



**Dauerbeobachtung
von Flechten 2022 in Hessen
sowie 2020 in den Städten
Wetzlar und Gießen**

**Ermittlung der Luftgüte
und der Wirkungen von lokalen
Klimaveränderungen**



Stamm von Zitterpappel mit Wand-Gelbflechte *Xanthoria parietina*
(Foto: Eichler/Cezanne)

Titel

Dauerbeobachtung von Flechten 2022 in Hessen
sowie in den Städten Wetzlar und Gießen
Ermittlung der Luftgüte und der Wirkung von lokalen
Klimaveränderungen

Auftraggeber

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und
Geologie

Dez. I 1 –Fachzentrum Klimawandel und Anpassung

Betreuung: Dr. Johanna Lenz

Rheingaustraße 186

65203 Wiesbaden



Projektleitung und Bearbeitung

Büro Fraxinus

Prof. Dr. rer. nat. Ute Windisch

Am Weidenborn 11, 35625 Hüttenberg



Kartierung

Bürogemeinschaft Angewandte Ökologie

Marion Eichler, Dipl.-Biologin

Kaupstraße 43

64289 Darmstadt

Büro für Vegetationskunde und Lichenologie

Rainer Cezanne, Dipl.-Biologe

Kaupstraße 43

64289 Darmstadt

Büro Fraxinus

Prof. Dr. rer. nat. Ute Windisch

Hüttenberg, den 04.08.2024

Glossar

DBF	Dauerbeobachtungsfläche des Flechten-Biomonitorings
Epiphyten	auf anderen Pflanzen wachsende Pflanzen; hier für baumbewohnende Flechten verwendet
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 in einem Flechtenaufnahmegitter
FDW _{KWZ}	Flechten-Diversitätswert der Klimawandelzeiger; wird ermittelt aus der Anzahl der klimawandelzeigenden Flechtenarten und ihrer Häufigkeit in einem Flechtenaufnahmegitter
FDW _{Ref}	Flechten-Diversitätswert der Referenzarten; wird ermittelt aus der Anzahl der immissionsempfindlichen Flechtenarten und ihrer Häufigkeit in einem Flechtenaufnahmegitter
Flechte	Lebensgemeinschaft aus einem Pilz und einem Photosynthese betreibenden Partner (Alge oder Cyanobakterium)
Klimabäume	freistehende Laubbäume, auf deren Stamm Flechten zum Monitoring lokaler Klimawirkungen kartiert werden
KWI	Klimawandelzeiger-Index; 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
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
s. lat.	Abkürzung für sensu lato: im weiten Sinne
s. str.	Abkürzung für sensu stricto: im engen Sinne
UF	Untersuchungsfläche; aufgrund der Fragestellung zusätzlich zu den DBF eingerichtete Flächen (Flughafen, Rheingau, Odenwald)
VDI-Bäume	standardisierte Trägerbäume nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13
WZI	Wärmezeigerindex; wird errechnet aus der mittleren Anzahl wärmezeigender Arten auf den untersuchten Mauern

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	13
2	Einleitung und Projektziele	17
3	Luftgüte und Klimawandel	18
	3.1 Luftgüte	18
	3.2 Folgen des Klimawandels.....	18
	3.3 Auswirkungen des Klimawandels auf die Biodiversität.....	20
	3.4 Biomonitoring des Klimawandels mit Flechten	21
4	Methoden	23
	4.1 Datenbestand und Messnetz der Dauerbeobachtung von Flechten in ländlichen Gebieten Hessens	23
	4.2 Datenbestand und Messnetz der Flechtenkartierungen in Wetzlar und Gießen	26
	4.3 Dokumentation der Substrat- und Flechtendaten	27
	4.4 Nutzung von Klima- und Depositionsdaten	27
	4.5 Darstellung der Ergebnisse als Boxplots	27
	4.6 Luftgüte-Biomonitoring.....	28
	4.6.1 Flechtenkartierung nach VDI 3957 Blatt 13	28
	4.6.2 Folienverfahren nach VDI 3957 Blatt 8	35
	4.6.3 Messung von Borken-pH-Werten	37
	4.7 Klimawandel-Biomonitoring.....	38
	4.7.1 Qualitative Erfassung der Flechten am Stamm von „Klimabäumen“	39
	4.7.2 Quantitative Erfassung der Flechten im Aufnahmegitter.....	40
	4.7.3 Erfassung der Flechten auf Mauern.....	40
	4.7.4 Datenauswertung.....	42
5	Ergebnisse und Diskussion	47
	5.1 Untersuchte Trägerbäume und Mauern	47
	5.1.1 Trägerbäume und Mauern in den ländlichen Untersuchungsgebieten (DBF).....	47
	5.1.2 Trägerbäume in Wetzlar und Gießen	50
	5.2 Flechtenarten	51
	5.3 Mittels Flechten ermittelte Luftgüte in den ländlichen Gebieten Hessens (DBF).....	58
	5.3.1 Flechtenkartierung nach VDI 3957 Blatt 13	59
	5.3.2 Folienverfahren nach VDI 3957 Blatt 8.....	93
	5.4 Luftgüteuntersuchungen in den Städten Wetzlar und Gießen	98
	5.4.1 Entwicklung der Immissionsbelastung.....	98
	5.4.2 Aktuelle Flechten-Luftgütekarte von Wetzlar und Gießen	101
	5.4.3 Zeitliche Entwicklung der Luftgüte in Wetzlar und Gießen	103
	5.4.4 Entwicklung der Borken-pH-Werte in den Städten Wetzlar und Gießen	109

5.5	Wirkungen von lokalen Klimaveränderungen in den ländlichen Dauerbeobachtungsflächen Hessens	117
5.5.1	Klimawandelzeiger-Index (KWI), erhoben an Baumstämmen.....	117
5.5.2	Flechten-Diversitätswert der Klimawandelzeiger (FDW _{KWZ}), erhoben im Aufnahmegeritter.....	121
5.5.3	Wärmezeiger-Index (WZI), erhoben an Mauern.....	122
5.6	Empfehlungen für das Biomonitoring mit Flechten in Hessen	125
6	Literaturverzeichnis.....	127
7	Anhang.....	134

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Jahresmittelwerte der Temperatur in Hessen (DWD 2024)	19
Abb. 2: Jahresmittelwerte des Niederschlags in Hessen (DWD 2024).....	20
Abb. 3: Lage der Flechten-Dauerbeobachtungsflächen (gelb) und der zusätzlichen Untersuchungsflächen (orange) in Hessen.....	24
Abb. 4: Messnetz einer Dauerbeobachtungsfläche (Beispiel der DBF Spessart)	25
Abb. 5: Luftbildausschnitt mit kartierten Bäumen und Mauern, DBF Melsungen.....	27
Abb. 6: Schema eines Boxplot-Diagramms	28
Abb. 7: Grunddatenerfassung am Baum	30
Abb. 8: Bewertungsmatrix zur Ermittlung des Luftgüteindex	33
Abb. 9: Beispiel einer gescannten Folie.....	36
Abb. 10: Ansicht der Benutzeroberfläche von ‚LiMo-Analyse‘ während der Auswertung	36
Abb. 11: Trägerbäume des Klimawandel- Biomonitorings	39
Abb. 12: Mauern für die Flechtenkartierung	41
Abb. 13: Baumartenspektrum der Luftgüteuntersuchung 2022 für die ländlichen DBF	47
Abb. 14: Entwicklung des Anteils häufig untersuchter Baumarten	48
Abb. 15: Spektrum der Baumaterialien der untersuchten Mauern zum Klimawandel- Biomonitoring 2022	49
Abb. 16: Spektrum der Trägerbaumarten in der Kartierung Wetzlar und Gießen 2020	50
Abb. 17: Prozentualer Anteil des Rote-Liste-Status der an Trägerbäumen und Mauern gefundenen Flechtenarten für alle Untersuchungen im vorliegenden Bericht.....	51
Abb. 18: Gefährdete Flechtenarten in Hessen mit Rote-Liste-Kategorie 2	52
Abb. 19: Zeitliche Entwicklung der Artenzahlen zwischen 1985 und 2020.....	53
Abb. 20: Entwicklung der Frequenz der acidophytischen Flechtenarten <i>Lecanora</i> <i>conizaeoides</i> und <i>Hypogymnia physodes</i> im Aufnahmegitter	54
Abb. 21: Entwicklung der Frequenz der eutrophierungstoleranten Flechtenarten <i>Phaeophyscia nigricans</i> , <i>Phaeophyscia orbicularis</i> und <i>Xanthoria parietina</i> im Aufnahmegitter	56
Abb. 22: Entwicklung der Frequenz der Luftgütezeiger <i>Parmelia sulcata</i> und <i>Ramalina</i> <i>farinacea</i> im Aufnahmegitter.....	57
Abb. 23: Entwicklung der Frequenz der Klimawandelzeiger <i>Punctelia</i> spp. (<i>P.borreri/jeckeri/subrudecta</i>) und <i>Melanohalea elegantula</i> im Aufnahmegitter....	58

Abb. 24: Mittels Flechten ermittelte Luftgüte auf den hessischen Dauerbeobachtungsflächen 2022.....	59
Abb. 25: DBF Diemelstadt - Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2022	60
Abb. 26: DBF Diemelstadt - Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017.....	61
Abb. 27: DBF Diemelstadt - Luftgütekarte 2022.....	62
Abb. 28: DBF Melsungen - Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2022.....	63
Abb. 29: DBF Melsungen - Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017	64
Abb. 30: DBF Melsungen - Luftgütekarte 2022	65
Abb. 31: DBF Rhön - Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2022.....	66
Abb. 32: DBF Rhön - Entwicklung der Luftgüte von 1992-201	67
Abb. 33: DBF Rhön - Luftgütekarte 2022	68
Abb. 34: DBF Gießen - Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2022.....	69
Abb. 35: DBF Gießen - Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017.....	70
Abb. 36: DBF Gießen - Luftgütekarte 2022.....	71
Abb. 37: DBF Limburg - Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2022.....	72
Abb. 38: DBF Limburg - Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017	73
Abb. 39: DBF Limburg - Luftgütekarte 2022	74
Abb. 40: DBF Spessart - Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2022	75
Abb. 41: DBF Spessart - Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017.....	76
Abb. 42: DBF Spessart - Luftgütekarte 2022.....	77
Abb. 43: DBF Biebesheim - Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2022.....	78
Abb. 44: DBF Biebesheim - Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017	79
Abb. 45: DBF Biebesheim - Luftgütekarte 2022	80
Abb. 46: Untersuchungsfläche Flughafen - Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2022	81
Abb. 47: Untersuchungsfläche Flughafen - Entwicklung der Luftgüte von 1992-2022.....	82
Abb. 48: Untersuchungsfläche Flughafen - Luftgütekarte 2022.....	83
Abb. 49: Zeitlicher Verlauf der Flechten-Diversitätswerte (FDW) der Referenzarten und Eutrophierungszeiger für alle DBF	85
Abb. 50: Entwicklung der Luftgüte, dargestellt anhand der mittleren Flechten-Luftgüteklassen der Dauerbeobachtungsflächen	85
Abb. 51: Zeitlicher Verlauf der Stickstoffdioxid und der Stickstoffmonoxid-Konzentrationen an Luftmessstationen in verschiedenen hessischen Regionen	87

Abb. 52: Stickstoffverbindungen, Vorkommen und Wirkungen	88
Abb. 53: Emission, Dispersion, vertikaler und horizontaler Transport, chemische Reaktion und Deposition von Ammoniak und Ammonium.....	90
Abb. 54: Ergebnisse aus Staubanalysen.....	90
Abb. 55: Entwicklung der Ammoniakkonzentrationen in verschiedenen Gebieten Deutschlands	91
Abb. 56: Flechten-Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger im Jahr 2022 und Stickstoffdeposition.....	92
Abb. 57: Entwicklung des Deckungsgrades von <i>Phaeophyscia orbicularis</i> aus Folienaufnahmen ausgewählter Bäume	94
Abb. 58: Entwicklung des Deckungsgrades von <i>Xanthoria parietina</i> aus Folienaufnahmen ausgewählter Bäume	95
Abb. 59: Entwicklung des Deckungsgrades von <i>Hypogymnia physodes</i> aus Folienaufnahmen ausgewählter Bäume	96
Abb. 60: Entwicklung des Deckungsgrades von <i>Parmelia sulcata</i> aus Folienaufnahmen ausgewählter Bäume	97
Abb. 61: Entwicklung der Schwefeldioxidgehalte in Wetzlar/Gießen	98
Abb. 62: Entwicklung der Staubdeposition in Wetzlar und Gießen seit 1970.....	99
Abb. 63: Jahresmittelwerte der Staubdeposition in Wetzlar und Gießen von 2000 - 2022. ..	100
Abb. 64: Jahresmittelwerte der Feinstaubkonzentration in Wetzlar und Gießen.....	100
Abb. 65: Flechten-Luftgütekarte von Wetzlar und Gießen 2020.....	101
Abb. 66: Legende zur Luftgütebewertung	101
Abb. 67: Üppiger Flechtenbewuchs in Gießen- Rödgen mit Luftgütezeigern wie <i>Evernia prunastri</i> , <i>Parmelia sulcata</i> und <i>Hypogymnia physodes</i>	102
Abb. 68: Prozentuale Verteilung der Luftgüteklassen in Wetzlar und Gießen seit 1985	104
Abb. 69: Flechten-Luftgütekarten von Wetzlar und Gießen 2010-2015.....	105
Abb. 70: Flechten-Luftgütekarten von Wetzlar und Gießen 1985 bis 2005	106
Abb. 71: Zeitliche Entwicklung des Flechten-Diversitätswertes der Referenzarten und der Eutrophierungszeiger in Wetzlar und Gießen.....	108
Abb. 72: Zeitliche Entwicklung der Borke-pH-Werte von Linde in Wetzlar und Gießen von 1970 bis 2020	111
Abb. 73: Zeitliche Entwicklung der Borke-pH-Werte von Apfelbaum in Wetzlar und Gießen von 1970 bis 2020.....	112
Abb. 74: Zeitliche Entwicklung der Borke-pH-Werte von Pappel in Wetzlar und Gießen von 1970 bis 2020	113

Abb. 75: Zeitliche Entwicklung der Borke-pH-Werte von Bergahorn in Wetzlar und Gießen von 1970 bis 2020.....	114
Abb. 76: Zeitliche Entwicklung der Borke-pH-Werte von Spitzahorn in Wetzlar und Gießen von 1970 bis 2020.....	115
Abb. 77: Zeitliche Entwicklung der Borke-pH-Werte von Esche in Wetzlar und Gießen von 1970 bis 2020.....	116
Abb. 79: Mittlere Häufigkeit der Klimawandelzeiger in 2022 an Klimabäumen für alle Dauerbeobachtungsflächen in Hessen.....	117
Abb. 80: Klimawandelzeiger in Hessen (links : Gefleckte Punktflechte (<i>Punctelia subrudecta</i>); rechts : Caperatflechte (<i>Flavoparmelia caperata</i>)	118
Abb. 81: Entwicklung des Klimawandelzeiger-Indexes 2007-2022.....	119
Abb. 82: Entwicklung des Klimawandelzeiger-Index (KWI) von 2007 bis 2022 aus der Kartierung von Baumstämmen standardisierter Trägerbäume	120
Abb. 83: Entwicklung des Flechten-Diversitätswertes der Klimawandelzeiger (FDW _{KWZ}) von 1992-2022 im Aufnahmegeritter standardisierter Trägerbäume	121
Abb. 84: Entwicklung des Wärmezeigerindex von 2007-2012 an jeweils 30 Mauerabschnitten.....	122
Abb. 85: Mittlere Häufigkeit der wärmezeigenden Flechtenarten in 2022 aus der Kartierung von Mauern für alle Dauerbeobachtungsflächen	123
Abb. 86: Wärmezeiger auf Mauern in Hessen	124

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Monitoringprogramm der Flechten-Dauerbeobachtung	23
Tab. 2: Anzahl der untersuchten Flächen der Luftgütekartierung zwischen 1992 und 2022...	25
Tab. 3: Anzahl kartierter Messflächen in Wetzlar und Gießen von 1985 bis 2020	26
Tab. 4: Baumarten der Gruppe 1 nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 (2023).....	29
Tab. 5: Vergleich der Listen der Eutrophierungszeiger nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 der Erscheinungsjahre 2005 und 2023	32
Tab. 6: Liste der definierten Klimawandelzeiger nach VDI 3957 Blatt 20 (2017).....	43
Tab. 7: Wärmezeigerarten, die auf Rinde und/oder Gestein siedeln.....	45
Tab. 8: Baumartenspektrum des Klimawandel-Biomonitorings in 2022.....	49
Tab. 9: Auswahl von Trägerbäumen zur Darstellung der Ergebnisse des Folienvorgangs ...	93
Tab. 10: Zeitliche Entwicklung der Borken-pH-Werte in Wetzlar und Gießen seit 1985 ...	109
Tab. 11: Entwicklung des Klimawandelzeiger-Index (KWI) der hessischen Dauerbeobachtungsflächen	119

1 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht informiert über die Fortführung der Flechten-Dauerbeobachtung in Hessen. Das Biomonitoring-Programm des HLNUG besteht seit nunmehr rund 30 Jahren. Seit dem Jahr 1992 werden im fünfjährigen Turnus ausgewählte Trägerbäume von sieben Dauerbeobachtungsflächen (DBF) auf ihren Flechtenbewuchs überprüft. Seit 2007 werden drei weitere Gebiete sowie an allen DBF zusätzlich Mauern hinsichtlich ihres Flechtenbewuchses untersucht.

