Nährstoffverfügbarkeit die eutrophierungstolerante Art gefördert hat.

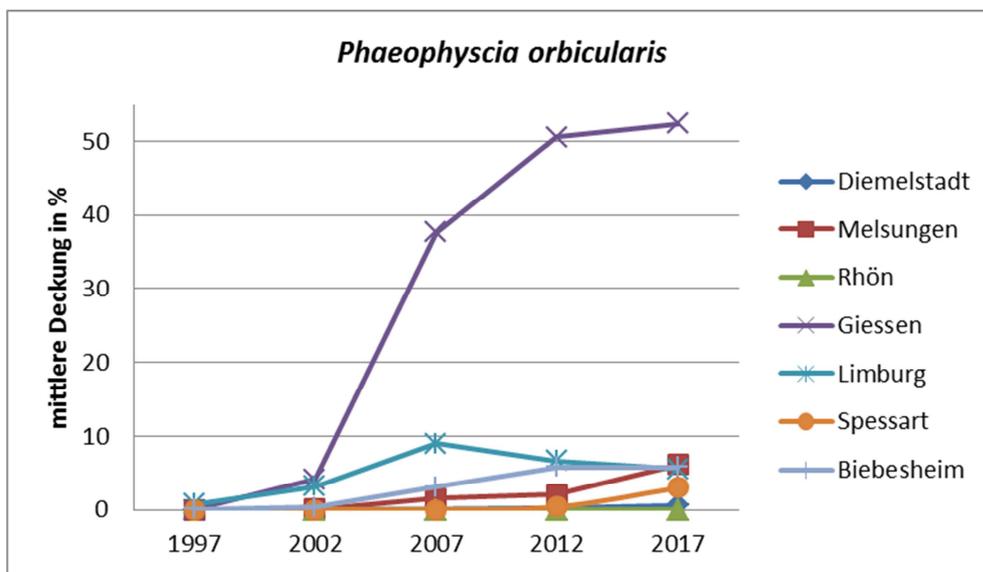


Abb. 36: Entwicklung des Deckungsgrades von *Phaeophyscia orbicularis* aus Folienaufnahmen von jeweils drei ausgewählten Bäumen pro Dauerbeobachtungsfläche

Auch die auffällige gelbe Blattflechte *Xanthoria parietina* gehört zu den Eutrophierungszeigern. Zu Beginn der Untersuchung in 1997 wurde sie ausschließlich an den Biebesheimer Bäumen in geringer Flächendeckung auf der Folie erfasst (Abb. 37). In Biebesheim waren die Bedingungen offensichtlich bereits im Jahr 2002 vergleichsweise günstig und die Art ist bis 2012 an den drei untersuchten Bäumen weiter gediehen. In den vergangenen fünf Jahren ist die Flächendeckung an den betrachteten Bäumen erstmalig deutlich zurückgegangen. Möglicherweise handelt es sich um Beschattungseffekte. Einheitlicher zeigt sich die Entwicklung an den meisten anderen Dauerbeobachtungsflächen, wo ein steter Anstieg der Flächendeckung von *Xanthoria parietina* zu beobachten ist. Lediglich an den untersuchten Bäumen der DBF Limburg und Rhön wurde die Art bis heute noch nicht erfasst. Beobachtungen in der freien Landschaft in weiten Teilen Hessens, z. B. auch im Raum Gießen, zeigen, dass die Art sich stark ausgebreitet hat. Sie ist durch ihre kräftig gelbe Färbung (Abb. 38) und ihr Vorkommen im Kronenbereich von Sträuchern und Bäumen sehr auffällig („Vergilbung“).

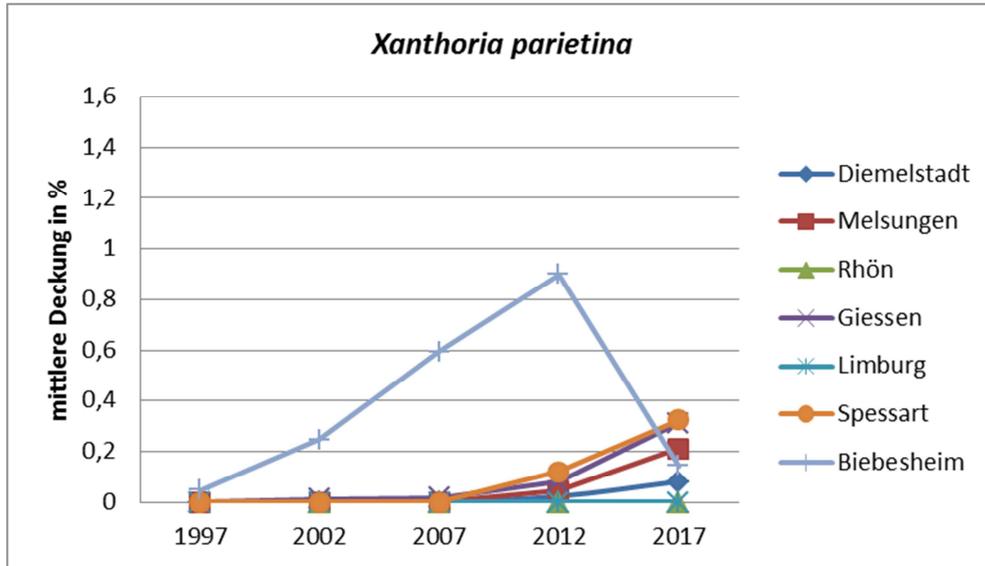


Abb. 37: Entwicklung des Deckungsgrades von *Xanthoria parietina* aus Folienaufnahmen von jeweils drei ausgewählten Bäumen



Abb. 38: Wand-Gelbflechte (*Xanthoria parietina*), eine Zeigerart für Eutrophierung

Mit *Hypogymnia physodes* liegt eine Art mit deutlich anderen ökologischen Ansprüchen vor. Als Acidophyt bevorzugt sie saure Rinde (WIRTH & KIRSCHBAUM 2014). Wie der überwiegende Anteil der Acidophyten toleriert die Blattflechte nur eine schwache Eutrophierung (Nährstoffzahl = 3, WIRTH 2010).

Das Folienvorverfahren wurde nur auf Baumarten mit subneutraler Rinde durchgeführt. Hier ist die Art nur bei Einfluss saurer Immissionen zu erwarten. Vorkommen von Säurezeigern auf natürlicherweise subneutralen und durch Immissionen versauerten Borken wurden in den Voruntersuchungen in Hessen landesweit gefunden (KIRSCHBAUM & WINDISCH 1995). Die Abb. 39 legt nahe, dass im Spessart und in der Rhön eine Neutralisation der versauerten Borken vergleichsweise spät eingesetzt hat. Höhere Niederschläge und ein geringeres Aufkommen alkalischer Stäube können die Ursache sein. An den übrigen Dauerbeobachtungsflächen hat die Art im Untersuchungszeitraum an den Foliensäulen eine untergeordnete Rolle gespielt.

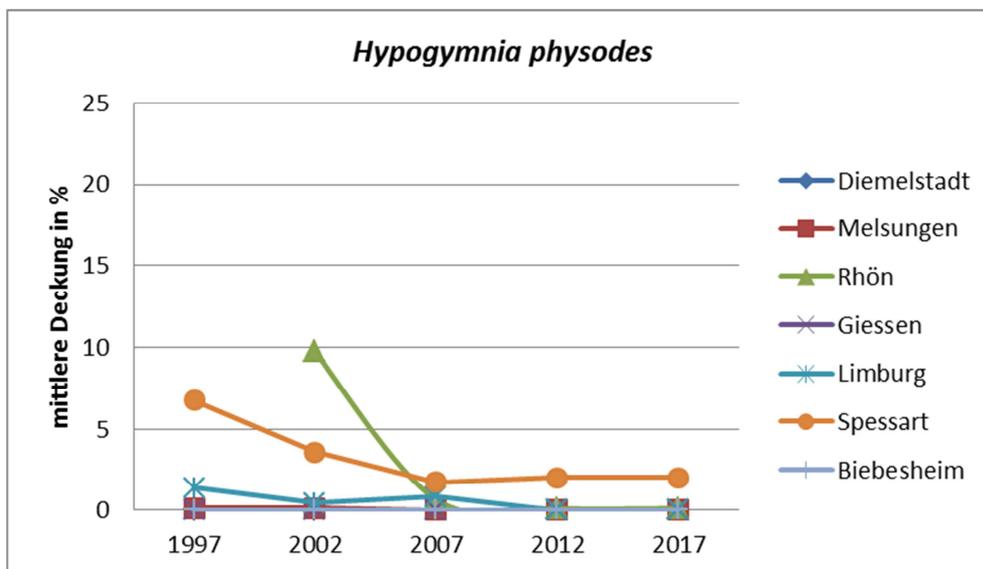


Abb. 39: Entwicklung des Deckungsgrades von *Hypogymnia physodes* aus Folienaufnahmen von jeweils drei ausgewählten Bäumen

Die Blattflechte *Parmelia sulcata* (Abb. 41) gehört aufgrund ihrer breiten ökologischen Amplitude zu den häufigsten Blattflechten Mitteleuropas. Sie bevorzugt eher nährstoffreiche Rinde (WIRTH & KIRSCHBAUM 2014). Bei den Folienaufnahmen wurde sie an den Bäumen der Dauerbeobachtungsflächen Spessart und Limburg noch bis 2012 regelmäßig mit einem hohen Deckungsgrad erfasst (Abb. 40). Danach entwickelte sich die Deckung der Art sehr unterschiedlich. Im Spessart konnte sie ihre Deckungsprozente in den letzten fünf Jahren noch etwas erhöhen, was ein Hinweis auf günstige lufthygienische Bedingungen ist. An den untersuchten Bäumen der DBF Limburg sind die Bestände gerade in den letzten fünf Jahren deutlich zurückgegangen. Die Art ist als Referenzart auf eine vergleichsweise hohe Luftgüte angewiesen und toleriert bis zu einem gewissen Maße mit Nährstoffen angereicherte Borke (Nährstoffzeigerwert: 7). Inwieweit sie dem Druck weiterer Eutrophierung standhalten kann, bleibt abzuwarten.