Weiterhin finden langjährige Untersuchungen der mittelhessischen Städte Wetzlar und Gießen statt, über die hier berichtet wird.

Die Ergebnisse aller Untersuchungen erlauben Rückschlüsse auf Aspekte der Umweltqualität. Standen zu Beginn der Untersuchungen die Wirkungen saurer Luftverunreinigungen im Vordergrund, so haben sich die Möglichkeiten der Umweltbewertung durch die Flechtenkartierung bis heute kontinuierlich weiterentwickelt. 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 auf einer Aufnahmefläche von 20 x 50 cm am Mittelstamm standardisierter Trägerbäume. Weiterhin wird zur detaillierten Dokumentation der Flechtenbestände das Folienvorverfahren angewendet, bei dem der Flechtenbewuchs am Mittelstamm ausgewählter Bäume auf einer Folie festgehalten wird. Auf den DBF ist im Jahr 2007 das Klimawandel-Biomonitoring aufgenommen worden, in diesem Zuge wurden neben Mauern auch ganze Baumstämme bis in 2 m Höhe auf ihre Flechten untersucht.

Die Städte Wetzlar und Gießen werden seit 1985 einer regelmäßigen Betrachtung unterzogen. In einem dichten Messnetz von 1 x 1 km werden Flechten an Trägerbäumen untersucht und der Borken-pH-Wert der Bäume gemessen.

Flechtendiversität

Auf den ländlich gelegenen Dauerbeobachtungsflächen wurden 1.836 Objekte (Bäumen oder Mauern) auf ihren Flechtenbewuchs untersucht. In den Städten Wetzlar und Gießen waren es insgesamt 1.095 untersuchte Bäume. In beiden Teilprojekten wurden insgesamt 247 Flechtentaxa erfasst, die im Anhang gelistet sind.

Mit *Xanthomendoza oregana* gelang ein Neufund einer Flechtenart für das Bundesland Hessen (Cezanne et al. 2024). Erfreulicherweise konnten die bekannten Vorkommen der naturschutzfachlich bedeutsamen Arten *Kuettlingeria xerica* (*Caloplaca x.*) und *Parmelina quercina* 2022 bestätigt werden, während die Population von *Caloplaca luteoalba* im Spessart nicht mehr existiert. Der Wuchsort von *Kuettlingeria xerica* bei Lorch (Mittelrheintal) ist immer noch 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.

Flechten-Luftgüte in den ländlichen Gebieten Hessens (DBF)

Als Ergebnis der Luftgütekartierung werden für jede DBF eine Karte mit den Luftgüteindizes der Messflächen erstellt und die zeitliche Entwicklung der Luftgüte dargestellt. Mit der Neuauflage der VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 im Jahr 2023 wurden die Grunddaten aller Kartierungsdurchgänge neu berechnet. Diskutiert werden zusätzlich die Änderungen der Luftgütebewertung, die aufgrund der neuen Vorgaben auch rückwirkend für die zurückliegenden Jahre notwendig wurden.

Der günstige Trend in der Entwicklung der Luftgüteindizes seit 1992, der bis 2012 für die meisten Dauerbeobachtungsflächen festgestellt werden konnte, hat sich in den vergangenen zehn Jahren abgeschwächt (vgl. Abb. 50). Gerade in den letzten fünf Jahren hat sich die lufthygienische Situation auf den meisten untersuchten Dauerbeobachtungsflächen in Hessen sogar verschlechtert. Auf der Dauerbeobachtungsfläche Diemelstadt ist keine Änderung eingetreten und auf der DBF Melsungen ist die Bewertung in 2022 günstiger als noch fünf Jahre zuvor. Auf der DBF Biebesheim wird die Luftgüte als vergleichsweise ungünstig bewertet, während die höchsten Luftgüteindizes auf den ballungsraumfernen DBF Spessart und Rhön erzielt werden.

Da der Luftgüteindex, neben eutrophierenden, insbesondere auch die Wirkungen der sauren Luftverunreinigungen widerspiegelt, wäre eine positivere Entwicklung bei den Flechten zu erwarten gewesen, denn die Konzentrationen der säurebildenden Immissionen wie etwa der Stickstoffoxide sind in Hessen weiter rückläufig. Hier sind Erfolge eingetreten durch die Minderung der Emissionen im Verkehrssektor aufgrund des zunehmenden Anteils emissionsärmerer Fahrzeuge, sowie durch Luftreinhaltepläne für Städte. So haben augenscheinlich andere Schadstoffgruppen einen negativen Einfluss auf den mittels Flechten ermittelte Luftgüteindizes.

Um die relevanten Schadstoffgruppen einzugrenzen, wurde die zeitliche Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte der bekannten ökologischen Gruppen „Referenzarten“ und „Eutrophierungszeiger“ betrachtet. Bei den Referenzarten ist ein Anstieg der Flechten-Diversitätswerte als Verbesserung der Luftgüte zu werten, während dieser bei den eutrophierungstoleranten Flechtenarten zunehmende Auswirkungen luftgetragener Nährstoffverbindungen anzeigt. Betrachtet man die Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte in Hessen, so sind die Werte für Referenzarten im letzten Betrachtungszeitraum nur geringfügig angestiegen, während die Diversitätswerte für Arten, die durch einen übermäßigen Nährstoffeintrag gefördert werden, von 2017 bis 2022 deutlich zugenommen haben (Abb. 49). In den letzten zehn Jahren hat sich die Dominanz der Eutrophierungszeiger gegenüber der Referenzarten weiter verstärkt. So ist festzuhalten, dass die zunehmenden Wirkungen eutrophierender Immissionen (z. B. Ammoniak und Stickstoffoxide) offenbar einer Verbesserung der lufthygienischen Situation entgegenstehen.

Es liegen keine kleinräumigen und umfassenden Daten zum Eintrag reaktiver Stickstoffverbindungen vor. Daher ist der durch die Flechten angezeigte Anstieg eutrophierender Wirkungen nicht durch lokale technische Messungen zu untermauern. Es ist dennoch festzuhalten, dass die

düngenden Effekte sich bis heute weiter verstärken. Diese Beobachtung deckt sich mit der Einschätzung des Umweltbundesamtes, wonach weite Teile Deutschlands unter zu hohen Stickstoffeinträgen leiden. Eine Reduktion des Eintrags reaktiver Stickstoffverbindungen ist auch für Hessen anzustreben, um empfindliche Ökosysteme zu erhalten.

Die Ergebnisse des Folienvorgangs unterstützen die Aussagen der Kartierung und liefern weitere Daten, hier zur prozentualen Deckung der Arten auf einer definierten Fläche. Die Wirkungen der eutrophierenden Luftschadstoffe manifestieren sich auch hier in einer Verschiebung der Flächendeckung eutrophierungstoleranter Arten, die in der vorliegenden Arbeit mit der Wand-Gelbflechte (*Xanthoria parietina*), einem typischen Eutrophierungszeiger, dargestellt wird. Für eutrophierungsempfindliche Arten hingegen, wie beispielsweise die Gewöhnliche Blasenflechte (*Hypogymnia physodes*), wird ein Rückgang der mittleren Deckung gezeigt. Es wird angenommen, dass die durch düngende Verbindungen geförderten eutrophierungstoleranten Arten einen Konkurrenzvorteil besitzen und die Referenzarten verdrängen können.

Klimawandel-Biomonitoring in den ländlichen Gebieten Hessens (DBF)

Das Klimawandel-Biomonitoring umfasst die Kartierung von Flechten an Bäumen und Mauern. Zur Auswertung der Baumdaten wird die VDI-Richtlinie zum Klimawandel-Biomonitoring herangezogen, in der zwei Auswertungsmethoden (KWI und FDW_{KWZ}) angeboten werden. In beiden Varianten werden wärmeliebende und (sub)atlantische Flechtenarten betrachtet, die durch Änderungen des Lokalklimas häufiger oder sogar neu vorkommen. Aktuell werden 15 der nach Richtlinie gelisteten 45 Klimawandelzeiger auf den Untersuchungsflächen angetroffen und damit eine Art mehr als noch fünf Jahre zuvor.

Die Ergebnisse aus den Kartierungen der Bäume zeigen mit beiden Methoden (KWI und FDW_{KWZ}), dass der Wandel der Bestände klimawandelzeigender Flechtenarten bisher insbesondere in den südlichen Landesteilen Hessens stattgefunden hat. Die Häufigkeit der Klimawandelzeiger hat sich dort auf allen untersuchten Flächen erhöht. Besonders interessant ist hier das Gebiet um den Flughafen, das schon 2007 deutlich mehr dieser Zeigerarten aufwies und deren Anteil sich bis 2022 noch weiter gesteigert hat. Der Flughafen gehört mit Biebesheim zu den wärmsten und niederschlagsärmsten der untersuchten Gebiete in Hessen. Für die DBF Spessart und Odenwald (beide liegen im Süden Hessens) wurde ein signifikanter Anstieg des Klimawandelzeiger-Index (KWI) von 2017-2022 gefunden (Tab. 11). Für diese DBF sind in einem Zeitraum von fünf Jahren – statistisch abgesichert – veränderte lokalklimatische Wirkungen aufgetreten.

Die Untersuchung der Flechten auf Mauern wurde seit 2007 nun zum vierten Mal durchgeführt. Auf den zehn Untersuchungsflächen wurden insgesamt 300 Mauerabschnitte inspiziert. Dabei wurden 128 Flechtentaxa erfasst.

Zur Auswertung der Mauerflechten-Daten gibt es keine entsprechende VDI-Richtlinie. Es wurden Temperaturzeigerwerte nach WIRTH herangezogen. So erfolgte die Berechnung eines Wärmezeiger-Indexes, der die mittlere Häufigkeit von wärmeliebenden Flechtenarten darstellt. Die Entwicklung des Indexes seit Beginn der Untersuchung in 2007 wurde dargestellt. Auf den im Südwesten liegenden Untersuchungsflächen (Limburg, Biebesheim und Rheingau) resultierte ein

höherer Wärmezeiger-Index als im übrigen Hessen. Im Gegensatz zu den Untersuchungen auf Bäumen ist jedoch bis heute keine Veränderung, wie zum Beispiel zugunsten von Wärme-zeigern, erkennbar. Auch das Gebiet um den Flughafen zeigt in den vergangenen Jahren, im Gegensatz zu den Flechten auf Klimabäumen, keinen Anstieg des Index in den vergangenen fünf Jahren.

Flechten-Luftgüte und Borken-pH-Werte in Wetzlar und Gießen

In den mittelhessischen Städten Wetzlar und Gießen wurde im Jahr 2020 eine Flechtenkartierung auf insgesamt 118 Messflächen vorgenommen. Die Bewertung der Luftgüte und des Einflusses eutrophierender Verbindungen wurde in einer Luftgütekarte dargestellt (Abb. 65). In Wetzlar wurden drei Flächen mit einer sehr geringen Luftgüte gefunden. Die höheren lufthygienischen Belastungen konzentrieren sich im industriell geprägten Norden des Stadtgebietes. Günstiger stellt sich die Situation im Nordwesten und Süden Wetzlars dar, wo die Luftgütestufe „hoch“ erreicht wird. In Gießen sind drei Messflächen im Nordwesten der Stadt mit einer nur „sehr geringen“ Luftgüte bewertet worden. Die Luftgütestufe „hoch“ und „sehr hoch“ wird in Gießen kleinräumig im Nordosten und im Süden der Stadt erreicht.

Die zeitliche Entwicklung der Luftgüte beider Städte seit 1985 wird in Karten dargestellt. Zu Beginn der Untersuchungen stellte sich die lufthygienische Situation als sehr ungünstig dar. Besonders in Wetzlar folgte von 1985 bis 1995 eine deutliche Erholung der Flechtenbestände. Die Mitte der 1985er Jahre greifenden Luftreinhaltemaßnahmen bewirkten deutliche Verbesserungen in der ehemals industriell geprägten Stadt. Bis zum Jahr 2005 sind sowohl in Wetzlar als auch in Gießen auf den meisten Messflächen eine mäßige Luftgüte erreicht worden, die bis heute andauert (Abb. 68). Verbesserte sich die durch Flechten angezeigte Luftgüte bis 2010 noch weiter, stagniert die Entwicklung der Luftgüte danach. In den letzten Jahren hat sie sich nicht weiter verbessert. Als Hauptursache werden Wirkungen eutrophierender Luftbestandteile angesehen, die nährstofftolerante Flechtenarten stark fördern. Dies geht negativ in die Bewertung der Luftgüte ein.

Die Borken-pH-Werte werden in Wetzlar und Gießen regelmäßig jeweils in den Jahren der Flechtenkartierung gemessen. Seit 1985 wurden Trägerbäume mehrerer Baumarten beprobt, für die Linde liegen sogar Werte seit 1970 vor. Im Laufe der Untersuchungen wurde bei allen Baumarten ab 1985 ein Anstieg der Borken-pH-Werte dokumentiert. Zu Beginn der Untersuchungen lag eine immissionsbedingte Ansäuerung der Borken vor, die im Laufe der Jahre durch die gesetzlichen Regelungen in der Luftreinhaltung gemindert wurde. Es wird diskutiert, inwieweit die aktuelleren Borken-pH-Werte durch stadtypische alkalische Stäube beeinflusst werden.

Empfehlungen

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 der Klimawandelwirkungen kontinuierlich weiter verfolgen zu können. Sämtliche erhobenen Grunddaten stehen in Zukunft, auch für neue Fragestellungen, zur Verfügung.

2 Einleitung und Projektziele

Das HLNUG 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 für Hessen beschriebene Trend wird auf eine erhöhte Nährstoffverfügbarkeit an den untersuchten Flechtenstandorten zurückgeführt.

Zu den bisherigen Aufgaben des Wirkungsnachweises von Immissionen kam seit 2007 noch das Klimawandel-Biomonitoring hinzu. Auch hier erweisen sich Flechten als aussagekräftige Indikatoren für ein langfristiges Biomonitoring.

Die Fortführung der Flechten-Dauerbeobachtung 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 auf sieben Dauerbeobachtungsflächen in Hessen
- Integration der Ergebnisse aus den immissionsbezogenen Flechtenkartierungen auf der zusätzlichen Untersuchungsfläche am Flughafen Frankfurt aus den Jahren 2007, 2012 und 2017
- Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich der Luftgüte und dem Einfluss eutrophierender Verbindungen
- Dokumentation der Entwicklung der Luftgüte (1992, 1997, 2002, 2007, 2012, 2017, 2022)
- Erstellung, Auswertung und Interpretation von detaillierten Folienzeichnungen zur Beobachtung von Flechtenlagern nach VDI 3957 Blatt 8
- Biomonitoring der lokalen Wirkungen des Klimawandels der Dauerbeobachtungsflächen der ländlichen Gebiete Hessens unter Rückschau auf die Flechtendaten von 1992 bis heute nach VDI 3957 Blatt 20
- Fortführung der Luftgüteuntersuchungen mit Flechten in den mittelhessischen Städten Wetzlar und Gießen

3 Luftgüte und Klimawandel

3.1 Luftgüte

Die Bewertung der Luftgüte (Luftqualität) bezieht sich im Allgemeinen auf den Anteil der in der Luft enthaltenen Luftverunreinigungen. Die Überwachung der Luftqualität erfolgt mit Immissionsmessnetzen. Bei der technischen Luftüberwachung werden an geeigneten Stellen Konzentrationen ausgewählter umwelt- und gesundheitsschädlicher Luftschadstoffe (z. B. Partikel, Stickstoffoxide, Schwefeldioxid, Ozon) gemessen. Die Ergebnisse werden mittels gesetzlicher Vorschriften (Bundesimmissionsschutzgesetz) bewertet.

Das Biomonitoring erweitert die Bewertung der vorhandenen Luftschadstoffe. Hier werden nicht Konzentrationen, sondern vielmehr die Wirkung der Gesamtheit der Luftschadstoffe auf die belebte Umwelt nachgewiesen.

Flechten eignen sich aufgrund ihrer biologisch bedingten Empfindlichkeit gegenüber Luftverunreinigungen besonders gut als Bioindikatoren. Sie nehmen über ihre gesamte Oberfläche Schadstoffe auf. Gleichzeitig sind sie – aufgrund ihrer fein ausbalancierten Symbiosepartner – sensibel gegenüber Umweltveränderungen.

3.2 Folgen des Klimawandels

Der globale Klimawandel wird durch Änderungen der atmosphärischen Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen, der Sonneneinstrahlung und der Beschaffenheit der Landoberfläche beeinflusst. Das IPCC dokumentiert fortlaufend den wissenschaftlichen Kenntnisstand zur globalen Erwärmung, ihren Folgen und legt die Grundlage für mögliche Anpassungsstrategien. Im Sechsten Sachstandsbericht des IPCC werden genannt (IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change 2023):

- In der Zeitspanne 2011-2020 lag die **globale Oberflächentemperatur** um 1,1 °C über der von 1850-1900. Sie ist seit 1970 schneller gestiegen als in jedem anderen Zeitraum von 50 Jahren. In allen Regionen der Erde und insbesondere in Großstädten haben die Zunahme extremer Hitzeereignisse zu menschlicher Sterblichkeit und Morbidität geführt.
- 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 das IPCC die Freisetzung von Treibhausgasen wie CO₂. Seit 1750 sind die atmosphärischen Konzentrationen der Treibhausgase CO₂, CH₄, N₂O deutlich angestiegen. 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 - Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie 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. Nach Angaben des DWD erreichte die Jahresmitteltemperatur in Hessen im Jahr 2023 mit 10,67 °C einen Rekordwert seit Beginn der kontinuierlichen Messungen in 1881 (Abb. 1) (HLNUG - Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie 2024).

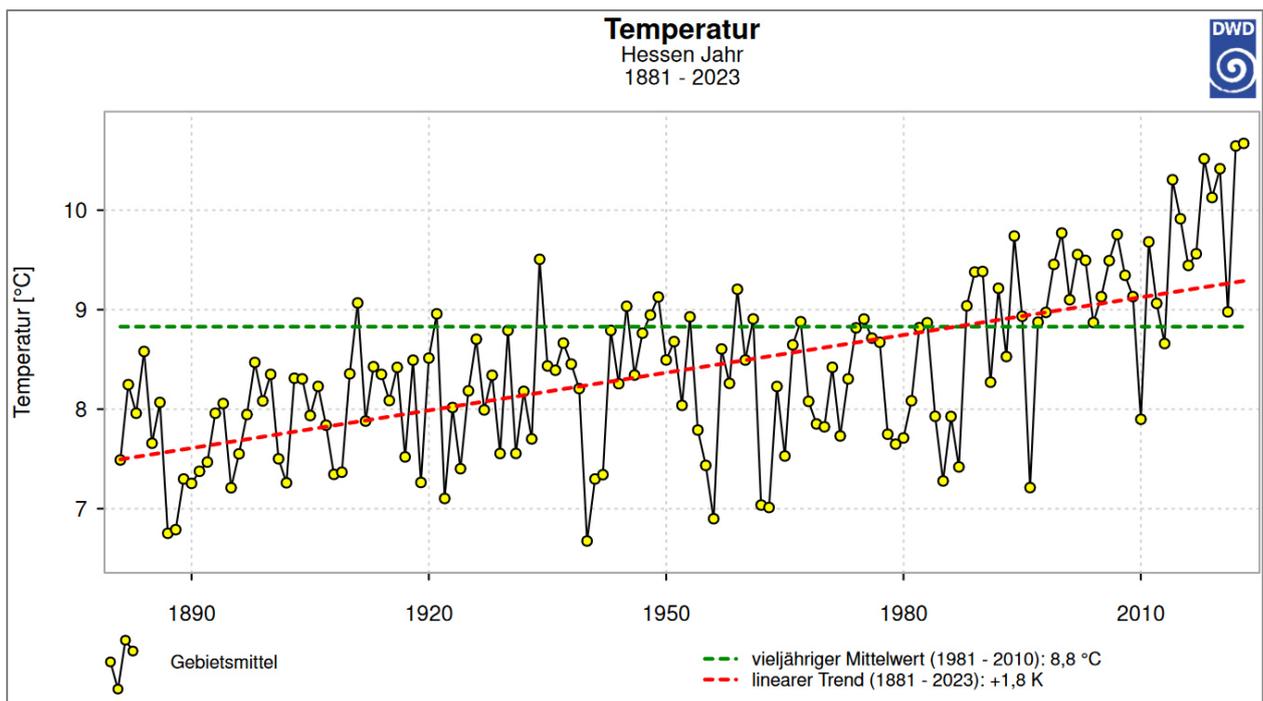


Abb. 1: Jahresmittelwerte der Temperatur in Hessen (DWD - Deutscher Wetterdienst 2024)

Weiter heißt es in der zuvor genannten Broschüre des HLNUG: 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 Ende des 19. Jahrhunderts) hat der mittlere Jahresniederschlag in Hessen leicht zugenommen (Abb. 2). 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. Es wird konstatiert, dass sich für Extremereignisse wie Starkniederschlag, starke Winterstürme oder sommerliche Dürreperioden derzeit noch kein gesicherter statistischer Trend nachweisen lässt. Grundlegende physikalische Überlegungen legen jedoch nahe, dass der Klimawandel zu einer Zunahme solcher Ereignisse führen sollte.

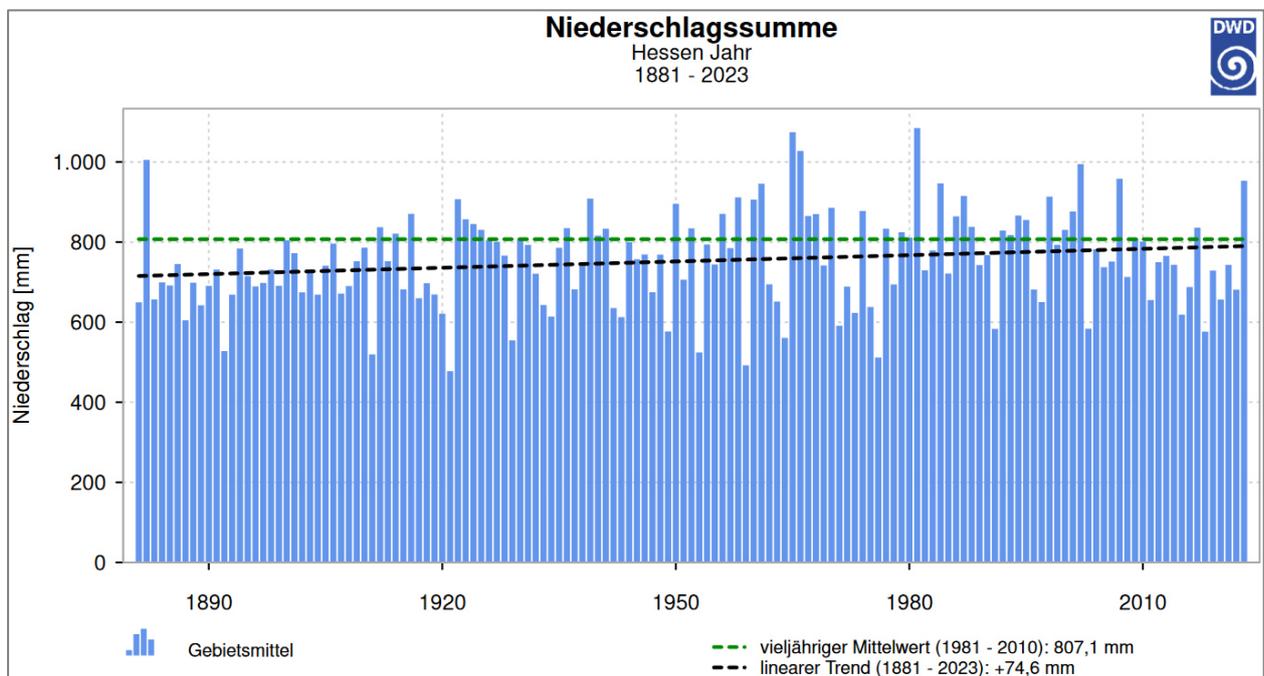


Abb. 2: Jahresmittelwerte des Niederschlags in Hessen (DWD - Deutscher Wetterdienst 2024)

3.3 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 und 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 - Intergovernmental Panel on Climate Change 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 und Körner 2003; European Environment Agency 2004; Walther et al. 2005; Gebhardt et al. 2010).

3.4 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 Niederschläge in den kühleren Jahreszeiten und des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes als auch steigende Temperaturen und ein höherer CO₂-Gehalt der Atmosphäre können die ganzjährig stoffwechselaktiven Flechten fördern. Zudem werden sie in Phasen andauernder 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 und ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Anfang dieses Jahrhunderts wurde das Einsatzgebiet des Flechten-Biomonitorings erweitert, nachdem erste Studien Effekte des Klimawandels auf Flechten beschrieben (Insarov 2002; van Herk et al. 2002). In jüngerer Zeit mehren sich Beobachtungen, wonach sich die Artenzusammensetzung der Flechtenbestände in Westeuropa – unabhängig von der Immissionssituation – kontinuierlich verändert. So berichtet Aptroot, dass im Zeitraum 1979-2005 eine Reihe von südlichen und wärmeliebenden Arten in die Niederlande eingewandert ist (Aptroot 2009). Unter den Profiteuren waren insbesondere Flechten mit *Trentepohlia*-Algen als Symbiosepartner (Aptroot und van Herk 2007). In weiteren Regionen wird die Ausbreitung wärmeliebender Arten beobachtet, so in Dänemark (Søchting 2004), Niedersachsen (Bruyn et al. 2009), Nordrhein-Westfalen (Schmitz et al. 2014; Stapper 2017; Stapper und 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 und Vorbeck 2006; Cezanne et al. 2008; Kirschbaum und Wirth 2010; Windisch et al. 2014; Kirschbaum et al. 2010).

Der Länder-Arbeitskreis 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. 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 mit einer Richtlinie (VDI 3957 Blatt 20 2017). Mit dem Verfahren lassen sich lokale Wirkungen des Klimawandels nachweisen, bewerten und dokumentieren.

4 Methoden

Zu Beginn der Flechten-Dauerbeobachtung in Hessen stand die Erfassung der Wirkungen von Luftverunreinigungen im Vordergrund. Die Methode des Luftgütemonitorings (VDI 3957 Blatt 13 2023) wird auch in der vorliegenden Arbeit wieder angewendet, um den zeitlichen Verlauf von Immissionswirkungen zu erkennen.

Mit dem Klimawandelmonitoring sind neue Aufgaben hinzugekommen, die durch das vorliegende Projekt seit 2012 wahrgenommen werden. Erfasst und dokumentiert werden die Wirkungen des Klimawandels auf Flechtenbiota.

4.1 Datenbestand und Messnetz der Dauerbeobachtung von Flechten in ländlichen Gebieten Hessens

Nach der ersten landesweit flächendeckenden Kartierung von 1992 wurden in den ländlichen Regionen Hessens Flechten-Dauerbeobachtungsflächen (DBF) festgelegt. Sie werden bis heute wiederholt untersucht (Tabelle 1).

Tab. 1: Monitoringprogramm der Flechten-Dauerbeobachtung
(DBF: Dauerbeobachtungsfläche, UF: zusätzliche Untersuchungsfläche,
Lu: Luftgüteuntersuchung nach VDI 3957 Blatt 13; Fo: Folienverfahren 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	2022
Diemelstadt	DBF	250-350	Lu	Lu, Fo	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	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	Lu, Fo, Kl
Rhön	DBF	500-800	Lu	-	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	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	Lu, Fo, Kl
Limburg	DBF	200-300	Lu	Lu, Fo	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	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	Lu, Fo, Kl
Biebesheim	DBF	80-100	Lu	Lu, Fo	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl
Flughafen	UF	100-120	Lu	-	-	Lu, Kl	Lu, Kl	Lu, Kl	Lu, Kl
Rheingau	UF	100	-	-	-	Kl	Kl	Kl	Kl
Odenwald	UF	520	-	-	-	Kl	Kl	Kl	Kl

Sechs der Dauerbeobachtungsflächen wurden seit 1992 lückenlos im 5-jährigen Abstand kartiert. Die DBF „Rhön“ wurde 2002 dauerhaft in das Programm des HLNUG aufgenommen. Seit 2007 wird die Untersuchung einer Untersuchungsfläche am Frankfurter Flughafen von „Gemeinnützige Umwelthaus GmbH, Kelsterbach“ (eine Einrichtung des Landes Hessen) 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 und Windisch 1995; Kirschbaum und Hanewald 1998; Kirschbaum 2009; Kirschbaum et al. 2010; Windisch et al. 2014; Windisch et al. 2018).

Die sieben Dauerbeobachtungsflächen (DBF) sowie die drei zusätzlichen Untersuchungsflächen sind im ländlichen Raum Hessens positioniert (Abb. 3).

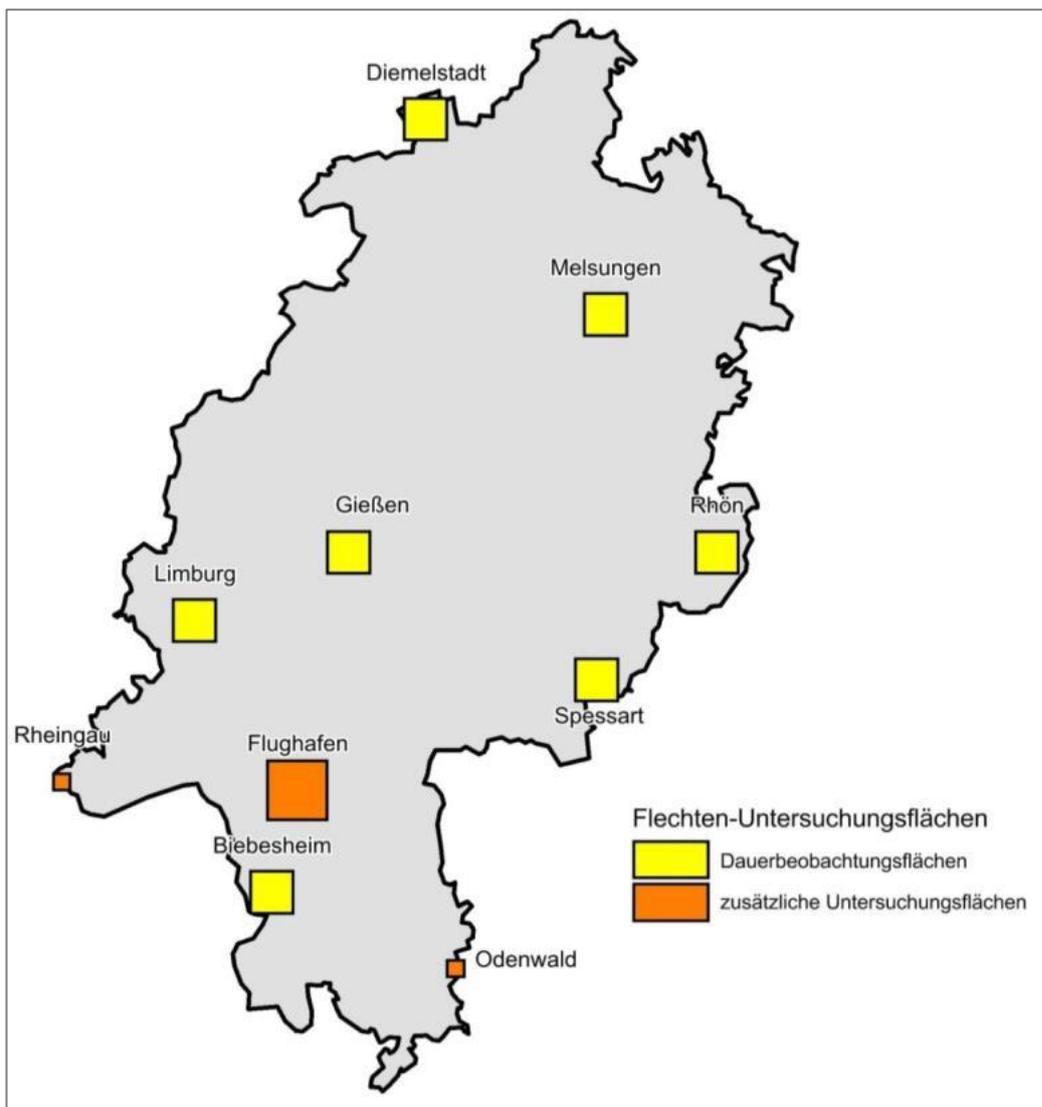


Abb. 3: Lage der Flechten-Dauerbeobachtungsflächen (gelb) und der zusätzlichen Untersuchungsflächen (orange) in Hessen

Über jede DBF mit einer Ausdehnung von jeweils 8 x 8 km wird ein Messnetz gelegt (Abb. 4). An den Kreuzungspunkten des Messnetzes werden 25 Messflächen mit einer Größe von 1 km² positioniert. Die zusätzlichen Untersuchungsflächen für das Klimawandel-Biomonitoring weichen hiervon ab. Die Fläche Flughafen wurde größer projektiert, da große Teile des Flughafengeländes nicht untersucht werden können und weist potentiell 49 Messflächen auf. Im Rheingau (Lorch) und Odenwald (Würzberg) sind die Flächen mit 1 km² deutlich kleiner. Sie befinden sich in den Orten Lorch und Würzberg.

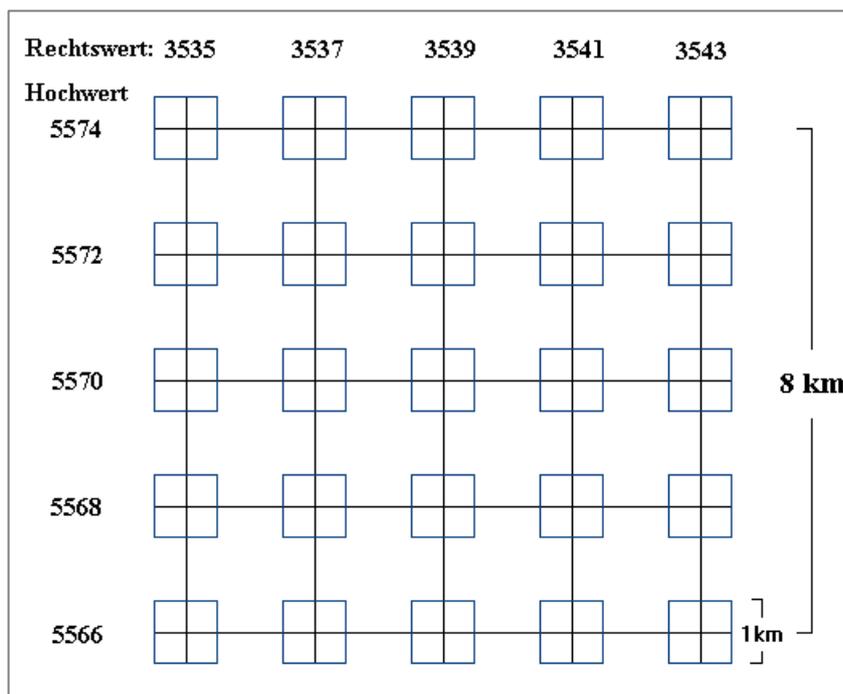


Abb. 4: Messnetz einer Dauerbeobachtungsfläche (Beispiel der DBF Spessart)

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 kommt es vor, dass Messflächen, die früher wegen Mangels an geeigneten Bäumen nicht als Messflächen in Betracht kamen, durch Heranwachsen junger Bäume neu eingerichtet werden können. Ebenso können Messflächen ausfallen, weil die Bäume gerodet oder nicht mehr geeignet sind.