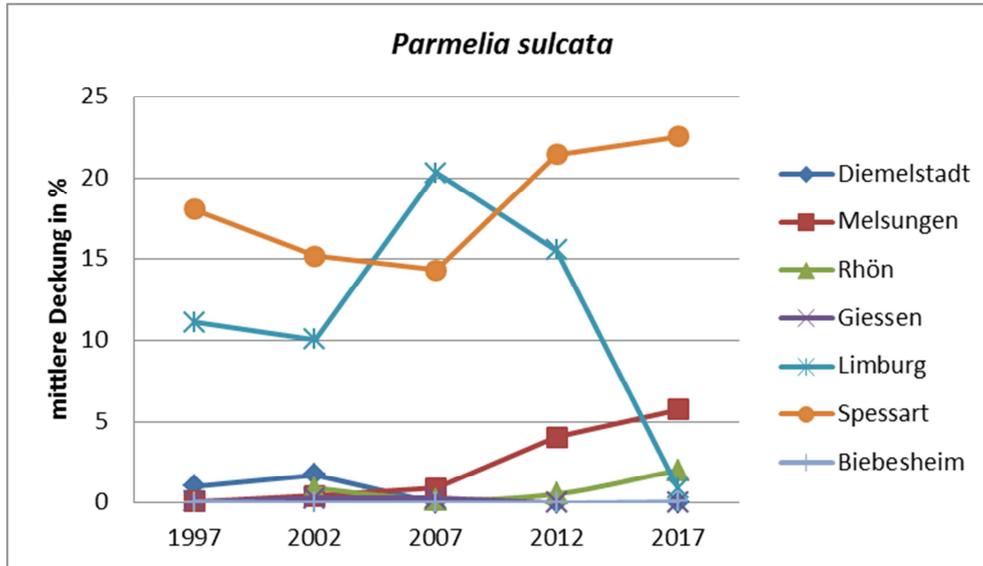


Abb. 40: Entwicklung des Deckungsgrades von *Parmelia sulcata* aus Folienaufnahmen von jeweils drei ausgewählten Bäumen



Abb. 41 Furchen-Schüsselflechte (*Parmelia sulcata*), eine euryöke Referenzart

Das Folienverfahren erweist sich als geeignetes Instrument, um Flechtenindividuen oder Flechtenrasen detailliert zu erfassen. Die Aussagen, die mit den Ergebnissen hinsichtlich der Luftgüte getroffen werden können, decken sich weitgehend mit denen der Flechtenkartierung. Es bleibt abzuwarten, ob die Folienmethode zukünftig auch für neue Aufgabenstellungen – wie das Klimawandel-Biomonitoring – zum Einsatz kommen kann. Bislang liegt eine Zeitreihe von über 20 Jahren vor, in der eine Reihe von identischen Bäumen lückenlos untersucht wurde.

5.4 Biomonitoring des Klimawandels

5.4.1 Klimawandelzeiger-Index (KWI), erhoben an Baumstämmen

Die Auswertung der Flechten-Vorkommen an den hier als Klimabäume bezeichneten Trägerbäumen liefert den Klimawandel-Index (KWI). Solche Klimabäume werden seit 2007 in Hessen untersucht, wobei zu den Dauerbeobachtungsflächen der Luftgütekartierung mit den Flächen im Rheingau und Odenwald noch zwei zusätzliche Flächen für das Klimawandel-Biomonitoring in das Projekt aufgenommen worden waren. An jeder Dauerbeobachtungsfläche (DBF) wurde der komplette Mittelstamm von 20 Bäumen untersucht.

In der hier zugrunde liegenden Kartierung von Baumstämmen der Klimabäume wurden an den landesweit zehn untersuchten Flächen wie im Jahre 2012 insgesamt 11 Klimawandelzeiger gefunden (Abb. 42). Die Blattflechtenarten *Punctelia jeckeri*, *Punctelia subrudecta* und *Flavoparmelia caperata* waren auch 2017 wieder die häufigsten Spezies unter den Klimawandelzeigern.

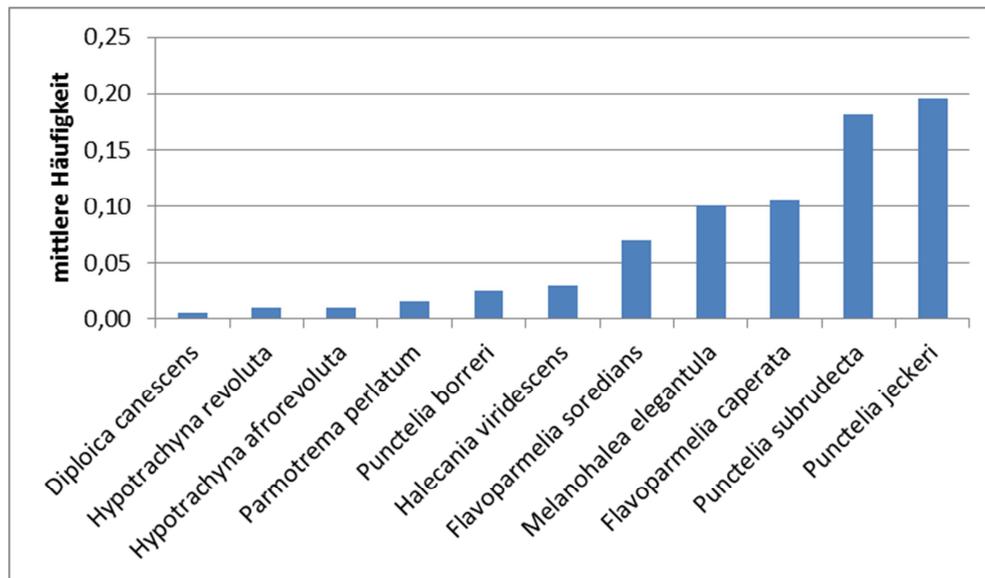


Abb. 42: Mittlere Häufigkeit der Klimawandelzeiger in 2017 an Klimabäumen für alle Dauerbeobachtungsflächen in Hessen; ein Wert von 0,2 bedeutet, dass die jeweilige Art im Durchschnitt an jedem fünften der untersuchten Bäume vorkommt



Abb. 43: Klimawandelzeiger in Hessen; links: Gefleckte Punktflechte (*Punctelia subrudecta*), rechts: Caperatflechte (*Flavoparmelia caperata*). (Fotos: Kirschbaum)

Die zeitliche Entwicklung des KWI geben Abb. 44 und Tab. 9 wieder. Ein Wert von 1 bedeutet, dass im Durchschnitt an jedem der kartierten Bäume eine Klimawandelzeigerart gefunden wurde, das heißt, pro Baum kann jede Art maximal einen Datensatz erzeugen. An der DBF Flughafen, an der diese Fragestellung erst seit 2012 untersucht wird, ergaben sich bereits im Jahr 2012 deutlich höhere Klimawandelzeiger-Indizes als auf den übrigen Flächen. Die Werte sind hier in den vergangenen fünf Jahren weiter angestiegen, so dass heute an jedem Baum durchschnittlich 1,55 klimawandelzeigende Flechtenarten angetroffen werden können.

Auch die meisten anderen Dauerbeobachtungsflächen zeigen einen Anstieg des Klimawandelzeiger-Index. Dabei besteht ein Nord-Süd-Gefälle. Die südlicher in Hessen gelegenen DBF, wie etwa Limburg, Spessart, Biebesheim und Rheingau erreichen im Beobachtungszeitraum einen kräftigen Anstieg von über 0,5 Indexpunkten. Die Gebiete, in denen sich der Klimawandelzeiger-Index kaum geändert hat (Diemelstadt, Melsungen, Gießen), liegen ganz überwiegend in den nördlicher gelegenen Teilen Hessens. Eine Ausnahme ist die Beobachtungsfläche Odenwald, die zwar im Süden Hessens liegt, aufgrund ihrer Höhenlage über 500 m ü. NN wohl aber derzeit keine guten Voraussetzungen für die wärmebedürftigen Klimawandelzeiger bietet.

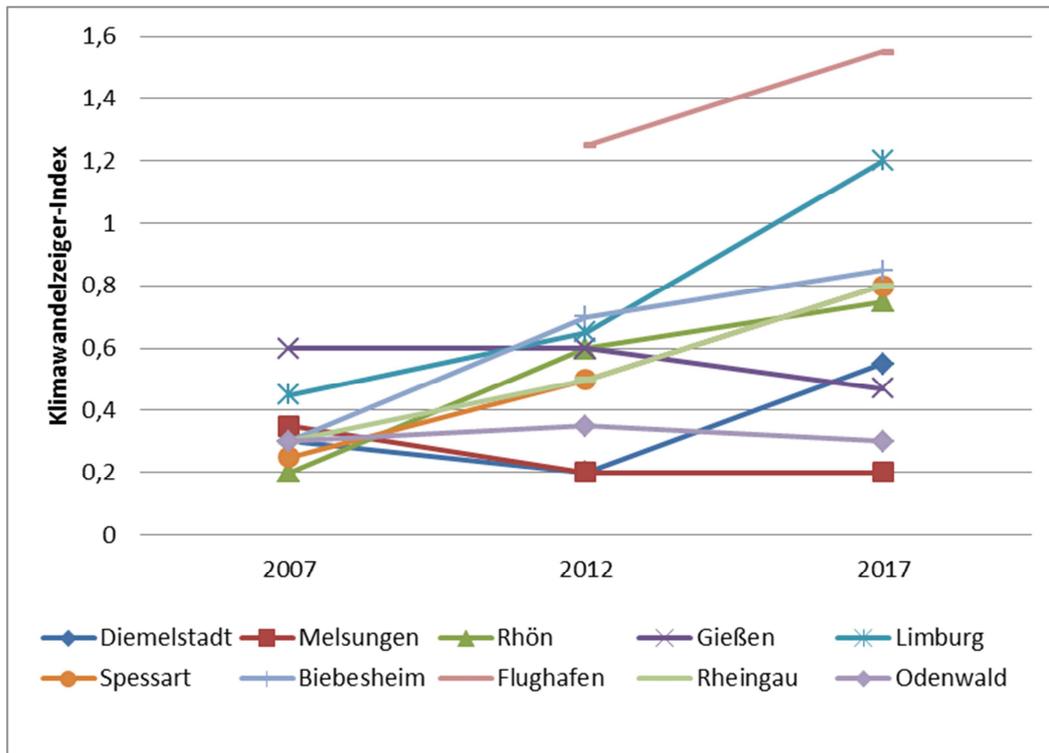


Abb. 44: Entwicklung des Klimawandelzeiger-Indexes 2007-2017 (für die DBF Flughafen liegen Daten erst ab 2012 vor)

Tab. 9: Entwicklung des Klimawandelzeiger-Index (KWI) an Trägerbäumen der hessischen Dauerbeobachtungsflächen

DBF	KWI 2007	KWI 2012	KWI 2017	KWI Zunahme (2007-2017)
Diemelstadt	0,3	0,2	0,55	+ 0,25
Melsungen	0,35	0,2	0,2	- 0,15
Rhön	0,2	0,6	0,75	+ 0,55
Gießen	0,6	0,6	0,47	- 0,13
Limburg	0,45	0,65	1,2	+ 0,75
Spessart	0,25	0,5	0,8	+ 0,55
Biebesheim	0,3	0,7	0,85	+ 0,55
Flughafen	keine Daten	1,25	1,55	+ 0,30
Rheingau	0,3	0,5	0,8	+ 0,50
Odenwald	0,3	0,35	0,3	± 0

Der Klimawandelzeiger-Index wurde im Zuge der Erstauflage der VDI-Richtlinie 3957 Blatt 20 entwickelt. Daten aus bundesweiten Untersuchungen, die nach der neuen Richtlinie ausgewertet wurden, zeigen bereits eine langfristige Entwicklung (Abb. 45). Das Bild unterstützt die Aussage, wonach die Klimawandelzeiger unter den Flechtenarten von Westeuropa nach Deutschland vordringen. Aktuell sind diese in den westlichen Teilen Deutschland aufgrund der für sie dort günstigeren klimatischen Verhältnisse deutlich häufiger als in den östlichen Landesteilen.