Tab. 2: Anzahl der untersuchten Flächen der Luftgütekartierung zwischen 1992 und 2022

Jahr	1992	1997	2002	2007	2012	2017	2022
Anzahl Dauerbeobachtungsflächen inklusive Flughafen	8	6	7	8	8	8	8
Anzahl untersuchter Messflächen	100	114	109	135	155	158	157

4.2 Datenbestand und Messnetz der Flechtenkartierungen in Wetzlar und Gießen

Für die mittelhessischen, benachbarten Städte Wetzlar und Gießen liegt eine lange Datenreihe vor. Die erste Untersuchung erfolgte 1970 und wurde ab 1985 nach einer standardisierten Methode regelmäßig vorgenommen.

Das Messnetz ist ein Raster mit Messflächen, deren Seitenlänge 1 km beträgt. Beide Stadtgebiete sind lückenlos durch das Messnetz abgedeckt. Es ergeben sich für das Jahr 2020 insgesamt 118 Messflächen. In Gießen waren bei drei Messflächen keine geeigneten Bäume mehr vorhanden; es konnten zwei Ersatzflächen gefunden werden, so dass die Anzahl der Messflächen hier noch 66 beträgt (Tab. 3).

Tab. 3: Anzahl kartierter Messflächen in Wetzlar und Gießen von 1985 bis 2020

Jahr	1985	1995	2005	2010	2015	2020
Anzahl der Messflächen in Wetzlar	34	65	52	52	52	52
Anzahl der Messflächen in Gießen	29	28	62	67	67	66
Summe	63	93	114	119	119	118

4.3 Dokumentation der Substrat- und Flechtendaten

Im Vorfeld der Kartierung werden Luftbildkarten erstellt, auf denen die geografische Lage der untersuchten Objekte (Bäume, Mauern) aus der letzten Kartierung eingetragen sind. So können die Objekte im Gelände wieder aufgefunden werden. Mit Hilfe weiterer Daten aus der letzten Kartierung wie der Baumart und dem Stammumfang ist sichergestellt, dass – sofern noch vorhanden – dieselben Bäume bzw. Mauern untersucht werden.

Die zur Luftgüteuntersuchung kartierten Trägerbäume werden zusätzlich mit einem kleinen Edelstahlnagel markiert, der in der Mitte der Oberkante des Flechtenaufnahmegitters in 1,5 m Höhe dauerhaft eingeschlagen wird.

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



Darstellung auf Grundlage von Daten des HLNUG, ergänzt um Symbole für Bäume /Mauern

Abb. 5: Luftbildauschnitt mit kartierten Bäumen und Mauern, DBF Melsungen

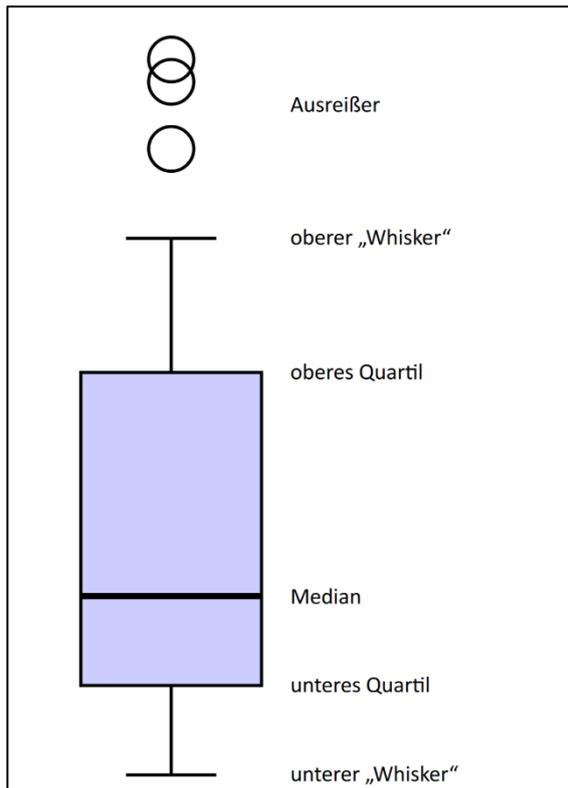
4.4 Nutzung von Klima- und Depositionsdaten

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 Darstellung der Ergebnisse als Boxplots

Der Boxplot (auch Box-Whisker-Plot) ist eine Darstellungsmöglichkeit der Ergebnisse als Diagramm (Abb. 6). Er wird gewählt, um die Lage und Streuung der Werte einer Stichprobe zu veranschaulichen.

In der vorliegenden Arbeit werden Boxplots verwendet, um die zeitliche Entwicklung der Flechtenindizes (z. B. der Flechten-Diversitätswerte) und der Borke-pH-Werte darzustellen.



Dargestellt werden vier Quartile, die jeweils 25 % der Daten abgrenzen. Der Bereich der Box umschließt die mittleren 50 % der Werte. Die Querlinie in der Box ist der Median. Die Hälfte der Werte befindet sich über dem Median, die andere Hälfte darunter.

Abb. 6: Schema eines Boxplot-Diagramms

4.6 Luftgüte-Biomonitoring

Zur Luftgüteuntersuchung werden mit der Flechtenkartierung und dem Folienvorfahren zwei Methoden angewendet, die durch Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) beschrieben sind.

4.6.1 Flechtenkartierung nach VDI 3957 Blatt 13

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

Auswahl der Trägerbäume

Auf 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 wird für Ersatz gesorgt. 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 sind 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. 4). Der zulässige Umfang der Stämme beträgt in 1,3 m Höhe 70 bis 250 cm.

In der neuen Richtlinienfassung von 2023 ist vorgesehen, dass die Bäume einer Erfassungseinheit (hier Messfläche) homogene Standorteigenschaften aufweisen sollen. In der vorliegenden Arbeit kann dem nicht nachgegangen werden, weil die wiederholte Aufnahme der Bäume der letzten Kartierung höhere Priorität hat. Wenn Baumgruppen ausfallen und durch neue ersetzt werden müssen, werden nach Möglichkeit Bäume auf homogenen Geländeabschnitten ausgewählt.

Tab. 4: Baumarten der Gruppe 1 nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 (2023)

Gruppe Bäume mit höherem Borken-pH-Wert	1
Ahorn-Arten (<i>Acer</i> spp.)	
Gemeine Esche (<i>Fraxinus excelsior</i>)	
Walnussbaum (<i>Juglans regia</i>)	
Apfelbaum (<i>Malus</i> spp.)	
Pappel-Arten (<i>Populus</i> spp.)	
Robinie (<i>Robinia pseudoacacia</i>)	
Weiden-Arten (<i>Salix</i> spp.)	
Ulmen-Arten (<i>Ulmus</i> spp.)	
Roskastanie (<i>Aesculus hippocastanum</i>)	
Götterbaum (<i>Ailanthus altissima</i>)	
Birnbaum (<i>Pyrus communis</i>)	
Linden-Arten (<i>Tilia</i> spp.)	

Grunddatenerfassung der Flechten

Im vorliegenden Dauerbeobachtungsprogramm bleibt die Grunddatenerfassung der Flechten weitestgehend konstant, um eine gleichbleibende Datenbasis dauerhaft zu gewährleisten. Die Auswertung der Daten hingegen wird dem Stand der Forschung und den wechselnden Anforderungen aufgrund von veränderten Umweltzuständen angepasst.

Zur Erfassung der Flechten wird das Flechtenaufnahmegitter mit zehn Gitterfeldern (je 10 x 10 cm) an der am stärksten bewachsenen Stammseite angelegt (Abb. 7).

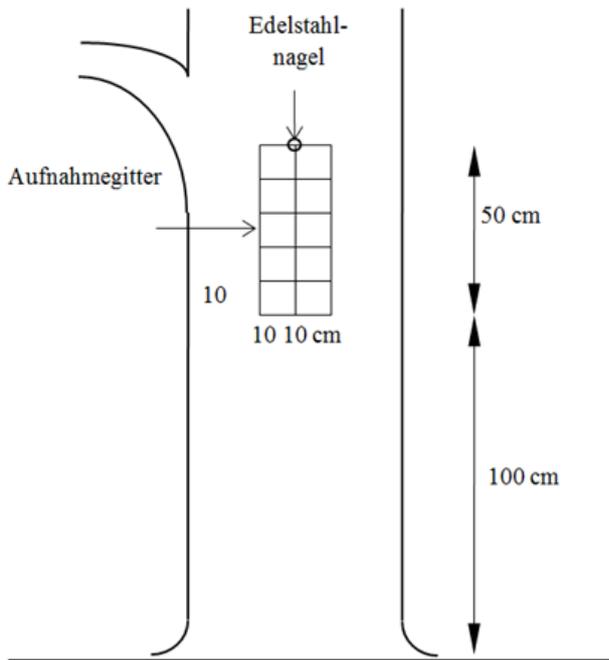


Abb. 7: Grunddatenerfassung am Baum. (**links oben:** Schema nach VDI 3957 Blatt 13, Anhang B; **rechts oben:** Aufnahmegitter am Baum (Foto: Eichler); **links unten:** R. Cezanne bei der Flechtenkartierung (Foto: Eichler); **rechts unten:** Datenblatt-Beispiel (Foto: Windisch))

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 die Flora „Die Flechten Deutschlands“ (Wirth et al. 2013) und diverse gattungsspezifische Flechtenwerke. Die Nomenklatur wurde, der Roten Liste der Flechten für Hessen folgend, aktualisiert (Cezanne et al. 2023). Sofern neben wissenschaftlichen auch deutsche Flechtennamen genannt werden, sind sie dem Bestimmungsbuch von Wirth und Kirschbaum entnommen (Wirth und Kirschbaum 2024).

Berechnung der Luftgüteindizes (LGI)

Die Berechnung der Luftgüteindizes erfolgt nach der entsprechenden Richtlinie des VDI 3957 Blatt 13. Aus der Anzahl der im Aufnahmegitter vorhandenen Arten und deren Häufigkeit werden zunächst Flechten-Diversitätswerte (FDW) errechnet. Die FDW werden für die Eutrophierung anzeigenden Arten (Eutrophierungszeiger) und für die übrigen Arten (Referenzarten) getrennt berechnet. Eutrophierungszeiger sind die in Tab. 5 genannten Arten. Die Einschätzung der Arten als Eutrophierungszeiger basiert auf den Zeigerwerten für Pflanzen nach WIRTH (Wirth 2010). In einer neunstufigen Skala werden dabei die Ansprüche der Arten gegenüber wichtigen ökologischen Faktoren wie dem Nährstoffangebot des Standortes ausgedrückt.

Die Richtlinie 3957 Blatt 13 erschien 2023 in einer Neufassung. Relevant für die Berechnung der Luftgüteindizes ist insbesondere die Erweiterung der Liste der Eutrophierungszeiger (Tab. 5). Es wurden Arten ergänzt, die in den letzten 15 Jahren vermehrt gefunden wurden und als Eutrophierungszeiger gelten (z. B. *Candelaria concolor*). Auch gesteinsbewohnende Arten, die bei starker Staubimprägnierung der Bäume auf diesen siedeln können und häufiger in den Datensätzen von Flechtenkartierungen auftauchen (z. B. *Candelariella aurella*, *Candelariella vitellina*) finden sich auf der neuen Liste. Schließlich wurden Taxa, die bei der Geländekartierung kaum auseinander zu halten sind, in Gruppen zusammengefasst (z. B. *Candelariella efflorescens* / *C. xanthostigmoides* / *C. reflexa*).

Tab. 5: Vergleich der Listen der Eutrophierungszeiger nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 der Erscheinungsjahre 2005 und 2023; in Klammern in älterer Literatur gebräuchliche Namen (Synonyme)

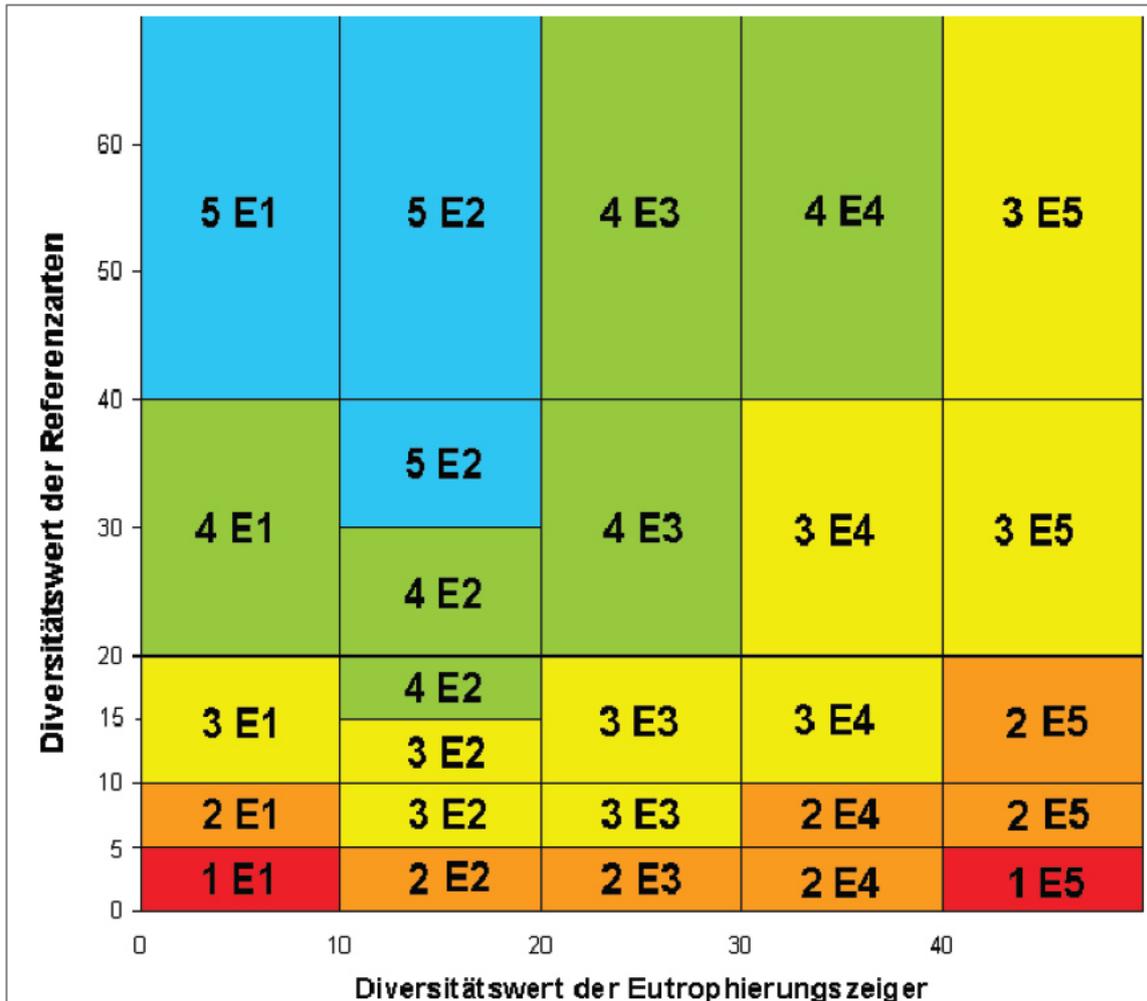
Flechtentaxa	2005	2022
<i>Athallia cerinella</i> / <i>A. cerinelloides</i> (syn. <i>Caloplaca cerinella</i> / <i>C. cerinelloides</i>)		x
<i>Athallia holocarpa</i> / <i>A. pyracea</i> (syn. <i>Caloplaca holocarpa</i> / <i>C. pyracea</i>)	x	x
<i>Candelaria concolor</i>		x
<i>Candelaria pacifica</i>		x
<i>Candelariella aurella</i>		x
<i>Candelariella efflorescens</i> / <i>C. xanthostigmoides</i> / <i>C. reflexa</i>		x
<i>Candelariella vitellina</i>		x
<i>Catillaria nigroclavata</i>		x
<i>Flavoplaca citrina</i> (syn. <i>Caloplaca citrina</i>)	x	x
<i>Phaeophyscia nigricans</i>	x	x
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	x	x
<i>Physcia adscendens</i>	x	x
<i>Physcia caesia</i>	x	x
<i>Physcia dubia</i>	x	x
<i>Physcia tenella</i>	x	x
<i>Physciella chloantha</i>		x
<i>Physconia grisea</i>	x	x
<i>Polycauliona candelaria</i> / <i>P. ucrainica</i> (syn. <i>Xanthoria candelaria</i> / <i>X. ucrainica</i>)	x	x
<i>Polycauliona phlogina</i> (syn. <i>Caloplaca phlogina</i>)		x
<i>Polycauliona polycarpa</i> (syn. <i>Xanthoria polycarpa</i>)	x	x
<i>Polyozosia dispersa</i> (syn. <i>Lecanora dispersa</i>)	x	x
<i>Polyozosia hagenii</i> / <i>P. persimilis</i> (syn. <i>Lecanora hagenii</i> / <i>L. persimilis</i>)	x	x
<i>Protoparmeliopsis muralis</i> (syn. <i>Lecanora muralis</i>)	x	x
<i>Rinodina oleae</i> / <i>R. gennarii</i>)		x
<i>Rinodina pityrea</i>		x
<i>Rinodina spp.</i>	x	
<i>Xanthomendoza huculica</i> (syn. <i>Oxneria huculica</i>)		x
<i>Xanthoria parietina</i>	x	x

Bewertung des Luftgüteindex (LGI)

Für die ermittelten Flechten-Diversitätswerte können in der Bewertungsmatrix (Abb. 8) die entsprechenden Luftgüteindizes (LGI) 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 ein „E“ getrennt sind. Die erste Ziffer des Indexes entspricht der Luftgüte und ist mit einer Farbe gekoppelt, die zweite Ziffer bezeichnet das Ausmaß der Eutrophierung. Die Luftgüte wird verbal in Stufen bewertet und mit der entsprechenden Farbe in der Luftgütekarte gekennzeichnet.

Beispiele:

- „**1** E5“: sehr geringe Luftgüte bei sehr starkem Einfluss eutrophierender Verbindungen
- „**4** E3“: hohe Luftgüte bei mäßigem Einfluss eutrophierender Verbindungen



Bewertung der Luftgüte	Indexwert	Einfluss eutrophierender Luftverunreinigungen
5 sehr hoch	E5	sehr stark
4 hoch	E4	stark
3 mäßig	E3	mäßig
2 gering	E2	gering
1 sehr gering	E1	sehr gering

Abb. 8: Bewertungsmatrix zur Ermittlung des Luftgüteindex anhand der Kombination der Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger und der Referenzarten (Datenerhebung nach VDI-Richtlinie 3579 Blatt 13, 2023, Anhang B)

Auswirkungen der neuen Richtlinienfassung auf das laufende Projekt

In der neuen Richtlinienfassung VDI 3957, Blatt 13 von 2023 sind Änderungen vorgenommen worden, die im vorliegenden Projekt – wo notwendig – umgesetzt werden. Dies betrifft insbesondere die Auswertung der Daten.

Nicht verändert wird die Grunddatenerhebung aller im Flechtenaufnahmegitter (einfaches Aufnahmegitter nach Anhang B) vorhandenen Flechtendaten, die eine Voraussetzung für die langfristige Vergleichbarkeit der Daten ist. Auch die Trägerbäume werden, soweit noch vorhanden, beibehalten. Müssen Ersatzbäume gefunden werden, kommen – der neuen Richtlinienfassung folgend – auch Robinie, Rosskastanie und Götterbaum in Frage.

Zur Berechnung der Flechten-Diversitätswerte liegt mit der Neufassung eine erweiterte Liste von Eutrophierungszeigern vor. Die neu hinzugekommenen Taxa (vgl. Tab. 5) kommen in den bisherigen Untersuchungsjahren nur mit wenigen Datensätzen vor.

Eine Ausnahme stellt die recht häufige *Candelariella reflexa* s. lat. (incl. *C. reflexa* s. str.) dar, die zusammen mit den bisher kaum erfassten und im Gelände nicht unterscheidbaren Spezies *C. xanthostigmoides* und *C. efflorescens* seit Richtlinienversion 2023 erstmalig als Eutrophierungszeiger gilt. *Candelariella reflexa* (in der damaligen Artauffassung) wurde in den ersten Untersuchungsjahren gemeinsam mit *C. xanthostigma* kartiert und ausgewertet. Im Sinne der Kontinuität der Datenauswertung wurde die Artengruppe beibehalten. Innerhalb der Artengruppe ist *C. reflexa* s. lat. die deutlich häufigere Art: Beispielsweise wurden im Jahr 2015 in Wetzlar und Gießen von *C. reflexa* s. lat. durchschnittlich 7,6 Datensätze pro Baum kartiert, während es bei *C. xanthostigma* 1,9 Datensätze pro Baum waren. Daher erhält die in Hessen kartierte Artengruppe in allen Untersuchungsjahren den Status „Eutrophierungszeiger“. Es erfolgt eine Neuberechnung aller Grunddaten seit 1992 nach den Vorgaben der neuen Richtlinienfassung. Dabei kann es zu Neueinstufungen der Luftgüte aufgrund der Neubewertung der Eutrophierungszeiger kommen.

Die extrem acidophytische Krustenflechte *Lecanora conizaeoides*, die zu Beginn der Untersuchungen nicht in die Luftgütebewertung einbezogen wurde, wird zugunsten der Interpretation der langen Zeitreihen weiterhin nicht berücksichtigt.

4.6.2 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).

Auf 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 Flechtenaufnahmegitters der Kartierung. Innerhalb der 10 Gitterflächen 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. 9) und als Vorbereitung auf die folgende Analyse nachbearbeitet. Die Flächenberechnung der gezeichneten Flechtenthalli erfolgt mittels der Software ‚LiMo-Analyse‘ (Abb. 9 und Abb. 10). Das Programm wurde 2013 für diese Anwendung entwickelt und steht auf den Seiten der Technischen Hochschule Mittelhessen unter dem Link [„http://limo.mni.thm.de/“](http://limo.mni.thm.de/) zum Download bereit. Nähere Informationen zur Benutzung geben Handbuch und Publikation (Windisch und Menzel 2013). Im Mai 2024 wurde das Programm überarbeitet und aktualisiert.

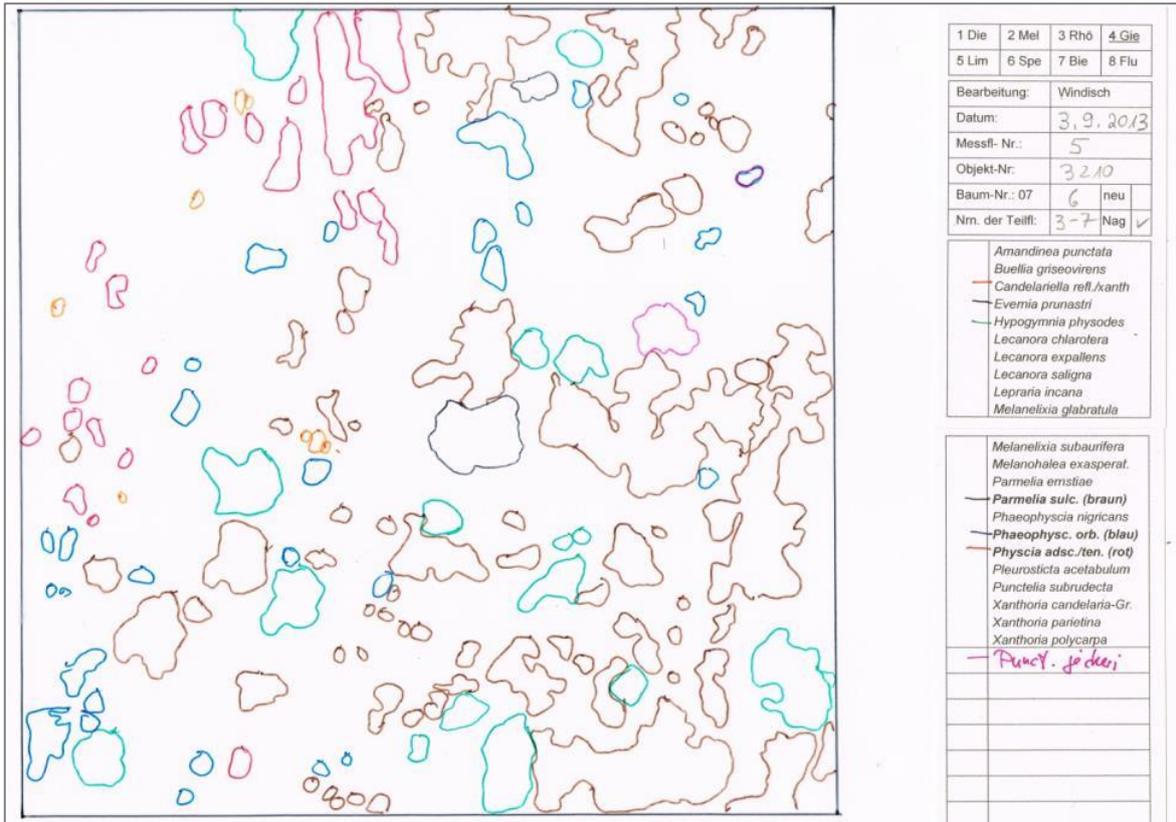


Abb. 9: Beispiel einer gescannten Folie (Flechtenerfassung an einem Baum der DBF Gießen)

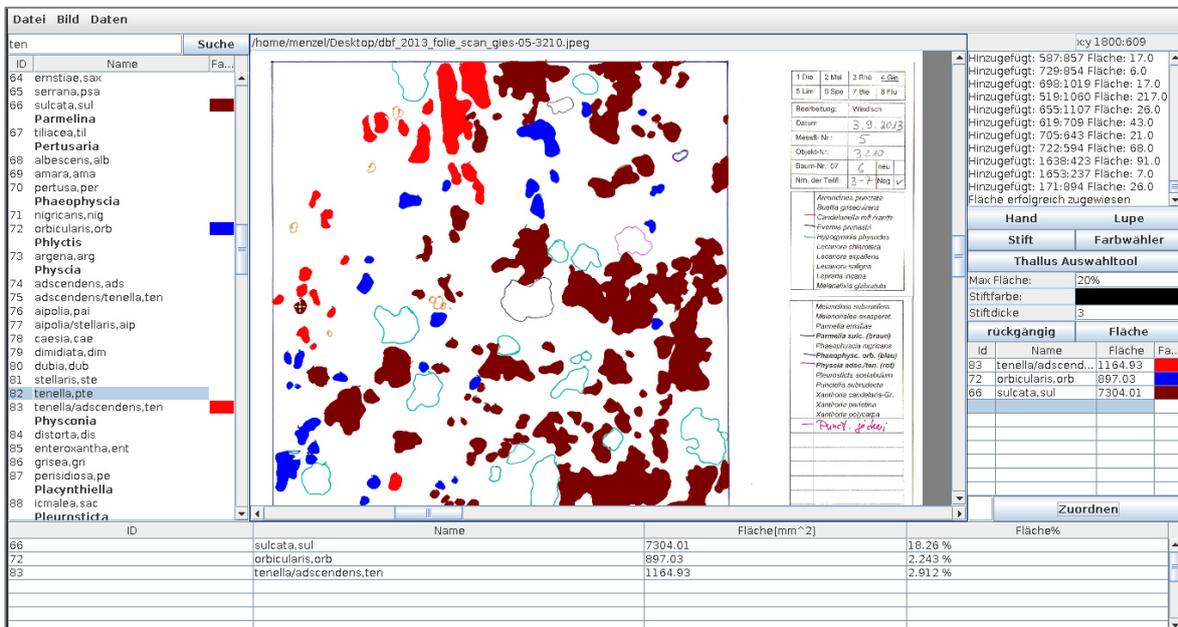


Abb. 10: Ansicht der Benutzeroberfläche von ‚LiMo-Analyse‘ während der Auswertung

4.6.3 Messung von Borke-pH-Werten

Die Bestimmung der Borke-pH-Werte erfolgt seit 1972 für Gießen und Wetzlar kontinuierlich nach der im Folgenden beschriebenen Methode (vergleiche auch (Sänger 1972); (Biecker 1986; Hansen 1986)).

- Die Entnahme der Borkeproben erfolgt an den Bäumen der Flechtenkartierung.
- Es wird eine Mischprobe aus mehreren der kartierten Bäume der Messfläche genommen.
- Wurde mehr als eine Baumart kartiert, so erfolgt die Probenahme getrennt nach Baumarten.
- Die Proben werden in 1 – 1,5 m Höhe, außerhalb des Flechtaufnahmegitters der Flechtenkartierung, mit einem Messer entnommen.
- Die Dicke der Borkestücke beträgt < 3 mm.
- Die Borke wird bei Zimmertemperatur getrocknet und anschließend bei -20 °C aufbewahrt.
- Vor der Messung werden zunächst anhaftende Teile wie Staub, Algen oder Flechten mit einer Bürste entfernt.
- Die Mischprobe wird in einer Mühle zerkleinert und homogenisiert.
- Jeweils 2 g der pulverisierten Probe werden mit 15 ml demineralisiertem Wasser versetzt und über Nacht geschüttelt.
- Die pH-Wert-Messung erfolgt mit einem pH-Meter.

4.7 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 auf den bisher untersuchten Dauerbeobachtungsflächen wird die Methode des Klimawandel-Biomonitorings eingesetzt (Windisch et al. 2018).

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

Zu Beginn des Klimawandel-Biomonitorings in Hessen im Jahr 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 Flechtaufnahmegitter 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. 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 Flechtaufnahmegitters und einer Frequenzbestimmung, so wie dies bei der Luftgüteuntersuchung praktiziert wird.

4.7.1 Qualitative Erfassung der Flechten am Stamm von „Klimabäumen“

Auf jeder Untersuchungsfläche werden 20 Bäume erfasst (Abb. 11). Der Begriff „qualitativ“ bedeutet hier, dass nicht die Frequenz der Flechten, z. B. in einem Flechtenaufnahmegitter, erfasst wird, sondern lediglich das Vorkommen einer Art am Baum.

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

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

Zur Wahrung einer gleichbleibenden Kartierungsintensität wird der Stamm so lange auf neue Artvorkommen untersucht, bis zwei Minuten lang keine neuen Arten mehr nachgewiesen werden.



Abb. 11: Trägerbäume des Klimawandel-Biomonitorings (Foto: Eichler)

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. Bei den Folgeuntersuchungen in 2012, 2017 und 2020 wurde kontinuierlich eine Angleichung an die aktuelle Richtlinie vorgenommen.

Es wird jeweils der gesamte Baumstamm, in einer Höhe 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 4.6.1) auch als Klimabäume zu untersuchen.

4.7.2 Quantitative Erfassung der Flechten im Aufnahmegitter

Die quantitative Erfassung der Flechten auf einer definierten Aufnahme­fläche entspricht der Erfassung zur Luftgütebestimmung und wurde im Kapitel 4.6.1 beschrieben.

4.7.3 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. 12: Mauern für die Flechtenkartierung (oben links: in Marjoß auf DBF Spessart; oben rechts: in Rhoden auf DBF Diemelstadt, unten: alter Friedhof Villmar auf DBF Limburg); Fotos: Eichler/Cezanne

4.7.4 Datenauswertung

Im Jahr 2017 veröffentlichte der Verein Deutscher Ingenieure die Richtlinie zur Kartierung von Flechten zur Ermittlung der Wirkung von lokalen Klimaveränderungen (VDI-Richtlinie 3957 Blatt 20). Die Erkenntnisse der Flechten-Dauerbeobachtung sind in diese Norm eingeflossen. In der Richtlinie erfolgte eine Beschränkung auf die Untersuchung von Bäumen, nicht aber von Mauern. Daher entspricht die Auswertung der Epiphyten-Daten der Richtlinie, während die Auswertung der Mauern anhand von Zeigerwerten erfolgt.

Klimawandelzeiger-Index (KWI), erhoben an Baumstämmen

Aus den Flechtendaten der qualitativen Erfassung (vgl. Kapitel 4.7.1) wird der Klimawandelzeiger-Index (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 Klimawandelzeigerart gefunden wird.

Zu den Klimawandelzeigern gehören 45 epiphytische Flechtenarten (Tab. 6). Das Auswahlverfahren wird in der Richtlinie detailliert erläutert und wird hier kurz umrissen. Die Einstufung von Arten als Klimawandelzeiger erfolgte in einer mehrstufigen Auswahl, die auf ökologischen Zeigerwerten (Wirth 2010; Kirschbaum und 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 als gemäßigt-mediterran oder subatlantisch-submediterrän-gemäßigt verbreitet gelten (Aptroot und Sparrius 2009).

Tab. 6: Liste der definierten Klimawandelzeiger nach VDI 3957 Blatt 20 (2017)

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 soledians</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 2010), die nach (Aptroot und Sparrius 2009) als gemäßigt-mediterran oder subatlantisch-submediterrän-gemäßigt gelten; Nomenklatur der gelisteten Arten auf dem Stand der Richtlinie

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

Aus den Flechtendaten der quantitativen Erfassung (vgl. Kapitel 4.6.1) wird der Diversitätswert der Klimawandelzeiger berechnet. In diesen Index gehen die Flechtenfrequenzen im Aufnahmegitter ein. Es wird ein Mittelwert aus den untersuchten Bäumen einer Messfläche (folgend als Probenahmefläche bezeichnet) berechnet.

$$FDW_{KWZ_j} = \frac{(FDW_{KWZ_{B_1}} + FDW_{KWZ_{B_2}} + FDW_{KWZ_{B_3}} + \dots + FDW_{KWZ_{B_n}})}{n}$$

Dabei sind

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

n Anzahl der untersuchten Bäume in der Probenahmefläche j

Zum Beispiel bedeutet ein Wert von 2, dass im Mittel an jedem der kartierten Bäume in dem zehnfelderigen Aufnahmegitter zwei Datensätze mit Klimawandelzeigern erfasst werden. Diese

Methode hat den Vorteil, dass Daten aus früheren Erhebungen verwendet werden können (früher wurde nur im Flechtenaufnahmegitter kartiert).