Ordnet man die aktuellen hessischen KWI-Werte, die zwischen 0,2 und 1,55 betragen, in das Bild ein, so ergeben sich überwiegend blaue Punkte – lediglich für die Fläche um den Frankfurter Flughafen ergibt sich ein gelber und für die Limburger Fläche ein grüner Punkt. Es ist wahrscheinlich, dass in den nächsten Jahren und Jahrzehnten die Häufigkeit und Artenzahl der klimawandelzeigenden Flechtenarten sich in Hessen weiter erhöhen wird. Vorreiter ist die Dauerbeobachtungsfläche Flughafen, die daher besonderer Aufmerksamkeit bedarf.

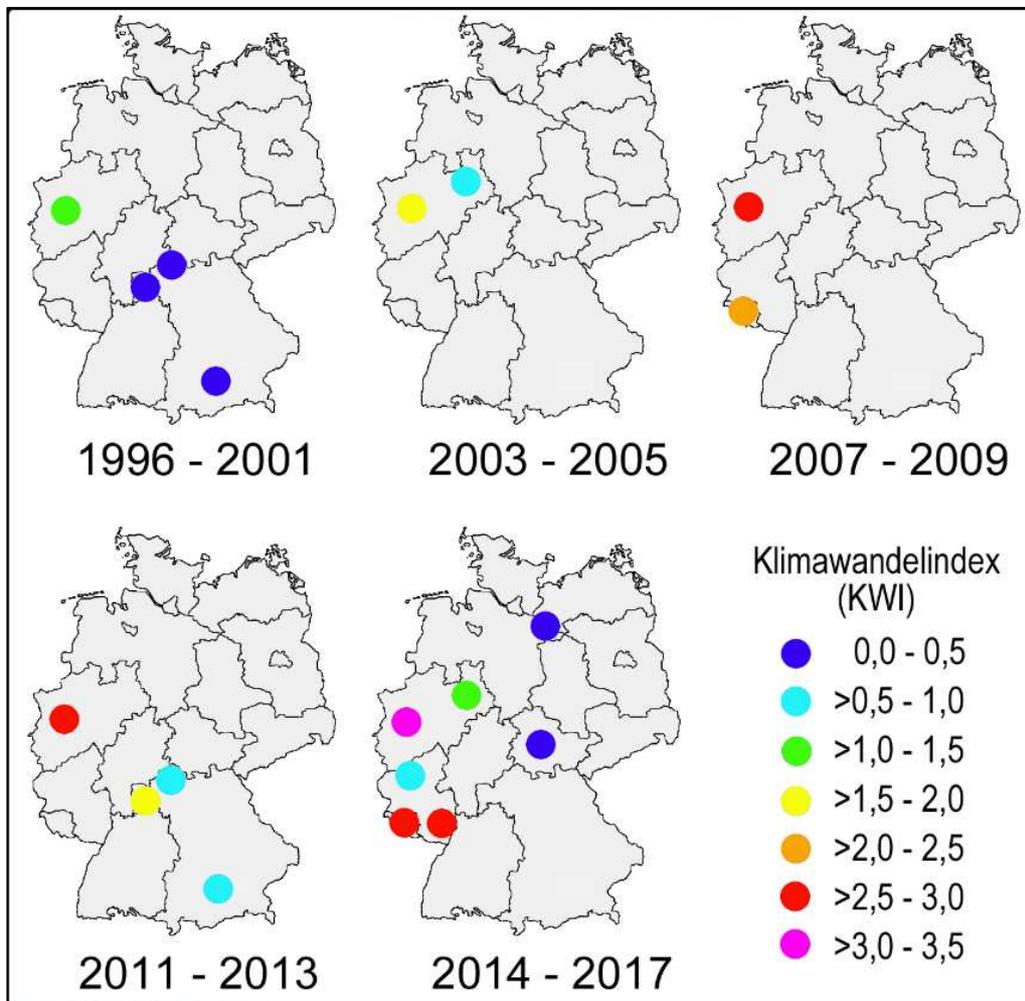


Abb. 45: Veränderung des Klimawandelzeiger-Index in Deutschland seit 1996. Zusammenfassende Darstellung von Ergebnissen aus Studien einiger Mitglieder der VDI-Arbeitsgruppe „Wirkungsfeststellung an Niederen Pflanzen“. KWI für Hessen nicht dargestellt, siehe Erläuterungen im Text (Bild: JOHN et al. 2017)

5.4.2 Diversitätswert der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}), erhoben im Messgitter standardisierter Trägerbäume

Diese zweite Möglichkeit der Auswertung nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 20 zum Klimawandel-Biomonitoring basiert auf quantitativ in einem Messgitter erfassten Frequenzen von Klimawandelzeigern (vgl. Tab. 5). Die Erfassungsmethode entspricht der der Luftgüteuntersuchung. Damit können die Daten der Flechten-Dauerbeobachtung seit Projektbeginn mit in die Auswertung einfließen. Die Ergebnisse zeigen die Entwicklung der Klimawandelzeiger im Laufe der vergangenen 25 Jahre (Abb. 46).

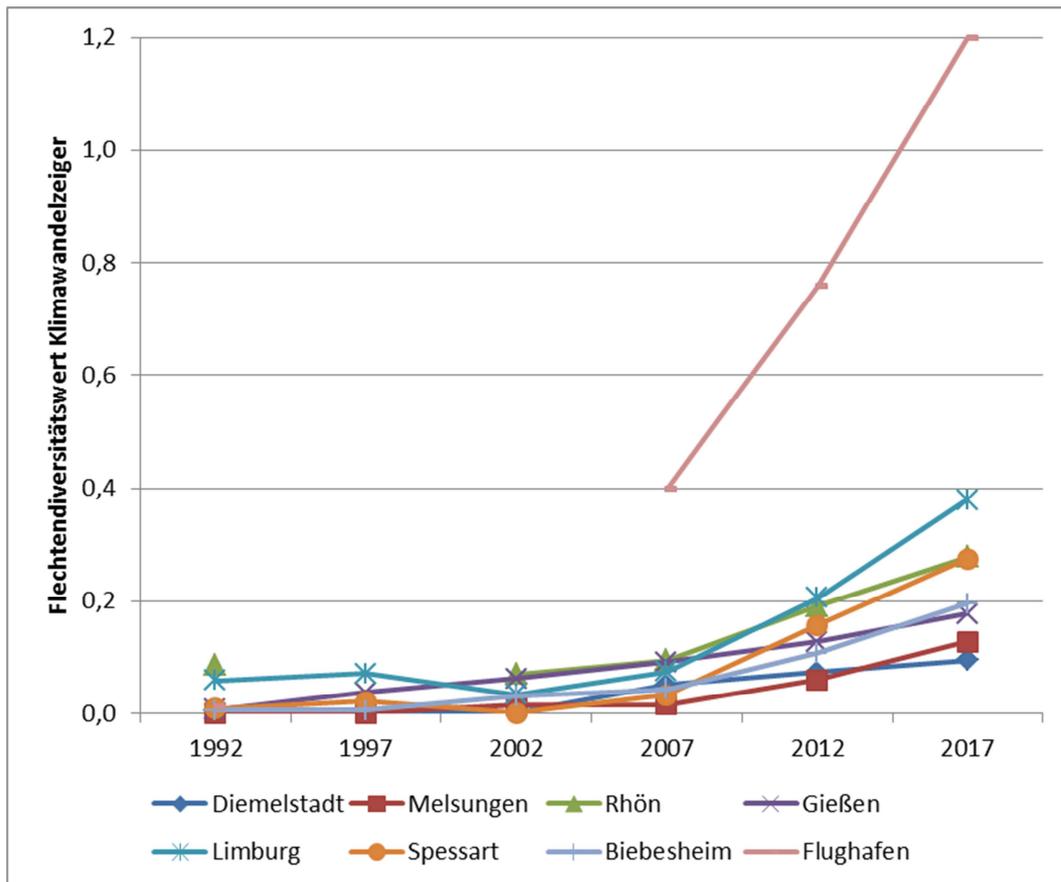


Abb. 46: Entwicklung der Flechten-Diversität der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}) von 1992-2017 im Messgitter standardisierter Trägerbäume; die Untersuchungsfläche Flughafen wurde 1992 (Wert: 0,01), 2007, 2012 und 2017 kartiert; die DBF Rhön wurde 1997 nicht untersucht

An den Bäumen der Luftgüteuntersuchung – und in den Messgittern – wurden aktuell 14 der insgesamt 45 für das Klimawandel-Biomonitoring zur Verfügung stehenden Arten angetroffen. Zu Beginn der Untersuchungsreihe im Jahr 1992 war es mit *Punctelia subrudecta* landesweit nur eine Spezies. Sie wurde in allen Dauerbeobachtungsflächen außer Melsungen gefunden und hatte ihren Schwerpunkt in der Rhön (14 Datensätze) und in Limburg (8 Datensätze). Bis 1997 kamen *Flavoparmelia caperata* und *Melanohalea elegantula* hinzu. In den Folgejahren bis 2002 blieb die Zahl der Klimawandelzeiger weiter bei drei Arten, die

Spezies wurden an den Bäumen jedoch immer häufiger angetroffen. Im Jahr 2007 konnte ein Anstieg sowohl der Artenzahl der Klimawandelzeiger (sieben Arten) als auch deren Häufigkeit dokumentiert werden, der sich bis 2017 deutlich weiter verstärkt hat. Der Anstieg des Flechten-Diversitätswertes der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}) ist für die vergangenen fünf Jahre auf allen Dauerbeobachtungsflächen außer Diemelstadt und Gießen signifikant ($p < 0,05$). Der Vergleich mit Abb. 46 zeigt, dass neben Diemelstadt und Gießen auch Melsungen einen relativ flachen Anstieg des FDW_{KWZ} zeigt. Hier ist die Signifikanzschwelle nur knapp erreicht ($p = 0,04$).