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 Auswahl-schema, 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 nach dieser Definition 58 Wärmezeigerarten (Tab. 7). Da nicht nur Gesteinsflechten, sondern auch substratvage Rindenflechten auf Mauern angetroffen werden können, sind diese ebenfalls gelistet.

Tab. 7: Wärmezeigerarten, die auf Rinde und/oder Gestein siedeln (Wirth 2010)

Flechtenart	Temperaturzahl	bevorzugtes Substrat (R: Rinde, G: Gestein)
<i>Alyxoria ochrocheila</i> (syn. <i>Opegrapha o.</i>)	7	R
<i>Arthonia cinnabarina</i>	7	R
<i>Bagliettoa marmorea</i>	9	G
<i>Buellia ocellata</i>	7	G
<i>Caloplaca dalmatica</i>	8	G
<i>Caloplaca demissa</i>	7	G
<i>Candelariella medians</i>	9	G
<i>Candelariella plumbea</i>	9	G
<i>Candelariella viae-lacteeae</i>	9	R
<i>Catillaria lenticularis</i>	7	G
<i>Catillaria minuta</i>	7	G
<i>Dendrographa decolorans</i> (syn. <i>Schismatomma d.</i>)	7	R
<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 soledians</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>Kuettlingeria albolutescens</i> (syn. <i>Caloplaca a.</i>)	9	G
<i>Kuettlingeria teicholyta</i> (syn. <i>Caloplaca t.</i>)	8	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 vermicellifera</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 schaeereri</i>	9	G

<i>Polycauliona verruculifera</i> (syn. <i>Caloplaca granulosa</i>)	9	G
<i>Porina leptalea</i>	7	R
<i>Protoparmelia hypotremella</i>	7	R
<i>Psora testacea</i>	9	G
<i>Punctelia borrieri</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>Toninia toniniana</i>	9	G
<i>Variospora aurantia</i> (syn. <i>Caloplaca a.</i>)	9	G
<i>Variospora flavescens</i> (syn. <i>Caloplaca f.</i>)	7	G
<i>Xanthocarpia lactea</i> (syn. <i>Caloplaca l.</i>)	8	G
<i>Xanthomendoza fallax</i> (syn. <i>Oxneria f.</i>)	8	RG
<i>Xanthomendoza huculica</i> (syn. <i>Oxneria h.</i>)	8	R

Aus den Daten der Flechtenkartierung an Mauern, die eine qualitative Erfassung darstellt (vgl. Kapitel 4.7.3) 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 1.336 Trägerbäume für die Luftgütebewertung („VDI-Bäume“) kartiert. Für das Klimawandel-Biomonitoring wurden 200 weitere Bäume („Klimabäume“) und 300 Mauerabschnitte auf ihren Flechtenbewuchs untersucht.

5.1.1 Trägerbäume und Mauern in den ländlichen Untersuchungsgebieten (DBF)

Unter den Trägerbäumen waren Linden- und Ahornarten die am häufigsten verwendeten Spezies (Abb. 13).

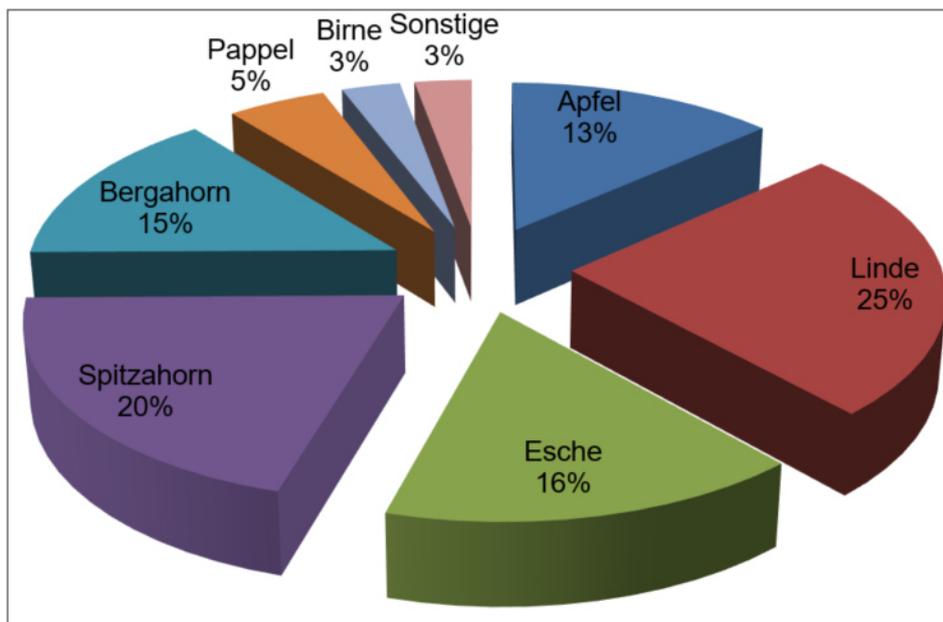


Abb. 13: Baumartenspektrum der Luftgüteuntersuchung 2022 für die ländlichen DBF

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. 14). Stellten Apfelbaum und Pappel zu Beginn der Untersuchungsreihe noch 86 % der Trägerbaumarten, so

sind es aktuell nur noch 18 %. 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.

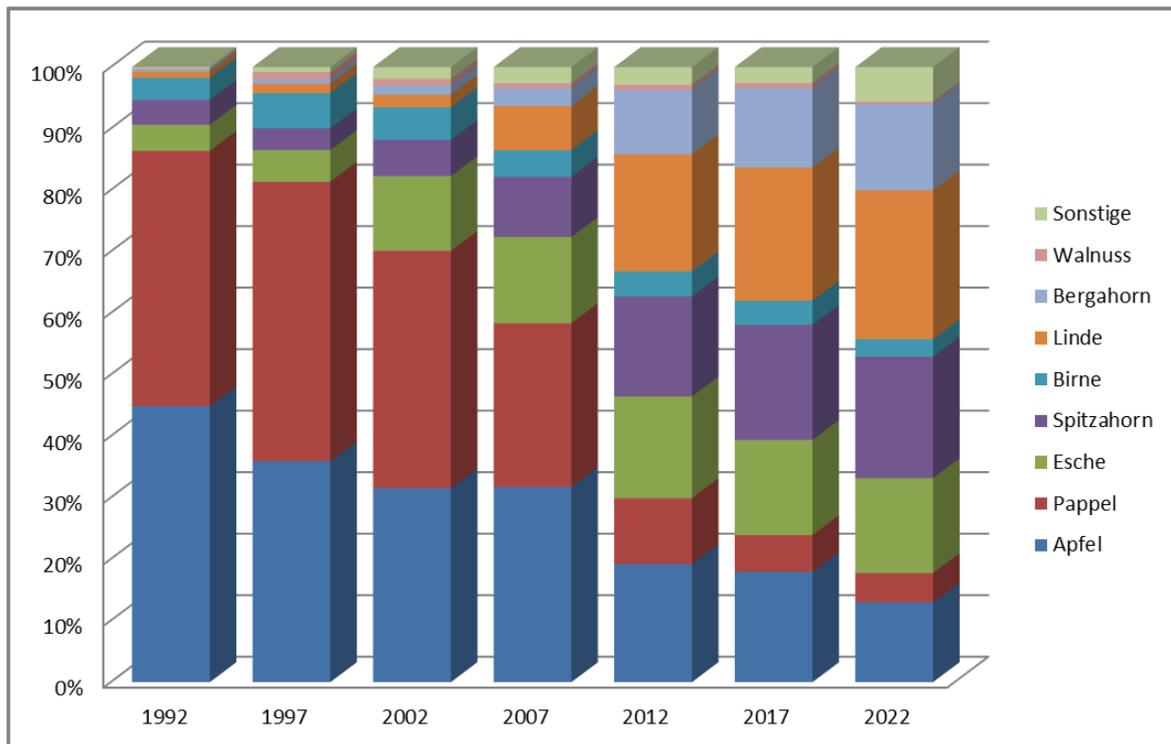


Abb. 14: Entwicklung des Anteils häufig untersuchter Baumarten der Luftgüteuntersuchung für die ländlichen DBF

Beim Klimawandel-Biomonitoring wurde zu Beginn des Monitorings in 2007 bei der Baumartenwahl Wert auf Vielfalt gelegt. Seit der Erstauflage der entsprechenden Richtlinie in 2017, in der das empfohlene Baumartenspektrum eingeeengt wurde, werden ausfallende Trägerbäume nach den Vorgaben der Richtlinie ersetzt. Das Spektrum der 2022 verwendeten Baumarten beläuft sich auf rund 30 Baumarten. Den höchsten Anteil haben hier, wie auch bei der Luftgütekartierung, die Linden- und Ahornarten. (Tab. 8).

Tab. 8: Baumartenspektrum des Klimawandel-Biomonitorings in 2022

Baumart	Anteil in %	Baumart	Anteil in %
Linde	35,5	Roskastanie	2,0
Spitzahorn	17,0	Birke	1,5
Eiche	10,0	weitere Ahornarten	1,5
Bergahorn	9,5	Eberesche	1,0
Esche	4,0	Götterbaum	1,0
Kirsche	4,0	Rotbuche	1,0
Apfel	3,0	Walnuss	1,0
Robinie	2,5	weitere Baumarten	4,5

Bei der Kartierung der Mauern wurden diverse Baumaterialien angetroffen und auf ihren Flechtenbewuchs untersucht (Abb. 15). Natürliche Materialien wie Sandstein und sonstige Natursteine stellen mit 55 % etwa die Hälfte der Untergründe. Das Spektrum entspricht weitestgehend dem der letzten Untersuchung.

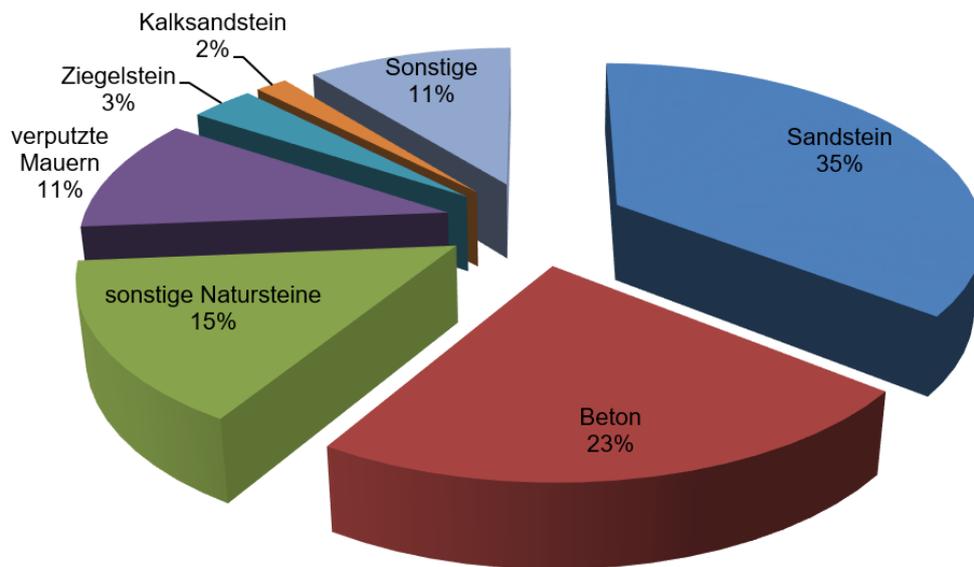


Abb. 15: Spektrum der Baumaterialien der untersuchten Mauern zum Klimawandel-Biomonitoring 2022

5.1.2 Trägerbäume in Wetzlar und Gießen

In den beiden Städten wurden aktuell 1.095 Trägerbäume untersucht. Damit wurden im Mittel 9,3 Bäume pro Messfläche kartiert. Wie bei der letzten Kartierung in 2015 waren Linde (*Tilia* spp.) und Ahorne (*Acer* spp.) die am häufigsten untersuchten Baumgattungen und ihr Anteil hat dank einiger Neuanpflanzungen weiter zugenommen. Bei Obstbaumarten nimmt die Verwendung als Flechten-Trägerbaum dagegen ab. In den oftmals überalterten Streuobstbeständen wachsen zunehmend weniger Bäume heran, die den Anforderungen eines standardisierten Trägerbaums genügen. Auch die Pappel gehört zu den rückläufigen Trägerbäumen, weil in den letzten Jahren Bäume wegen Überalterung gefällt worden waren. Abweichend von der Liste der zulässigen Baumarten ist Eiche (*Quercus* spec.) in geringem Umfang kartiert worden.

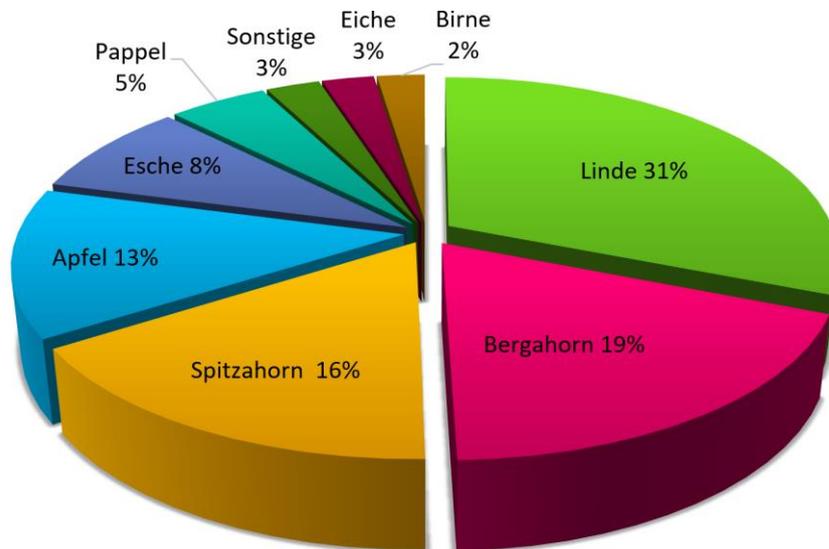


Abb. 16: Spektrum der Trägerbaumarten in der Kartierung Wetzlar und Gießen 2020

5.2 Flechtenarten

In den beiden hessischen Teilprojekten wurden insgesamt 247 Flechtentaxa erfasst. 119 der Taxa wurden nur auf Bäumen kartiert, und 91 der Taxa kamen nur auf Mauern vor. Substratvag verhielten sich 37 Taxa, die sowohl auf Bäumen als auch auf Mauern erhoben wurden. Die Artenliste ist dem Anhang zu entnehmen.

Naturschutzfachliche Aspekte können in der vorliegenden Arbeit nur gestreift werden, weil der Schwerpunkt dieser Arbeit auf dem Biomonitoring liegt. Die ganz überwiegende Beschränkung der Kartierung auf standardisierte Bäume und Mauerabschnitte lässt kaum flechtenfloristische Besonderheiten erwarten, da die Habitat-Diversität gering ist. Dennoch soll hier zumindest ein Eindruck zum Schutzstatus der Arten gegeben werden.

Eine Gefährdungskategorie auf der Roten Liste Hessens (Cezanne et al. 2023) haben 51 Arten im Projekt, das sind 21 % der kartierten Spezies. Darunter sind zwei Arten hessenweit vom Aussterben bedroht (R-L-Kat. 1): Der Fundort von *Gyalecta carneola* ist südlich Reulbach (DBF Rhön), wo die Art an einer Esche erfasst wurde. Die Blattflechte *Parmelina quercina* wurde wie in den Jahren davor wieder an einem Spitzhorn bei Weyer (DBF Limburg) kartiert, was das letzte in Hessen bekannte Vorkommen darstellt.

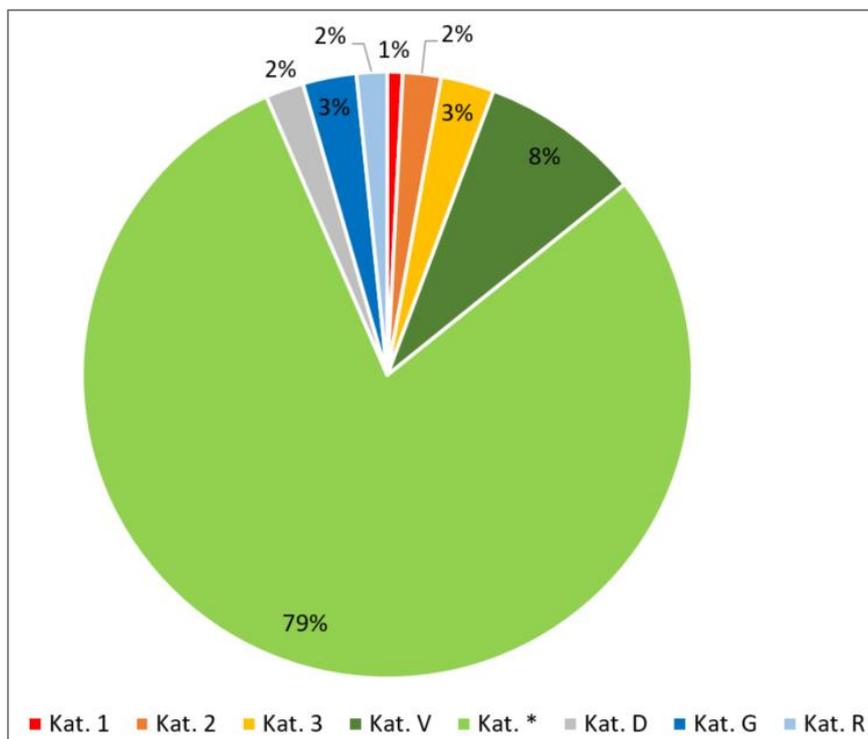


Abb. 17: Prozentualer Anteil des Rote-Liste-Status der an Trägerbäumen und Mauern gefundenen Flechtenarten für alle Untersuchungen im vorliegenden Bericht (vgl. Artenliste im Anhang); R-L-Status nach (Cezanne et al. 2023): Kat. 1 – vom Aussterben bedroht, Kat. 2 – stark gefährdet, Kat. 3 – gefährdet, Kat. V – Vorwarnliste, Kat. * – ungefährdet, Kat. D – Daten unzureichend, Kat. G – Gefährdung unbekanntes Ausmaßes, Kat. R – extrem selten.