Besonders augenfällig ist, dass im Umland des Flughafens die Häufigkeit der Klimawandelzeiger um ein Vielfaches höher ist, als in allen übrigen Untersuchungsgebieten. Hier zeigt sich möglicherweise heute schon, wie sich die Bestände der Klimawandelzeiger in den übrigen Dauerbeobachtungsflächen in Zukunft entwickeln könnten.

Die Ergebnisse aus beiden Methoden (KWI und FDW_{KWZ}) verdeutlichen, dass der Wandel der Bestände klimawandelzeigender Flechtenarten bisher insbesondere in den südlichen Landesteilen Hessens stattgefunden hat. Die Häufigkeit der Klimawandelzeiger hat sich dort an allen untersuchten Flächen erhöht. Besonders interessant ist hier das Gebiet um den Flughafen, das schon 2007 deutlich mehr dieser Zeigerarten trug und sich bis 2017 noch weiter gesteigert hat. Der Flughafen gehört mit Biebesheim zu den wärmsten und niederschlagsärmsten der untersuchten Gebiete in Hessen.

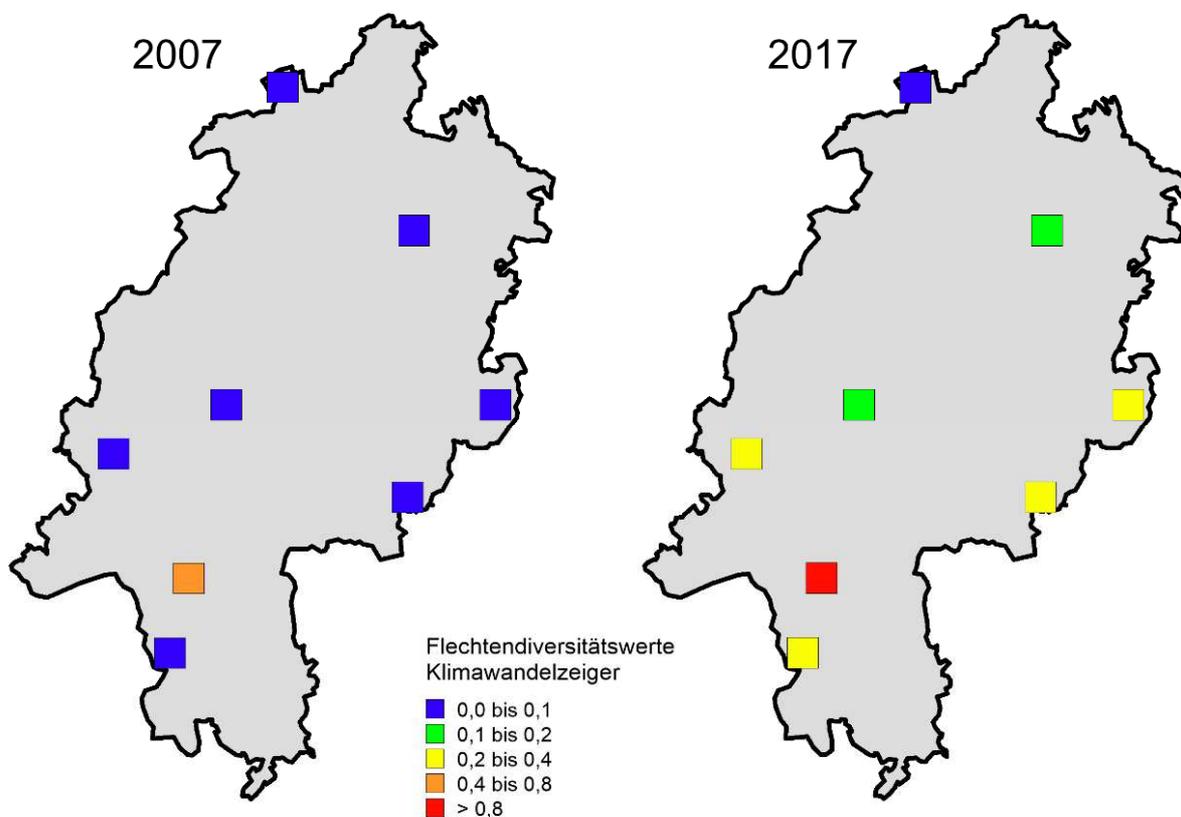


Abb. 47: Entwicklung der Flechten-Diversität der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}) von 2007 bis 2017 aus der Kartierung im Messgitter standardisierter Trägerbäume

5.4.3 Wärmezeiger-Index (WZI), erhoben an Mauern

In dieser Arbeit sind zum dritten Mal für jede Dauerbeobachtungsfläche 30 vergleichbare Mauerabschnitte untersucht worden. Der Wärmezeigerindex, der die mittlere Häufigkeit von wärmeliebenden Flechtenarten darstellt, wurde berechnet und in einer Zeitreihe dargestellt (Abb. 48).

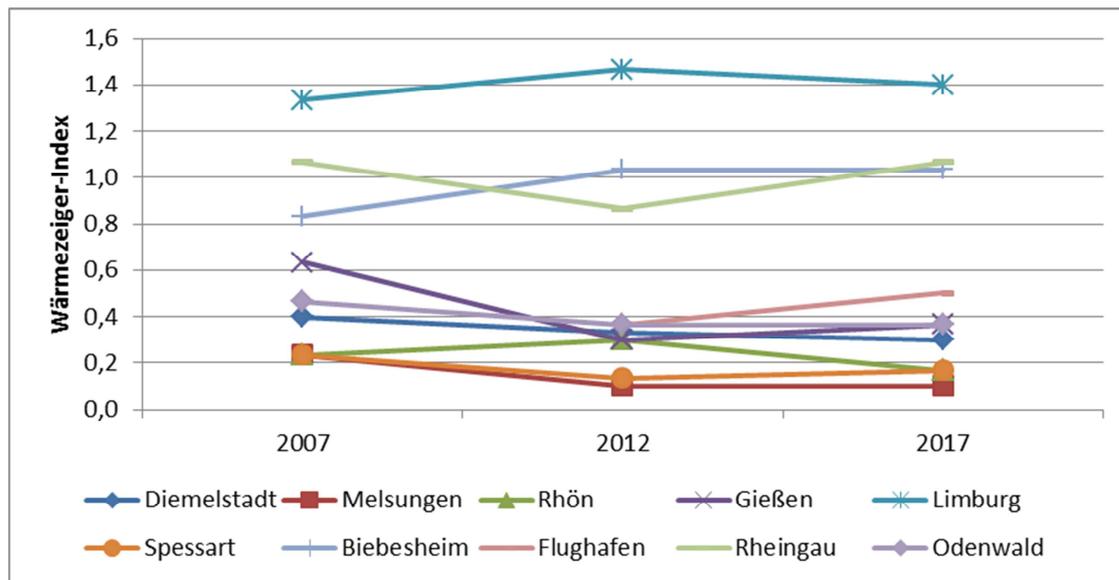


Abb. 48: Entwicklung der mittleren Häufigkeit der Wärmezeiger von 2007-2017 an jeweils 30 Mauerabschnitten; für die Untersuchungsfläche Flughafen liegen für 2007 keine Daten vor

An den Untersuchungsflächen Limburg, Biebesheim und Rheingau und damit wieder in den südlichen Landesteilen Hessens, ist ein höherer Wärmezeiger-Index zu beobachten als im übrigen Bundesland. Im Gegensatz zu den Untersuchungen auf Bäumen ist jedoch bis heute keine Entwicklung zugunsten von Wärmezeigern erkennbar. Auch das Gebiet um den Flughafen zeigt in den vergangenen Jahren nur einen leichten Anstieg des WZI.

Als häufigste Art unter den Wärmezeigern auf Mauern erwies sich *Caloplaca teicholyta* (Temperaturzeigerwert: 8; Abb. 49 und 50). Landesweit kommt die wärmezeigende Art an den Mauern aller Untersuchungsflächen vor, die meisten Funde gelangen jedoch im Süden Hessens, z. B. in Limburg (an 22 von 30 Mauern; mittlere Häufigkeit 0,733), Biebesheim (an 22 von 30 Mauern; mittlere Häufigkeit 0,733) und im Rheingau (an 19 von 30 Mauern; mittlere Häufigkeit 0,633).

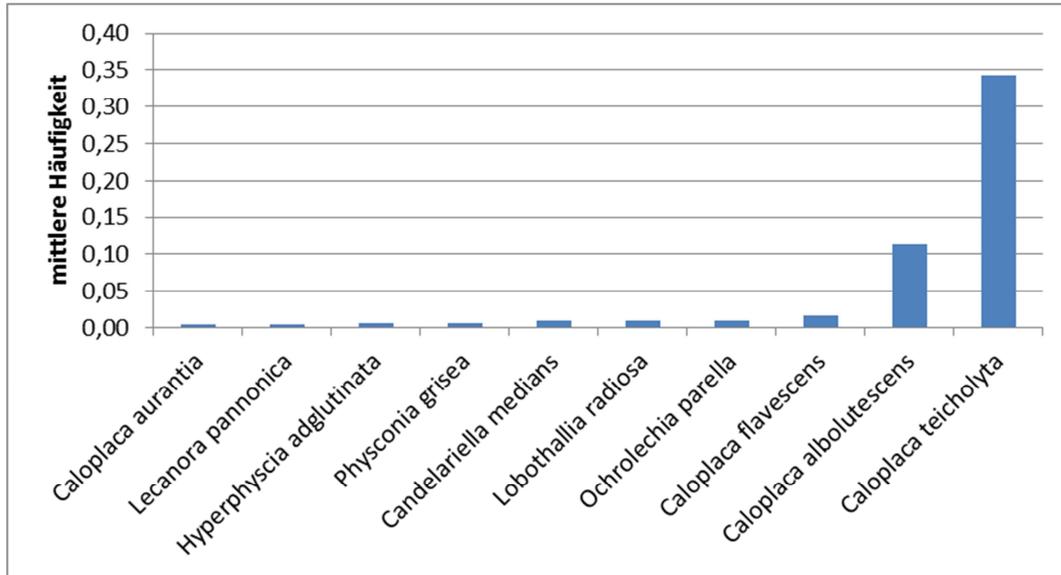


Abb. 49: Mittlere Häufigkeit der Wärmezeigerarten in 2017 aus der Kartierung von Mauern für alle Dauerbeobachtungsflächen



Abb. 50: Wärmezeiger auf Mauern. Links: Ziegel-Schönfleck (*Caloplaca teicholyta*) Foto: Kirschbaum; rechts: Graue Burgenflechte (*Diploica canescens*) (Foto: Cezanne)

5.5 Empfehlungen für das Biomonitoring mit Flechten in Hessen

Das Biomonitoring der Luftgüte in Hessen blickt nunmehr auf eine Laufzeit von 25 Jahren zurück. Im Jahr 1995 wurde die erste landesweite Kartierung veröffentlicht. In den Folgejahren wurden Dauerbeobachtungsflächen im ländlichen Raum eingerichtet und aufgrund neuer Fragestellungen weitere Flächen hinzugenommen. Aktuell sind zehn Untersuchungsflächen mit ländlichem Umfeld im Programm, die im fünfjährigen Turnus untersucht werden. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen dokumentieren die Umweltqualität. Standen zu Beginn der Untersuchungen die Wirkungen von sauren Luftverunreinigungen im Vordergrund, so haben sich die Anforderungen an die Aussagen der Flechtenkartierung bis heute kontinuierlich geändert. Neben der Dokumentation der Luftgüte können heute Aussagen zu den Wirkungen eutrophierender Luftschadstoffe und klimatischer Veränderungen getroffen werden. Dies war möglich, weil die Grunddatenerhebung seit Beginn des Projektes mit einer standardisierten und durchgängig einheitlichen Methode nach VDI-Richtlinie erfolgte. Diese Daten stehen auch in Zukunft für neue Fragestellungen zur Verfügung. Daher wird die Fortführung der Flechtenkartierung zur Luftgütebestimmung uneingeschränkt weiter empfohlen.

Das Folienverfahren liefert aufgrund seiner höheren Auflösung (Nachzeichnen einzelner Flechtenrasen) zwar detailliertere Informationen. Bisher konnten jedoch zur Luftgütebeurteilung keine über die der Flechtenkartierung hinausgehenden Aussagen abgeleitet werden.

Das Biomonitoring des Klimawandels wird seit 2007 in Hessen durchgeführt. Parallel erfolgte die Entwicklung einer VDI-Richtlinie zur Umsetzung der Aufgabe. Die entsprechende Untersuchung der Flechten auf Bäumen lieferte in den letzten zehn Jahren bereits deutliche Aussagen. Beide in der Richtlinie des VDI beschriebenen Methoden (KWI, FDW_{KWZ}) wurden erprobt und verglichen. Sie eignen sich prinzipiell in Hessen zur Dokumentation der Wirkungen des Klimawandels.

Die Variante „Klimawandelindex“ (KWI), bei der komplette Baumstämme untersucht werden, hat den Vorteil der direkten Vergleichbarkeit mit Untersuchungen in anderen Bundesländern oder angrenzenden Staaten. Für Hessen liegen nunmehr Daten für die Jahre 2007, 2012 und 2017 vor. Diese Zeitreihe sollte weitergeführt werden.

Die zweite Variante der „Flechten-Diversitätswerte der Klimawandelzeiger“ (FDW_{KWZ}) basiert auf der Flechtenkartierung im Messgitter. Es liegen für Hessen Daten seit Beginn des Projektes in 1992, also für die letzten 25 Jahre vor, was einen erheblichen Vorteil für das Klimawandel-Biomonitoring darstellt. Die Vergleichbarkeit der Daten mit außerhessischen Gebieten ist jedoch eingeschränkt, da die Grunddatenerhebung dort meist auf einem anderen Messgitter fußt. Das hessische Flechten-Dauerbeobachtungsprojekt läuft kontinuierlich seit 1990 unter Beibehaltung der Flechten-Aufnahmefläche, die durch die Flächengröße und Positionierung des Messgitters am Baumstamm bestimmt wird. In anderen Bundesländern wurden später diverse Projekte gestartet, die mit dem erst seit 2005 in der Richtlinie des VDI aufgeführten Gitter arbeiten.

Es wird empfohlen, beide Methoden (KWI, FDW_{KWZ}) fortzuführen, um die Vorteile der jeweiligen Methode nutzen zu können.

Die Ergebnisse der Flechtenkartierung zum Klimawandel-Biomonitoring auf Mauern zeigen derzeit noch nicht die Entwicklung, wie sie auf Bäumen zu sehen ist. Es stellt sich nun die Frage, ob bei der nächsten Kartierung wieder Mauern untersucht werden sollten. Auf der Artenliste der Wärmezeiger gehört etwa die Hälfte zu den Gesteinsflechten, diese stehen dem Klimawandel-Biomonitoring zur Verfügung. Zudem sind bereits jetzt wärmeliebende Mauerflechten wie *Caloplaca teicholyta* in allen Untersuchungsflächen mit Schwerpunkt in Südhessen gefunden worden. So wird empfohlen, auch zukünftig wieder Mauern in die Untersuchung einzubeziehen und die Eignung derselben weiter zu prüfen.

In Hessen hat sich für die Untersuchung der Flechten-Dauerbeobachtungsflächen ein Zeitraum von fünf Jahren bewährt. Auch für das Biomonitoring des Klimawandels werden Wiederholungsuntersuchungen im Abstand von fünf Jahren empfohlen.

6 Literatur

- APTROOT, A.; VAN HERK, C. M. (2007): Further evidence of the effects of global warming on lichens, particularly those with Trentepohlia phycobionts. In: Environmental Pollution 146, S. 293–298.
- APTROOT, A. (2009): Lichens as an Indicator of Climate and Global Change. In: Climate Change, Observed Impacts on Planet Earth: Elsevier B.V., S. 401–408.
- APTROOT, A.; SPARRIUS, L. (2009): Europese verspreiding en internationale betekenis van Nederlandse korstmossen. In: Buxbaumia 83, S. 1–12.
- BAHN, M.; KÖRNER, C. (2003): Recent increases in summit flora caused by warming in the Alps. In: Grabherr, L., Körner, G., Thompson, C., Nagy, D.B.A. (Hg.): Alpine biodiversity in Europe. Berlin, Heidelberg: Springer (Ecological Studies 167), S. 437–441.
- BAIRLEIN, F.; HÜPPOP, O. (2004): Migratory Fuelling and Global Climate Change. In: Advances in Ecological Research 35, S. 33–47.
- BARTHOLMEß, H.; SCHLOTTMANN, K.; NOBEL W. (2011): Immissionsmessungen mit Passivsammlern und Flechtenkartierungen im Zusammenhang mit dem Eintrag von Stickstoff in die Umwelt. In: Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 71: 165–172.
- BRADLEY, B.A.; OPPENHEIMER, M.; WILCOVE, D.S. (2009): Climate change and plant invasions: restoration opportunities ahead? In: Global Change Biology 15, S. 1511–1521.
- BUILTJES, P.; HENDRIKS, E.; KOENEN, M.; SCHAAP, M.; BANZHAF, S.; KERSCHBAUMER, A.; GAUGER, T.; NAGEL, H.-D.; SCHEUSCHNER, T.; SCHLUTOW, A. (2011): Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und deren Wirkung in Deutschland. MAPESI - Modelling of Air Pollutants and Ecosystem Impacts. Umweltbundesamt. Appendix 11. Dessau-Rosslau.
- BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (2005): Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Status-Bericht der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene 384, S. 172.
- CEZANNE, R.; EICHLER, M.; KIRSCHBAUM, U.; WINDISCH, U. (2008): Flechten als Anzeiger des Klimawandels. In: Sauteria 15, S. 159–174.
- DÄMMGEN, U.; MATSCHULLAT, J.; ZIMMERMANN, F.; STROGIES, M.; GRÜNHAGE, L.; SCHELER, B.; CONRAD, J. (2013): Emission reduction effects on bulk and wet-only deposition in Germany - evidence from long-term observations. Part 3. Sulphur and nitrogen compounds. In: Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 73(7-8), S. 330–339.
- DE BRUYN, U.; LINDERS, W.; MOHR, K. (2009): Epiphytische Flechten im Wandel von Immissionen und Klima, Ergebnisse einer Vergleichskartierung 1989/2007 in Nordwestdeutschland. In: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung 21 (1), S. 63–75.

- EEA - EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2004): Impacts of Europe's changing climate. An indicator-based assessment. Luxembourg: Addison-Wesley.
- FRAHM, J.-P. (2006): Der Einfluss von Ammoniak auf Stickstoff liebende Flechten in verkehrsbelasteten Gebieten. In: Immissionsschutz 4: 164–167.
- FRANZEN-REUTER, I. (2004): Untersuchung zu den Auswirkungen atmosphärischer Stickstoffeinträge auf epiphytische Flechten und Moose im Hinblick auf die Bioindikation. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.
- GEBHARDT, H. (1996): Ecological and economic consequences of introduction of exotic wildlife (birds and mammals) in Germany. In: Wildl. Biol. 2, S. 205–211.
- GEBHARDT, H.; RAMMERT, U.; SCHRÖDER, W.; WOLF, H. (2010): Klima-Biomonitoring: Nachweis des Klimawandels und dessen Folgen für die belebte Umwelt. Neuer Schwerpunkt des Arbeitskreises Bioindikation/Wirkungsermittlung. In: Umweltwiss. Schadst. Forsch. 22, S. 7–19.
- HAUCK, M. (2011): Ammonium and nitrate tolerance in lichens. In: Environmental Pollution 158, S. 1127–1133.
- HICKLING, R.; ROY, D.B.; HILL, J.K.; FOX, R. (2006): The distribution of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. In: Global Change Biology 12, S. 450–455.
- HLNUG - HESSISCHES LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE (2018): Beobachteter Klimawandel. Infobroschüre des HLNUG. Aktualisierte Fassung. Wiesbaden.
- HLNUG - HESSISCHES LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE (2017): Lufthygienischer Jahresbericht 2016. Teil I: Kontinuierliche Messungen. Hg. v. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Wiesbaden.
- HLNUG - HESSISCHES LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE (2018): Online-Information zum Thema Stickstoffoxide.
<https://www.hlnug.de/themen/luft/luftschadstoffe/stickstoffoxide.html>
- INSAROV, G. (2002): A method for detecting large-scale environmental change with lichens. In: Scheidegger, P.L.; Nimis, C. und Wolseley, P.A. (Hg.): Monitoring with Lichens - Monitoring Lichens. Dordrecht: Kluwer, S. 399–403.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007): Climate Change 2005: Synthesis Report.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2013): Summary for Policy Makers.
- JÄGER, E. J. (1995): Klimabedingte Arealveränderungen von anthropochoren Pflanzen und Elementen der natürlichen Vegetation. In: Angewandte Landschaftsökologie 4, S. 51–57.
- JOHN, V.; STAPPER, N.; WINDISCH, U. (2017): Flechten als Klimawandelzeiger. Blog-Beitrag anlässlich des ersten Erscheinens der RL VDI 3957 Blatt 20.
<https://blog.vdi.de/2017/07/flechten-als-klimawandelzeiger/>