Stark gefährdet in Hessen (R-L-Kategorie 2) sind die kartierten Flechtenarten *Bryoria fuscescens*, *Ramalina fastigiata*, *Ramalina fraxinea*, *Rinodina exigua* und *Xanthomendoza fulva* (Abb. 18).



Abb. 18: Gefährdete Flechtenarten in Hessen mit Rote-Liste-Kategorie 2 (links: *Ramalina fastigiata*, Fund auf Esche, DBF Spessart; rechts: *Bryoria fuscescens*, Fund auf Bergahorn, DBF Rhön) (Fotos: Kirschbaum)

Es folgt eine Betrachtung der Artenzahlen und der Frequenzen ausgewählter Bioindikatorarten für das Teilprojekt Wetzlar und Gießen die gerade wegen des langen Untersuchungszeitraums lohnend ist. Zunächst ist zu beachten, dass in den ersten drei Durchgängen der Kartierung die Zahl der Messflächen erhöht wurde (Tabelle 1). Seit 2005 ist die Zahl der Messflächen mit knapp unter 120 Flächen konstant. Für die Auswertung der Entwicklung der Artenzahlen in Wetzlar und Gießen wurden alle untersuchten Messflächen einbezogen.

Tabelle 1: Anzahl Messflächen und Flechtenarten an den untersuchten Bäumen in Wetzlar (Wz) und in Gießen (Gi); es gehen alle untersuchten Messflächen ein

Jahr	Wetzlar Anzahl Messflächen	Wetzlar Anzahl Flechtenarten	Gießen Anzahl Messflächen	Gießen Anzahl Flechtenarten	Wz + Gi Anzahl Flechtenarten
1985	35	23	29	13	23
1995	65	41	28	25	41
2005	52	61	64	50	61
2010	52	95	67	79	95
2015	52	101	67	84	101
2020	52	103	66	81	103

Im Jahr 1985 konnten in beiden Städten aufgrund hoher Immissionsbelastung mit einer Summe von 23 Taxa nur ausgesprochen wenige Arten erfasst werden. In den nächsten Jahren hat sich ihre Zahl mehr als verdoppelt, bis auf 61 Arten in 2005 (Abb. 19). Ein Teil des Anstiegs kann in diesem Zeitraum mit der höheren Zahl der Messflächen erklärt werden. Die Entwicklung setzt sich fort mit einem deutlichen weiteren Anstieg im Zeitraum von 2005 bis 2010, in dem

sich die Artenzahl sich von 61 auf 95 Taxa erhöht hat. Als Hauptgrund für diese günstige Entwicklung kann die Reduktion der Luftschadstoff-Konzentration angesehen werden. Seit dem Jahr 2010 stagniert die Artenzahl weitgehend. Besonders im letzten betrachteten Zeitraum 2015 bis 2020 setzt sich der Anstieg der Artenzahlen nicht weiter fort. Während in Wetzlar in 2020 zwei Arten mehr gefunden wurden als 2015, sank die Artenzahl in Gießen in diesem Zeitraum sogar um drei Arten auf 81. Dass in Gießen eine Messfläche weniger untersucht wurde (zwei neue Messflächen, drei Messflächen aufgrund fehlender geeigneter Trägerbäume nicht mehr kartierbar) erklärt den Rückgang der Arten nicht, denn an den Bäumen der ausgefallenen Messflächen waren 2015 nur häufige Arten erfasst worden. Die Entwicklung der Artenzahlen ist wie die der Flechten-Luftgüte von Standortfaktoren wie Immissionen und Mikroklima abhängig. Mögliche Gründe für diese Entwicklung werden in den folgenden Kapiteln diskutiert.

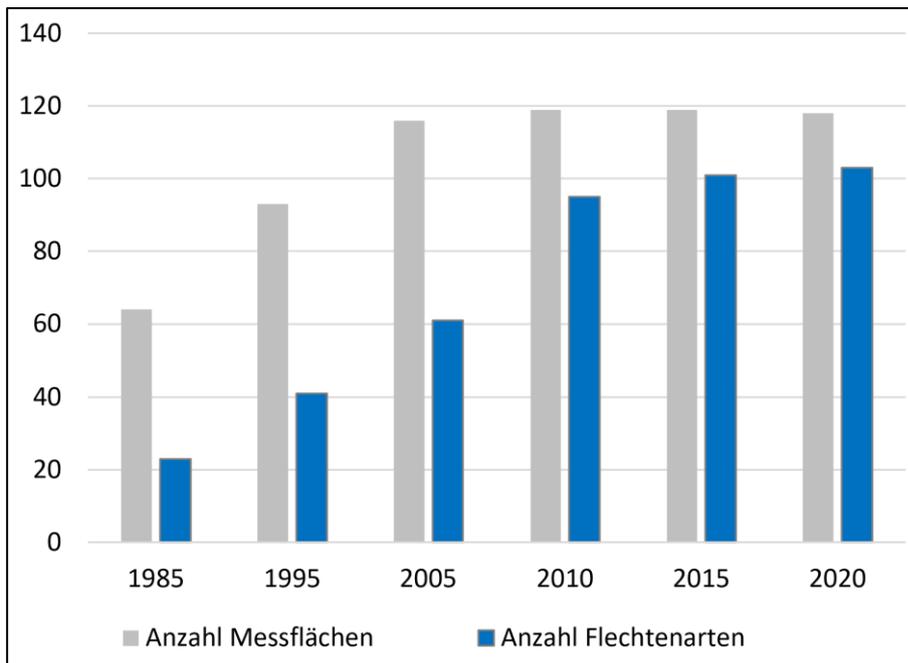
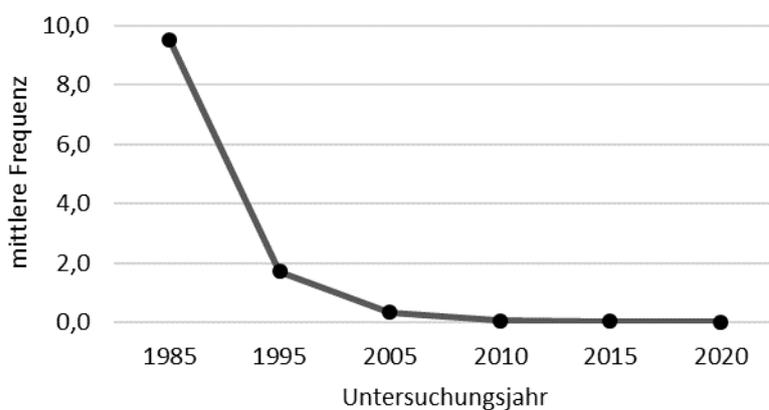


Abb. 19: Zeitliche Entwicklung der Artenzahlen in Wetzlar/Gießen zwischen 1985 und 2020

Die Frequenz ausgewählter Bioindikatorarten seit 1985 gibt weiteren Aufschluss über die Veränderung der Umweltbedingungen der letzten Jahrzehnte. Bei der Frequenz handelt es sich um die Häufigkeit der Flechten (in Anzahl bewachsener Aufnahmegitterfelder). Die Frequenz der Flechten verändert sich seit 1985 stetig. Da die Flechtenarten unterschiedliche artspezifische ökologische Ansprüche haben, erlauben die Änderungen Rückschlüsse auf die erfolgten Umweltveränderungen.

Als erste Gruppe sollen die **Acidophyten** betrachtet werden. Acidophytische Flechtenarten besiedeln natürlicherweise saure Baumborken. Da in der vorliegenden Kartierung jedoch Trägerbaumarten mit subneutraler Borke untersucht wurden, weist eine hohe Frequenz von Acidophyten auf eine Ansäuerung der Baumborken hin. In der Untersuchung 1985 wurde deutlich, dass in vorangegangenen Zeiten mit hohen Konzentrationen säurebildender Luftschadstoffe die Borken angesäuert worden waren und Acidophyten ein geeignetes Substrat

geliefert haben. Die Krustenflechte *Lecanora conizaeoides* als extrem acidophytische, aber auch toxisch-tolerante Art profitierte davon (Abb. 20). Mit den Erfolgen in der Luftreinhaltung brachen die Bestände der Art ein. Dies lässt sich am deutlichen Rückgang der Frequenz zwischen 1985 und 1995 erkennen. Seit 2005 wird *Lecanora conizaeoides* an den Bäumen nahezu nicht mehr nachgewiesen und die Wirkungen saurer Luftverunreinigungen können als beendet angesehen werden. Auch die Blattflechte *Hypogymnia physodes* ist ein Acidophyt, sie gilt jedoch als empfindlich gegenüber Luftverunreinigungen. Über den Zeitraum der Kartierungen ist sie nie in hoher Frequenz aufgetreten, was auch angesichts der Trägerbaumauswahl (Bäume mit subneutraler Borke) nicht zu erwarten war. In den letzten Jahren sinken die Frequenzen, was mit zunehmenden Eutrophierungswirkungen und/oder dem Anstieg der Borken-pH-Werte in Zusammenhang gebracht werden kann.

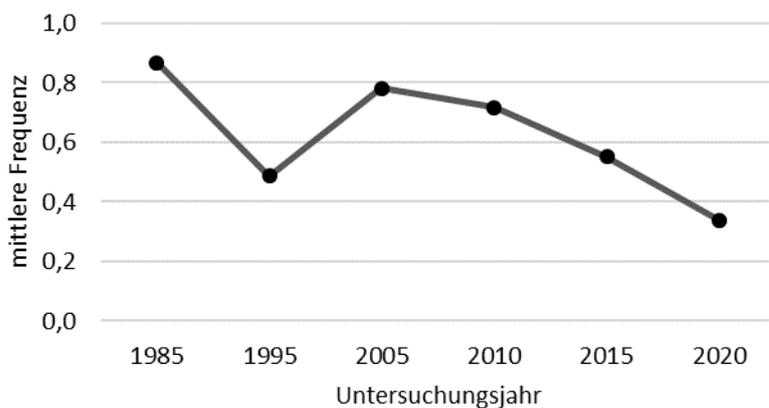


Lecanora conizaeoides

Staubige Kuchenflechte



L:7, T:5, K:5, F:3, R:2, N:5
acidophytische Art



Hypogymnia physodes

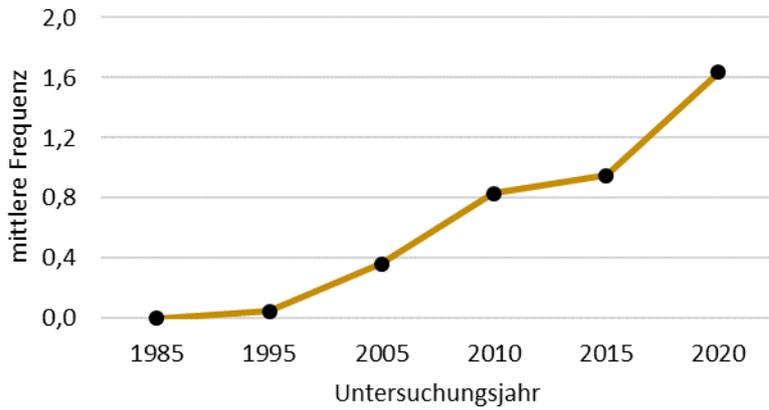
Gewöhnliche Blasenflechte



L:7, T:x, K:6, F:3, R:3, N:3
acidophytische Art

Abb. 20: Entwicklung der Frequenz der **acidophytischen Flechtenarten** *Lecanora conizaeoides* und *Hypogymnia physodes* im Aufnahmegitter in Wetzlar und Gießen; mit Angabe der ökologischen Zeigerwerte (Wirth 2010); Fotos: Kirschbaum

Die nächste betrachtete Gruppe ist die der **Eutrophierungszeiger**. Die meisten Flechtenarten sind an nährstoffarme Standorte angepasst. Sie nehmen die nötigen Nährstoffe über ihre Oberfläche auf. Eine übermäßige Nährstoffversorgung bringt die Symbiose der Flechten aus dem Gleichgewicht und schädigt sie. Es gibt einige Arten, die ein höheres Ausmaß an luftgetragenen, düngenden Verbindungen tolerieren. Sie werden als Eutrophierungszeiger bezeichnet. Die zeitliche Entwicklung der Aufnahmegitterfrequenz für drei dieser Eutrophierungszeiger (Abb. 21) zeigt, dass diese Arten zu Beginn der Untersuchungen Mitte der 80er Jahre in Wetzlar und Gießen nicht gefunden wurden. Nach dem Rückgang saurer Luftschadstoffe und dem zunehmenden Auftreten eutrophierender Luftbestandteile konnten sie sich stark ausbreiten. Diese Entwicklung hält bis heute an. Bei starker Eutrophierung sind diese Arten konkurrenzkräftig und haben das Potential, andere Flechtenarten an den Baumstämmen zu verdrängen.

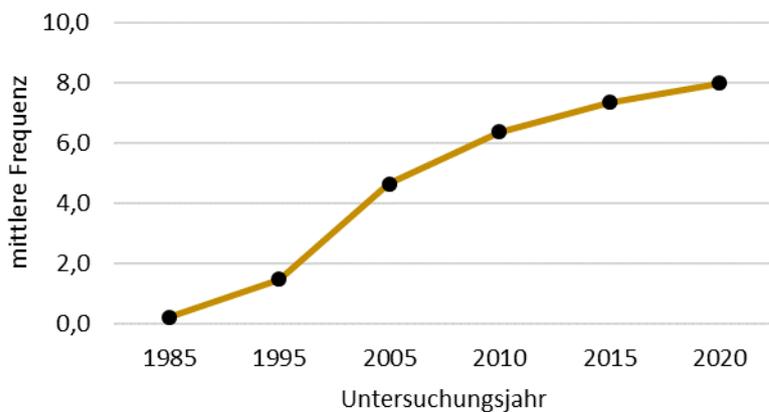


Phaeophyscia nigricans

Schwärzliche
Schwielenflechte



L:8, T:x, K:6, F:x, R:8, N:9
Eutrophierungszeiger

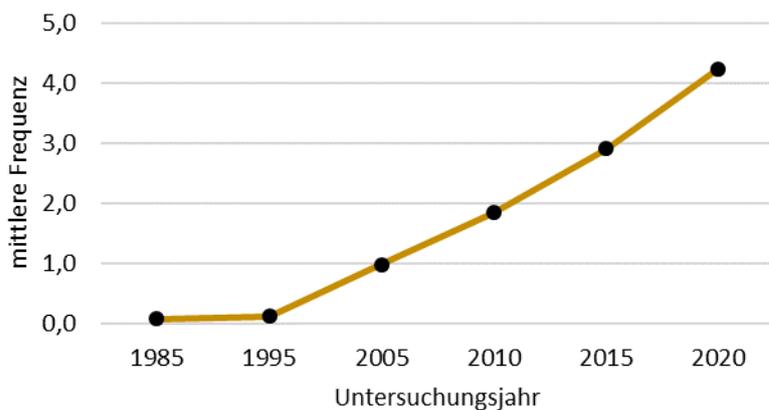


Phaeophyscia orbicularis

Kreisförmige
Schwielenflechte



L:7, T:x, K:6, F:x, R:7, N:9
Eutrophierungszeiger



Xanthoria parietina

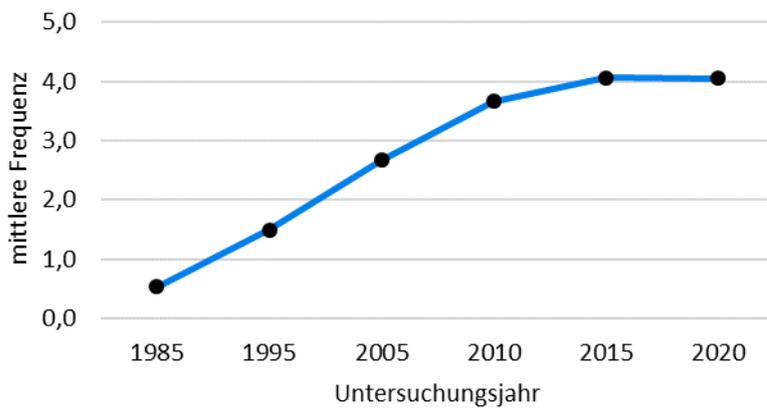
Wand-Gelbflechte



L:7, T:x, K:x, F:3, R:7, N:8
Eutrophierungszeiger

Abb. 21: Entwicklung der Frequenz der **eutrophierungstoleranten Flechtenarten** *Phaeophyscia nigricans*, *Phaeophyscia orbicularis* und *Xanthoria parietina* im Aufnahmegeritter in Wetzlar und Gießen; mit Angabe der ökologischen Zeigerwerte (Wirth 2010); Fotos: Kirschbaum

Der dritten betrachteten Gruppe gehören die meisten Flechtenarten an, die im Rahmen von immissionsbezogenen Flechtenkartierungen untersucht werden. Sie sind **Luftgütezeiger** und verhalten sich sensitiv gegenüber der Gesamtheit der Luftschadstoffe. Typische Vertreter in Wetzlar und Gießen sind die Blattflechte *Parmelia sulcata* und die Strauchflechte *Ramalina farinacea* (Abb. 22). Beide Arten zeigen über die Jahrzehnte der vorliegenden Erhebungen einen stetigen Anstieg der mittleren Frequenz. Sie dokumentieren die langfristig zunehmende Luftgüte im Untersuchungsgebiet. Die positive Entwicklung hat sich allerdings im letzten 5-Jahres-Zeitraum (2015-2020) abgeschwächt. Einer der möglichen Gründe könnte die weiter zunehmende Wirkung der Eutrophierung sein.