- KIRSCHBAUM, U. (2009): Flechtendauerbeobachtungsflächen Hessen 2007. Wiesbaden: Unveröff. Bericht im Auftrag des HLNUG.
- KIRSCHBAUM, U.; HANEWALD, K. (1998a): Biological indication of air pollution by lichen mapping in long time observation areas in Hesse/Germany. In: *Journal of Applied Botany* 72 (5-6), S. 212–227.
- KIRSCHBAUM, U.; HANEWALD, K. (1998b): Immissionsbezogene Flechtenkartierungen in hessischen Dauerbeobachtungsflächen. In: *Angewandte Botanik* 72, S. 212–227.
- KIRSCHBAUM, U.; HANEWALD, K. (2001): Veränderungen des Flechtenbewuchses in den hessischen Dauerbeobachtungsflächen Melsungen und Limburg zwischen 1997 und 1999. In: *Angewandte Botanik* 75, S. 20–30.
- KIRSCHBAUM, U.; HANEWALD, K. (2009): Flechten als Anzeiger der Luftgüte und des Klimawandels. Hg. v. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Wiesbaden. 47 S.
- KIRSCHBAUM, U.; WINDISCH, U. (1995): Beurteilung der lufthygienischen Situation Hessens mittels epiphytischer Flechten. *Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz* 171. 150 S.
- KIRSCHBAUM, U.; WINDISCH, U.; HANEWALD, K. (2010): Immissionsbezogene Flechtenkartierung in Hessen von 1992 - 2007. In: *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* 70 (4), S. 135–140.
- KIRSCHBAUM, U.; WIRTH, V. (2010): Flechten erkennen - Umwelt bewerten. Hg. v. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Wiesbaden. 204 S.
- KOWARIK, I. (2003): *Biologische Invasionen - Neophyten und Neozoen in Mitteleuropa*. Stuttgart: Ulmer.
- LFU – BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (2004): *Ammoniak und Ammonium*. Infobroschüre.
- LUBW - LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2008): *Ammoniak in der Umwelt. Messprogramme und Messergebnisse 2003-2007*. 1. Aufl.. Unter Mitarbeit von Y. Buchleither, D. Ahrens und C. Lutz-Holzhauser. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe.
- SCHMITZ, U.; STAPPER, N. J.; STEVENS, M.; DAHL, A.; LEISTEN, A. (2014): *Klimafolgenmonitoring Landeshauptstadt Düsseldorf 2013. Untersuchungen der Auswirkungen des Klimawandels auf ausgewählte Gruppen der Tier- und Pflanzenwelt*. Unveröff. Gutachten der Biologischen Station Haus Bürgel im Auftrag des Umweltamtes der Landeshauptstadt Düsseldorf in Kooperation mit der Unteren Landschaftsbehörde. Düsseldorf.
- SØCHTING, U. (2004): *Flavoparmelia caperata - a probable indicator of increased temperatures in Denmark*. In: *Graphis Scripta* 15, S. 53–56.
- STAPPER, N. J. (2017): *Luftbelastung in Gütersloh 2004 und 2016, ermittelt mit epiphytischen Flechten und Moosen als Bioindikatoren*. Unveröff. Gutachten im Auftrag der Stadtverwaltung Gütersloh.

- STAPPER, N. J.; FRANZEN-REUTER, I. (2018): Wirkung lokaler Klimaveränderungen auf baumbewohnende Flechten in Nordrhein-Westfalen zwischen 2001 und 2017. *Immissionsschutz* 3: 128–136.
- UBA – UMWELTBUNDESAMT (HRSG.) (2004): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs in Österreich. 2.1. Bd. 107, 02/2004. Wien.
- UBA - UMWELTBUNDESAMT (2018): Überschreitung der Belastungsgrenzen für Eutrophierung. Online-Information zum Thema Eutrophierung in Land-Ökosystemen. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/land-oekosysteme/ueberschreitung-der-belastungsgrenzen-fuer-0#textpart-1>
- VAN DOBBEN, H.F. (1996): Decline and recovery of epiphytic lichens in an agricultural area in The Netherlands (1900-1988). In: *Nova Hedwigia* 62(3–4): 477–485.
- VAN DOBBEN, H.F.; DE BAKKER, A.J. (1996): Re-mapping epiphytic lichen biodiversity in the Netherlands: effect of decreasing SO₂ and increasing NH₃. In: *Acta Botanica Neerlandica* 45(1): 55–71.
- VAN HERK, C.M. (1999): Mapping of ammonia pollution with epiphytic lichens in the Netherlands. In: *Lichenologist* 31 (1): 9–20.
- VAN HERK, C.M. (2009): Climate change and ammonia from cars as notable recent factors influencing epiphytic lichens in Zeeland, Netherlands. *Biodiversity and ecology of lichens*. In: *Bibliotheca Lichenologica* 99: 205–224.
- VAN HERK, C.M.; APTROOT, A.; VAN DOBBEN, H.F. (2002): Long-term monitoring in the Netherlands suggests that lichens respond to global warming. In: *Lichenologist* 34 (2), S. 141–154.
- VDI 3957 BLATT 2 (2003): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation). Verfahren der standardisierten Graskultur. In: *VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft* 1a.
- VDI 3957 BLATT 3 (2008): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation). Verfahren der standardisierten Exposition von Grünkohl. In: *VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft* 1a.
- VDI 3957 BLATT 8 (2015): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation). Flächenbestimmung epiphytischer Flechten zur immissionsökologischen Langzeitbeobachtung. In: *VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft* 1a.
- VDI 3957 BLATT 13 (2005): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen mit Flechten (Bioindikation). Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für Luftgüte. In: *VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft* 1a.
- VDI 3957 BLATT 17 (2009): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen (Bioindikation). Aktives Monitoring der Schwermetallbelastung mit Torfmoosen (Sphagnum-bag-technique). In: *VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft* 1a.

- VDI 3957 BLATT 20 (2017): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen mit Flechten (Biomonitoring). Kartierung von Flechten zur Ermittlung der Wirkung von lokalen Klimaveränderungen. In: VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft 1a.
- VORBECK, A.; WINDISCH, U.; EICHLER, M.; CEZANNE, R. (2009): Immissionsbezogene Flechtenkartierung Aschaffenburg unter besonderer Berücksichtigung des Straßenverkehrs. Wiederholungsuntersuchung 2008/09. Unveröff. Gutachten im Auftrag der Stadt Aschaffenburg.
- VORBECK, A.; WINDISCH, U.; EICHLER, M.; CEZANNE, R. (2016): Flechtenkartierung Aschaffenburg 2015 – Bewertung der lufthygienischen Situation und Bioindikation des Klimawandels.
- WALTHER, G.R.; BEISSNER, S.; BURGA, C.A. (2005): Trends in the upward shift of alpine plants. In: *Journal of Vegetation Science* 16 (5), S. 541–548.
- WINDISCH, U.; VORBECK, A. (2006): Nachweis von Klimaänderungen mit Flechten. Methodentwicklung für das Land Hessen. Wiesbaden: Unveröff. Gutachten im Auftrag des HLNUG.
- WINDISCH, U.; VORBECK, A.; EICHLER, M.; CEZANNE, R. (2011): Untersuchung der Wirkung des Klimawandels auf biotische Systeme mittels Flechtenkartierung in Bayern. Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.). Online verfügbar unter http://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_all_00098.htm
- WINDISCH, U.; MENZEL, M. (2013): Software zur Flächenberechnung von Epiphytenbeständen. *Herzogia* 26(2), S. 423-427.
- WINDISCH, U.; CEZANNE, R.; EICHLER, M. (2014): Dauerbeobachtung von Flechten in Hessen 2012. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.).
- WINDISCH, U.; VORBECK, A.; EICHLER, M.; CEZANNE, R. (2018): Dauerbeobachtung von Flechten in Hessen. Immissionsbezogene Flechtenkartierungen am Flughafen Frankfurt (Main) (1992-2017). Unveröff. Gutachten im Auftrag des HLNUG und der Gemeinnützige Umwelthaus GmbH.
- WIRTH, V. (1991): Zeigerwerte von Flechten. In: Ellenberg, H. et al. (Hg.): *Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa*. Göttingen: Goltze.
- WIRTH, V. (2010): Ökologische Zeigerwerte von Flechten - erweiterte und aktualisierte Fassung. In: *Herzogia* 23 (2), S. 229–248.
- WIRTH, V.; KIRSCHBAUM, U. (2014): *Flechten einfach bestimmen. Ein zuverlässiger Führer zu den häufigsten Arten Mitteleuropas*. Wiebelsheim: Quelle & Meyer.
- WIRTH, V.; HAUCK, M.; SCHULTZ, M. (2013): *Die Flechten Deutschlands*. Stuttgart: Ulmer. 2 Bände, 1244 S..

Anhang

Anhang 1: Artenliste

Anhang 2: Klima- und Stickstoffdepositionsdaten der
Untersuchungsflächen

Anhang 1: Artenliste

	licheni-	Vorkommen auf	
	color	Mauern	Bäumen
	Pilz		
<i>Acarospora fuscata</i> (Schrad.) Th. Fr.		x	
<i>Acarospora moenium</i> (Vain.) Räsänen		x	
<i>Acarospora nitrophila</i> H. Magn.		x	
<i>Acarospora umbilicata</i> Bagl.		x	
<i>Acarospora versicolor</i> Bagl. & Carestia		x	
<i>Agonimia opuntiella</i> (Buschardt & Poelt) Vězda		x	
<i>Agonimia tristicula</i> (Nyl.) Zahlbr.		x	
<i>Alyxoria varia</i> (Pers.) Ertz & Tehler		x	x
<i>Amandinea punctata</i> (Hoffm.) Coppins & Scheid.		x	x
<i>Anisomeridium polypori</i> (Ellis & Everh.) M. E. Barr			x
<i>Arthonia didyma</i> Körb.			x
<i>Arthonia phaeophysciae</i> Grube & Matzer	●		x
<i>Arthonia radiata</i> (Pers.) Ach.			x
<i>Bacidina arnoldiana</i> (Körb.) V. Wirth & Vězda		x	
<i>Bacidina caligans</i> (Nyl.) Vězda & Poelt			x
<i>Bacidina delicata</i> (Larbal. ex Leight.) V. Wirth & Vězda			x
<i>Bacidina neosquamulosa</i> (Aptroot & Herk) S. Ekman			x
<i>Bagliettoa spec.</i>		x	
<i>Bilimbia sabuletorum</i> (Schreb.) Arnold		x	
<i>Botryolepraria lesdainii</i> (Hue) Canals et al.		x	
<i>Bryoria fuscescens</i> (Gyelnik) Brodo & D. Hawksw.			x
<i>Buellia aethalea</i> (Ach.) Th. Fr.		x	
<i>Buellia griseovirens</i> (Turner & Borrer ex Sm.) Almb.			x
<i>Buelliella physciicola</i> Poelt & Hafellner	●		x
<i>Caloplaca albolutescens</i> (Nyl.) H. Olivier		x	
<i>Caloplaca arcis</i> (Poelt & Vězda) Arup		x	
<i>Caloplaca arnoldii ssp. obliterata</i> (Pers.) Gaya		x	
<i>Caloplaca aurantia</i> (Pers.) Hellb.		x	
<i>Caloplaca cerinella/cerinelloides</i>			x
<i>Caloplaca chlorina</i> (Flot.) H. Oliv.		x	x
<i>Caloplaca chrysodeta</i> (Vain. ex Räsänen) Dombro.		x	
<i>Caloplaca citrina</i> (Hoffm.) Th. Fr.		x	
<i>Caloplaca crenulatella</i> (Nyl.) H. Olivier		x	
<i>Caloplaca decipiens</i> (Arnold) Blomb. & Forssell		x	
<i>Caloplaca flavescens</i> (Huds.) J. R. Laundon		x	
<i>Caloplaca flavocitrina</i> (Nyl.) H. Olivier		x	x
<i>Caloplaca flavovirescens</i> (Wulfen) Dalla Torre & Sarnth.		x	
<i>Caloplaca grimmiae</i> (Nyl.) H. Olivier		x	
<i>Caloplaca holocarpa</i> (Hoffm.) A. E. Wade		x	x

	licheni-	Vorkommen auf	
	coler	Mauern	Bäumen
	Pilz		
<i>Caloplaca limonia</i> Nimis & Poelt		x	
<i>Caloplaca luteoalba</i> (Turner) Th. Fr.		x	
<i>Caloplaca oasis</i> (A. Massal.) Szatala		x	
<i>Caloplaca obscurella</i> (J. Lahm ex Körb.) Th. Fr.			x
<i>Caloplaca phlogina</i> (Ach.) Flagey			x
<i>Caloplaca pusilla</i> (A. Massal.) Zahlbr.		x	
<i>Caloplaca pyracea</i> (Ach.) Th. Fr.			x
<i>Caloplaca saxicola</i> (Hoffm.) Nordin		x	
<i>Caloplaca soralifera</i> Vondrák & Hrouzek		x	
<i>Caloplaca spec.</i>			x
<i>Caloplaca subpallida</i> H. Magn.		x	
<i>Caloplaca teicholyta</i> (Ach.) J. Steiner		x	
<i>Caloplaca ulcerosa</i> Coppins & P. James			x
<i>Caloplaca variabilis</i> (Pers.) Müll. Arg.		x	
<i>Caloplaca xerica</i> Poelt & Vězda		x	
<i>Candelaria concolor</i> (Dicks.) Stein			x
<i>Candelaria pacifica</i> M. Westb. & Arup.			x
<i>Candelariella aurella</i> (Hoffm.) Zahlbr.		x	x
<i>Candelariella medians</i> (Nyl.) A. L. Sm.		x	
<i>Candelariella reflexa s. l.</i> (Nyl.) Lettau			x
<i>Candelariella reflexa s. str.</i> (Nyl.) Lettau			x
<i>Candelariella vitellina</i> (Hoffm.) Müll. Arg.		x	x
<i>Candelariella xanthostigma</i> (Pers. ex Ach.) Lettau			x
<i>Carbonea vitellinaria</i> (Nyl.) Hertel	•	x	
<i>Catillaria chalybeia</i> (Borrer) A. Massal.		x	
<i>Catillaria nigroclavata</i> (Nyl.) Schuler			x
<i>Circinaria caesiocinerea</i> (Nyl. ex Malbr.) A. Nordin, S. Savić & Tibell		x	
<i>Circinaria calcarea</i> (L.) A. Nordin, S. Savić & Tibell		x	
<i>Circinaria contorta ssp. contorta</i> (Hoffm.) A. Nordin, S. Savić & Tibell		x	
<i>Circinaria contorta ssp. hoffmanniana</i> S. Ekman & Fröberg		x	
<i>Cladonia coniocraea</i> (Flörke) Spreng.		x	x
<i>Cladonia fimbriata</i> (L.) Fr.		x	x
<i>Cladonia pyxidata</i> agg.		x	x
<i>Coenogonium pineti</i> (Schrad.) Lücking & Lumbsch			x
<i>Collema crispum</i> (Huds.) Weber ex F. H. Wigg.		x	
<i>Collema fuscovirens</i> (With.) J. R. Laundon		x	
<i>Collema tenax</i> (Sw.) Ach. em. Degel.		x	
<i>Diploicia canescens</i> (Dicks.) A. Massal.			x
<i>Diploschistes scruposus</i> (Schreb.) Norman		x	
<i>Diplotomma alboatrum</i> (Hoffm.) Flot.		x	
<i>Endocarpon pusillum</i> Hedw.		x	

	licheni-	Vorkommen auf	
	coler Pilz	Mauern	Bäumen
<i>Evernia prunastri</i> (L.) Ach.			x
<i>Flavoparmelia caperata</i> (L.) Hale			x
<i>Flavoparmelia soredians</i> (Nyl.) Hale			x
<i>Gallowayella fulva</i> (Hoffm.) S. Y. Kondr. et al.			x
<i>Gyalecta carneola</i> (Ach.) Hellb.			x
<i>Gyalecta fagicola</i> (Hepp) Kremp.			x
<i>Halecania viridescens</i> Coppins & P. James			x
<i>Hyperphyscia adglutinata</i> (Flörke) H. Mayrhofer & Poelt		x	x
<i>Hypocenomyce scalaris</i> (Ach. ex Lilj.) M. Choisy			x
<i>Hypogymnia physodes</i> (L.) Nyl.			x
<i>Hypogymnia tubulosa</i> (Schaer.) Hav.			x
<i>Hypotrachyna afrorevoluta</i> (Krog & Swinscow) Krog & Swinscow			x
<i>Hypotrachyna revoluta</i> (Flörke) Hale			x
<i>Illosporopsis christiansenii</i> (B. L. Brady & D. Hawksw.) D. Hawksw.	●		x
<i>Lecania croatica</i> (Zahlbr.) Kotlov			x
<i>Lecania cyrtella</i> (Ach.) Th. Fr.			x
<i>Lecania erysibe</i> (Ach.) Mudd		x	
<i>Lecania hyalina</i> (Fr.) R. Sant.			x
<i>Lecania inundata</i> (Hepp ex Körb.) M. Mayrhofer		x	
<i>Lecania naegelii</i> (Hepp) Diederich & van den Boom			x
<i>Lecania rabenhorstii</i> (Hepp) Arnold		x	
<i>Lecania sylvestris</i> (Arnold) Arnold		x	
<i>Lecania turicensis</i> (Hepp) Müll. Arg.		x	
<i>Lecanora albescens</i> (Hoffm.) Branth & Rostr.		x	
<i>Lecanora antiqua</i> J. R. Laundon		x	
<i>Lecanora barkmaniana</i> Aptroot & Herk			x
<i>Lecanora campestris</i> (Schaer.) Hue		x	
<i>Lecanora carpineae</i> (L.) Vain.			x
<i>Lecanora chlarotera</i> Nyl.			x
<i>Lecanora compallens</i> Herk & Aptroot			x
<i>Lecanora conizaeoides</i> Nyl. ex Cromb.			x
<i>Lecanora crenulata</i> (Dicks.) Hook.		x	
<i>Lecanora dispersa</i> (Pers.) Röhl.		x	x
<i>Lecanora dispersa s.l.</i>		x	
<i>Lecanora dispersella</i> auct., non Steiner		x	
<i>Lecanora expallens</i> Ach.			x
<i>Lecanora flotoviana</i> Spreng.		x	
<i>Lecanora hagenii</i> (Ach.) Ach.		x	x
<i>Lecanora intumescens</i> (Rebent.) Rabenh.			x
<i>Lecanora muralis</i> (Pollich.) Ach.		x	
<i>Lecanora pannonica</i> Szatala		x	
<i>Lecanora persimilis</i> Th. Fr.			x

	licheni-	Vorkommen auf	
	coler	Mauern	Bäumen
	Pilz		
<i>Lecanora polytropa</i> (Ehrh. ex Hoffm.) Rabenh.		x	
<i>Lecanora pulicaris</i> (Pers.) Ach.			x
<i>Lecanora rupicola ssp. rupicola</i> (L.) Zahlbr.		x	
<i>Lecanora saligna</i> (Schrader) Zahlbr.			x
<i>Lecanora semipallida</i> H. Magn.		x	
<i>Lecanora sinuosa</i> Herk & Aptroot			x
<i>Lecanora subcarpineae</i> Szatala			x
<i>Lecanora subrugosa</i> Nyl.			x
<i>Lecanora sulphurea</i> (Hoffm.) Ach.		x	
<i>Lecanora symmicta</i> (Ach.) Ach.			x
<i>Lecanora varia</i> (Hoffm.) Ach.			x
<i>Lecidea fuscoatra</i> (L.) Ach.		x	
<i>Lecidea grisella</i> Flörke		x	
<i>Lecidella carpathica</i> Körb.		x	
<i>Lecidella elaeochroma</i> (Ach.) M. Choisy			x
<i>Lecidella flavosorediata</i> (Vězda) Hertel & Leuckert			x
<i>Lecidella scabra</i> (Taylor) Hertel & Leuckert		x	
<i>Lecidella stigmatea</i> (Ach.) Hertel & Leuckert		x	
<i>Lepraria incana</i> (L.) Ach.		x	x
<i>Lepraria lobificans</i> Nyl.		x	x
<i>Lepraria membranacea</i> (Dicks.) Vain.		x	
<i>Lepraria vouauxii</i> (Hue) R. C. Harris		x	x
<i>Leptogium plicatile</i> (Ach.) Leight.		x	
<i>Lobothallia radiosa</i> (Hoffm.) Hafellner		x	
<i>Melanelixia fuliginosa</i> (Lamy) O. Blanco et al.		x	
<i>Melanelixia glabratula</i> (Lamy) Sandler & Arup			x
<i>Melanelixia subargentifera</i> (Nyl.) O. Blanco et al.			x
<i>Melanelixia subaurifera</i> (Nyl.) O. Blanco et al.		x	x
<i>Melanohalea elegantula</i> (Zahlbr.) O. Blanco et al.			x
<i>Melanohalea exasperatula</i> (Nyl.) O. Blanco et al.			x
<i>Melanohalea laciniatula</i> (Flagey ex Oliv.) O. Blanco et al.			x
<i>Micarea denigrata</i> (Fr.) Hedl.			x
<i>Micarea prasina</i> agg. Fr.			x
<i>Monerolechia badia</i> (Fr.) Kalb		x	
<i>Normandina pulchella</i> (Borrer) Nyl.			x
<i>Ochrolechia androgyna</i> (Hoffm.) Arnold			x
<i>Ochrolechia arborea</i> (Kreyer) Almb.			x
<i>Ochrolechia parella</i> (L.) A. Massal.		x	
<i>Ochrolechia turneri</i> (Sm.) Hasselrot			x
<i>Opegrapha rufescens</i> Pers.			x
<i>Oxneria huculica</i> S.Y. Kondr.			x
<i>Paranectria oropensis</i> (Ces. ex Rabenh.) D. Hawksw. & Piroz.	●		x

	licheni-	Vorkommen auf	
	color	Mauern	Bäumen
	Pilz		
<i>Parmelia ernstiae</i> Feuerer & A. Thell			x
<i>Parmelia saxatilis</i> (L.) Ach.		x	x
<i>Parmelia submontana</i> Nád. ex Hale			x
<i>Parmelia sulcata</i> Taylor		x	x
<i>Parmelina pastillifera</i> (Harm.) Hale			x
<i>Parmelina quercina</i> (Willd.) Hale			x
<i>Parmelina tiliacea</i> (Hoffm.) Hale		x	x
<i>Parmeliopsis ambigua</i> (Wulfen) Nyl.			x
<i>Parmotrema perlatum</i> (Huds.) M. Choisy			x
<i>Pertusaria albescens</i> (Huds.) M. Choisy & Werner		x	
<i>Pertusaria amara</i> (Ach.) Nyl.			x
<i>Pertusaria coccodes</i> (Ach.) Nyl.		x	x
<i>Pertusaria corallina</i> (L.) Arnold		x	
<i>Pertusaria flavida</i> (DC.) J. R. Laundon			x
<i>Pertusaria pertusa</i> var. <i>pertusa</i> (Weigel) Tuck			x
<i>Phaeophyscia nigricans</i> (Flörke) Moberg		x	x
<i>Phaeophyscia orbicularis</i> (Necker) Moberg		x	x
<i>Phlyctis argena</i> (Sprengel) Flotow		x	x
<i>Physcia adscendens</i> H. Olivier		x	x
<i>Physcia aipolia</i> (Ehrh. ex Humb.) Fürnr.			x
<i>Physcia caesia</i> (Hoffm.) Fürnr.		x	x
<i>Physcia dubia</i> (Hoffm.) Lettau		x	x
<i>Physcia stellaris</i> (L.) Nyl.			x
<i>Physcia tenella</i> (Scop.) DC.		x	x
<i>Physciella chloantha</i> (Ach.) Essl.			x
<i>Physconia distorta</i> (With.) J. R. Laundon			x
<i>Physconia enteroxantha</i> (Nyl.) Poelt			x
<i>Physconia grisea</i> (Lam.) Poelt		x	x
<i>Physconia perisidiosa</i> (Erichsen) Moberg			x
<i>Piccolia ochrophora</i> (Nyl.) Hafellner			x
<i>Placopyrenium fuscillum</i> (Turner) Gueidan & Cl. Roux		x	
<i>Placynthium nigrum</i> (Huds.) Gray		x	
<i>Platismatia glauca</i> (L.) W. L. Culb. & C. F. Culb.			x
<i>Pleurosticta acetabulum</i> (Neck.) Elix & Lumbsch			x
<i>Polycauliona candelaria</i> L. Frödén, Arup & Söchting			x
<i>Polycauliona candelaria</i> s. l.			x
<i>Polycoccum pulvinatum</i> (Eitner) R. Sant.	●	x	
<i>Polysporina simplex</i> (Davies) Vězda		x	
<i>Polysporina subfuscescens</i> (Nyl.) K. Knudsen & Kocourk	●	x	
<i>Porpidia soledizodes</i> (Lamy ex Nyl.) J. R. Laundon		x	
<i>Porpidia tuberculosa</i> (Sm.) Hertel & Knoph		x	
<i>Protoblastenia rupestris</i> (Scop.) J. Steiner		x	

	licheni-	Vorkommen auf	
	coler	Mauern	Bäumen
	Pilz		
<i>Pseudevernia furfuracea</i> (L.) Zopf			x
<i>Psilolechia lucida</i> (Ach.) M. Choisy		x	
<i>Punctelia borreri</i> (Sm.) Krog			x
<i>Punctelia jeckeri</i> (Roum.) Kalb			x
<i>Punctelia subrudecta</i> (Nyl.) Krog			x
<i>Ramalina farinacea</i> (L.) Ach.			x
<i>Ramalina fastigiata</i> (Pers.) Ach.			x
<i>Ramalina fraxinea</i> (L.) Ach.			x
<i>Ramalina pollinaria</i> (Westr.) Ach.			x
<i>Ramalina spec.</i>			x
<i>Rhizocarpon distinctum</i> Th. Fr.		x	
<i>Rhizocarpon geographicum ssp. geographicum</i> (L.) DC.		x	
<i>Rhizocarpon reductum</i> Th. Fr.		x	
<i>Rinodina exigua</i> (Ach.) Gray			x
<i>Rinodina oleae</i> Bagl.		x	x
<i>Rinodina pityrea</i> Ropin & H. Mayrhofer		x	x
<i>Rinodina spec.</i>		x	
<i>Rinodina teichophila</i> (Nyl.) Arnold		x	
<i>Rusavskia elegans</i> (Link) S. Y. Kondr. & Kärnefelt		x	
<i>Sarcogyne privigna</i> (Ach) A. Massal.		x	
<i>Sarcogyne regularis</i> Körb.		x	
<i>Scoliciosporum chlorococcum</i> (Graewe ex Stenham.) Vězda			x
<i>Scoliciosporum galluræ</i> Vězda & Poelt			x
<i>Scoliciosporum umbrinum</i> (Ach.) Arnold		x	
<i>Staurothele frustulenta</i> Vain.		x	
<i>Strangospora pinicola</i> (A. Massal.) Körb.			x
<i>Taeniolella phaeophysciae</i> D. Hawksw.	●		x
<i>Tephromela atra var. atra</i> (Huds.) Hafellner		x	
<i>Toninia aromatica</i> (Turner ex Sm.) A. Massal.		x	
<i>Trapelia glebulosa</i> (Sm.) J. R. Laundon		x	
<i>Trapelia placodioides</i> Coppins & P. James		x	
<i>Tremella caloplacæ</i> (Zahlbr.) Diederich	●		x
<i>Tuckermannopsis chlorophylla</i> (Willd.) Hale			x
<i>Usnea dasopoga</i> (Ach.) Nyl.			x
<i>Usnea hirta</i> (L.) Weber ex F. H. Wigg.			x
<i>Usnea spec.</i>			x
<i>Verrucaria cf. calciseda</i> DC.			x
<i>Verrucaria elaeina</i> Borrer		x	
<i>Verrucaria macrostoma</i> Dufour ex DC.		x	
<i>Verrucaria muralis</i> Ach.		x	
<i>Verrucaria nigrescens</i> Pers.		x	
<i>Verrucaria nigrescens f. tectorum</i> (A. Massal.) Coppins & Aptroot		x	

	licheni-	Vorkommen auf	
	Pilz	Mauern	Bäumen
<i>Verrucaria viridula</i> (Schrad.) Ach.		x	
<i>Xanthoparmelia conspersa</i> (Ehrh. ex Ach.) Hale		x	
<i>Xanthoparmelia pulla</i> (Ach.) O. Blanco et al.		x	
<i>Xanthoparmelia verruculifera</i> (Nyl.) O. Blanco et al.		x	
<i>Xanthoria calcicola</i> Oxner		x	
<i>Xanthoria parietina</i> (L.) Th. Fr.		x	x
<i>Xanthoria polycarpa</i> (Hoffm.) Rieber			x
<i>Xanthoriicola physciae</i> (Kalchbr.) D. Hawksw.	•		x

Anhang 2: Klimadaten der Untersuchungsflächen

	JT30	JT10	FT30	ST30	HT30	WT30	JN30	JN10	FN30	SN30	HN30	WN30	JW20	JD30	JG30	Konti
Diemelstadt	8,5	8,5	7,5	16,5	8,5	0,5	750	750	162,5	212,5	187,5	187,5	3,25	9,5	575	16,25
Melsungen	8,5	8,5	7,5	16,5	8,5	0,5	750	750	187,5	212,5	187,5	162,5	3,25	9,3	575	16,75
Rhön	6,5	7,5	6,5	15,5	7,5	-1,5	1050	1050	236,5	262,5	262,5	262,5	4,75	8,7	475	17,25
Gießen	9,5	9,5	9,5	17,5	9,5	1,5	650	650	162,5	187,5	162,5	162,5	3,25	9,7	625	17,75
Limburg	9,5	9,5	9,5	17,5	9,5	1,5	650	650	162,5	187,5	187,5	187,5	3,25	9,5	625	17,25
Spessart	8,5	8,5	8,5	16,5	8,5	0,5	950	950	212,5	237,5	237,5	287,5	2,75	9,3	575	17,25
Biebesheim	10,5	10,5	10,5	19,5	10,5	2,5	650	650	162,5	187,5	162,5	137,5	3,25	10,1	625	18,25
Flughafen	10,5	10,5	10,5	19,5	10,5	2,5	650	650	162,5	187,5	162,5	137,5	2,75	9,9	625	18,25
Rheingau	9,5	9,5	9,5	17,5	9,5	1,5	650	650	162,5	187,5	162,5	162,5	3,25	9,9	625	16,75
Odenwald	8,5	8,5	8,5	16,5	8,5	0,5	1050	1050	262,5	237,5	262,5	287,5	3,75	9,1	575	17,25

Abkürzungen:

- JT30 Jahresmitteltemperatur 1981-2010 als 30-Jahresmittel
- JT10 Jahresmitteltemperatur 2001-2010 als 10-Jahresmittel
- FT30 Saisonale Mitteltemperatur Frühling 1981-2010 als 30-Jahresmittel
- ST30 Saisonale Mitteltemperatur Sommer 1981-2010 als 30-Jahresmittel
- HT30 Saisonale Mitteltemperatur Herbst 1981-2010 als 30-Jahresmittel
- WT30 Saisonale Mitteltemperatur Winter 1981-2010 als 30-Jahresmittel
- JN30 Jahressumme Niederschlag 1981-2010 als 30-Jahresmittel
- JN10 Jahressumme Niederschlag 2001-2010 als 10-Jahresmittel
- FN30 Saisonale Summe Niederschlag Frühling 1981-2010 als 30-Jahresmittel
- SN30 Saisonale Summe Niederschlag Sommer 1981-2010 als 30-Jahresmittel
- HN30 Saisonale Summe Niederschlag Herbst 1981-2010 als 30-Jahresmittel
- WN30 Saisonale Summe Niederschlag Winter 1981-2010 als 30-Jahresmittel
- Konti Kontinentalität, berechnet auf Basis der Temperatur im Referenzzeitraum 1961-1990

Auszug der Klimadaten aus Daten des DWD
nach Erläuterungen im Bericht zur Flechtenkartierung 2012
(WINDISCH ET AL. 2014)