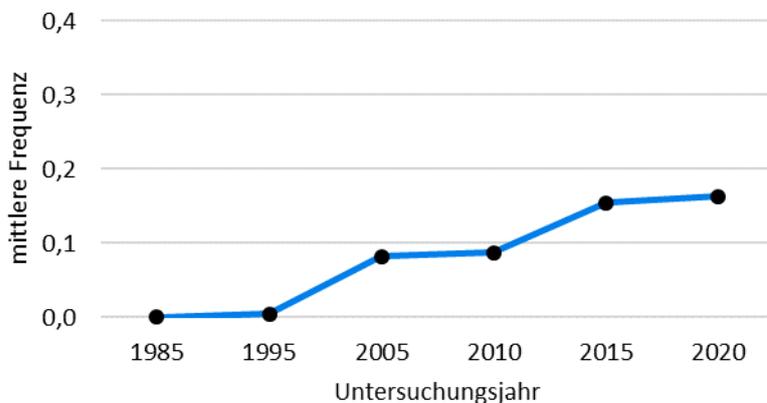


Parmelia sulcata

Furchen-Schüsselflechte



L:7, T:x, K:6, F:3, R:5, N:7
Luftgütezeiger



Ramalina farinacea

Mehlige Astflechte

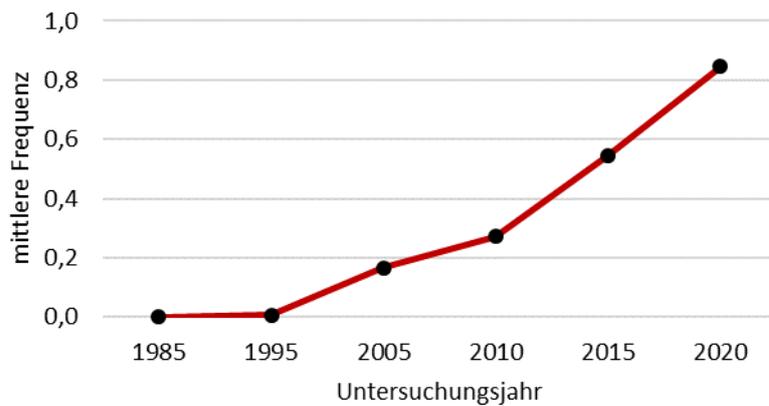


L:6, T:5, K:6, F:4, R:5, N:4
Luftgütezeiger

Abb. 22: Entwicklung der Frequenz der **Luftgütezeiger** *Parmelia sulcata* und *Ramalina farinacea* im Aufnahmegerät in Wetzlar und Gießen; mit Angabe der ökologischen Zeigerwerte (Wirth 2010); Fotos: Windisch

Schließlich verdient noch eine letzte Gruppe von Flechtenarten besondere Aufmerksamkeit. Die Erfassung der sogenannten **Klimawandelzeiger** wird mit Erscheinen der VDI-Richtlinie 3957 Blatt 20 bundesweit empfohlen. Die Wirkungen des Klimawandels, dargestellt durch die Verschiebung der Areale von Flechten, werden dabei dokumentiert. Zu den in Wetzlar und Gießen vorkommenden Klimawandelzeigern gehören die Blattflechtenarten der Gattung

Punctelia (*P. borrieri*, *P. jeckeri*, *P. subrudecta*) sowie *Melanohalea elegantula* (Abb. 23). Hier werden sie seit 2005 auf den Trägerbäumen erfasst und nehmen seitdem kontinuierlich in ihrer Frequenz zu. Dies ist ein Hinweis auf lokale Klimaänderungen im Untersuchungsgebiet. Die Datensätze der Arten gehen in einen Klimawandelzeiger-Index ein, auf den in einem der folgenden Kapitel zur Luftgüte eingegangen wird (vgl. Kapitel 4.7).



***Punctelia* spp.**

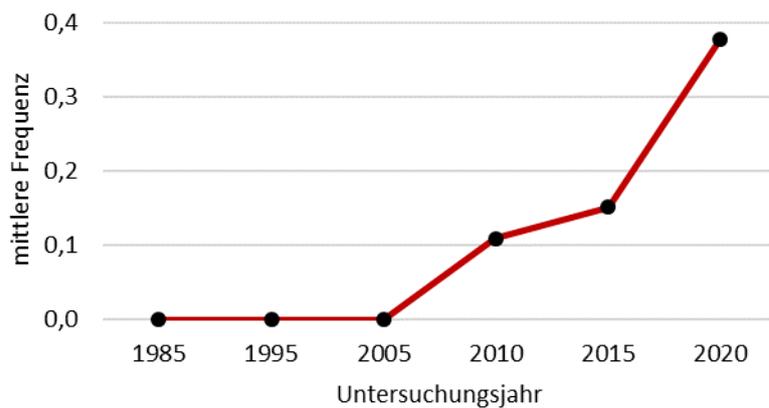
Punktflechte



Foto: Kirschbaum

L:7, T:x, K:6, F:3, R:5, N:7

Luftgütezeiger



Melanohalea

elegantula

Zierliche Braunflechte



Foto: Kirschbaum

L:6, T:5, K:6, F:4, R:5, N:4

Luftgütezeiger

Abb. 23: Entwicklung der Frequenz der **Klimawandelzeiger**

Punctelia spp. (*P. borrieri/jeckeri/subrudecta*) und *Melanohalea elegantula* im Aufnahmegeritter in Wetzlar und Gießen; mit Angabe der ökologischen Zeigerwerte nach (Wirth 2010)

5.3 Mittels Flechten ermittelte Luftgüte in den ländlichen Gebieten Hessens (DBF)

Mit der Flechtenkartierung und dem Folienverfahren kommen zwei Methoden zum Einsatz, die zur Dokumentation der Luftgüte dienen.

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 B). Die Ermittlung des Luftgüteindex basiert auf Flechten-Diversitätswerten (FDW). Der FDW quantifiziert die Artenzahl und Häufigkeit der vorkommenden Flechtenarten in einem Flechtaufnahmegitter. Er wird getrennt für Referenzarten und Eutrophierungszeiger ermittelt. Die Bewertung der Flechten-Luftgüte erlaubt eine Aussage zu den Wirkungen von Luftverunreinigungen im Allgemeinen sowie zu den Wirkungen eutrophierender Luftbestandteile.

Auch für die Luftgüterechnungen der ländlichen DBF gilt, dass bei der Auswertung nach der neuen Richtlinienfassung von 2023 vorgegangen wurde. Die Datensätze aller Kartierungsdurchgänge seit 1992 wurden nach der aktuellen Fassung neu berechnet (vgl. auch Methodenkapitel 4.6.1).

Im Mittel erreichten die Dauerbeobachtungsflächen 2022 Luftgüteeurteilungen von „gering“ (Klasse 2) bis „mäßig“ (Klasse 3) (Abb. 24). Die südhessische und ballungsraumnahe DBF Biebesheim schneidet am schlechtesten ab, während die osthessischen ländlich geprägten DBF Rhön und Spessart die höchsten Luftgüteeurteilungen erreichen. Im Folgenden werden die Dauerbeobachtungsflächen einzeln dargestellt und ihre lufthygienische Entwicklung seit 1992 dargelegt.

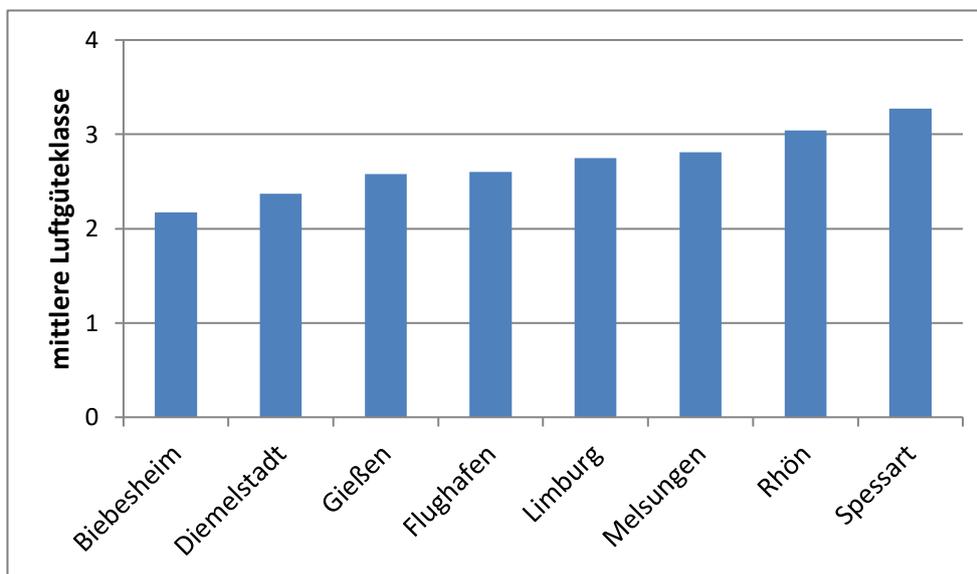


Abb. 24: Mittels Flechten ermittelte Luftgüte auf den hessischen Dauerbeobachtungsflächen 2022

Dauerbeobachtungsfläche Diemelstadt

Auf der Dauerbeobachtungsfläche (DBF) Diemelstadt, deren Luftgüte zu Beginn der Erhebungen in 1992 im Mittel als gering bis mäßig eingestuft worden war, bleibt die Flechten-Diversität der Referenzarten (blaue Säulen) bis heute auf einem niedrigen Niveau (Abb. 25). Auch die Eutrophierungszeiger (rote Säulen) starteten 1992 mit niedrigen Diversitätswerten. Diese stiegen jedoch im Laufe der Jahre weiter an und erhöhten sich zwischen 2007 und 2012 sprunghaft, eine Entwicklung, die sich im letzten Fünfjahreszeitraum noch etwas gesteigert hat. Die Dauerbeobachtungsfläche Diemelstadt erreicht landesweit die höchsten Flechten-Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger bei gleichzeitig für Hessen hoher Stickstoffdeposition ($12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) (UBA - Umweltbundesamt 2018). Die DBF liegt an der nordwestlichen hessischen Landesgrenze und damit am nächsten zu den Intensivlandwirtschaftsgebieten der benachbarten Bundesländer. Neben vor Ort emittierten düngenden Stoffen kann daher auch der Ferntransport in das hessische Gebiet hinein eine Rolle bei der Nährstoffbelastung spielen.

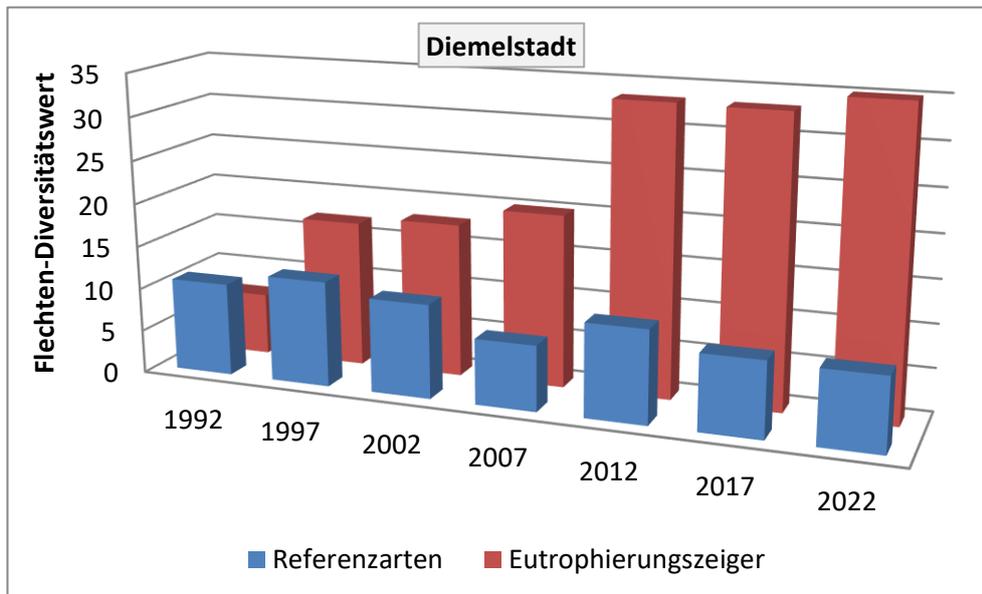


Abb. 25: DBF Diemelstadt - Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2022

Es ist festzuhalten, dass sich im Raum Diemelstadt seit 2012 eutrophierende Luftinhaltsstoffe deutlicher auf die Diversität der Flechten auswirken als im Zeitraum davor. So werden eutrophierungstolerante Arten hier besonders gefördert. Der Anstieg der Eutrophierungszeiger wirkt sich seit längerem negativ auf die Luftgütebewertung aus (Abb. 26). So konnten 2012 und 2017 keine grünen Flächen (hohe Luftgüte) ausgezeichnet werden. Erst im Kartierungsjahr 2022 wurde wieder für eine Fläche die Stufe „hohe Luftgüte“ erreicht (Abb. 27).

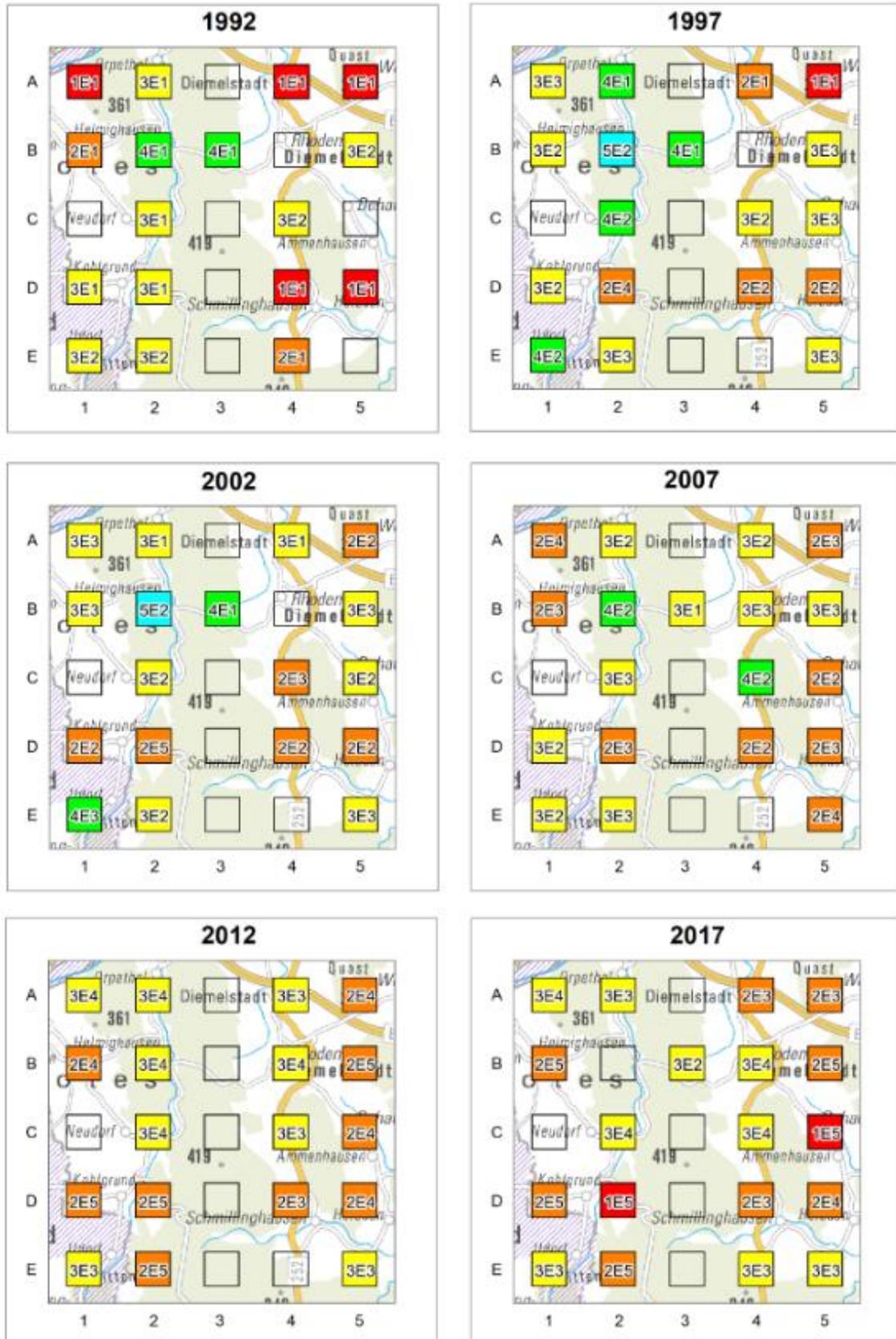


Abb. 26: DBF Diemelstadt - Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017

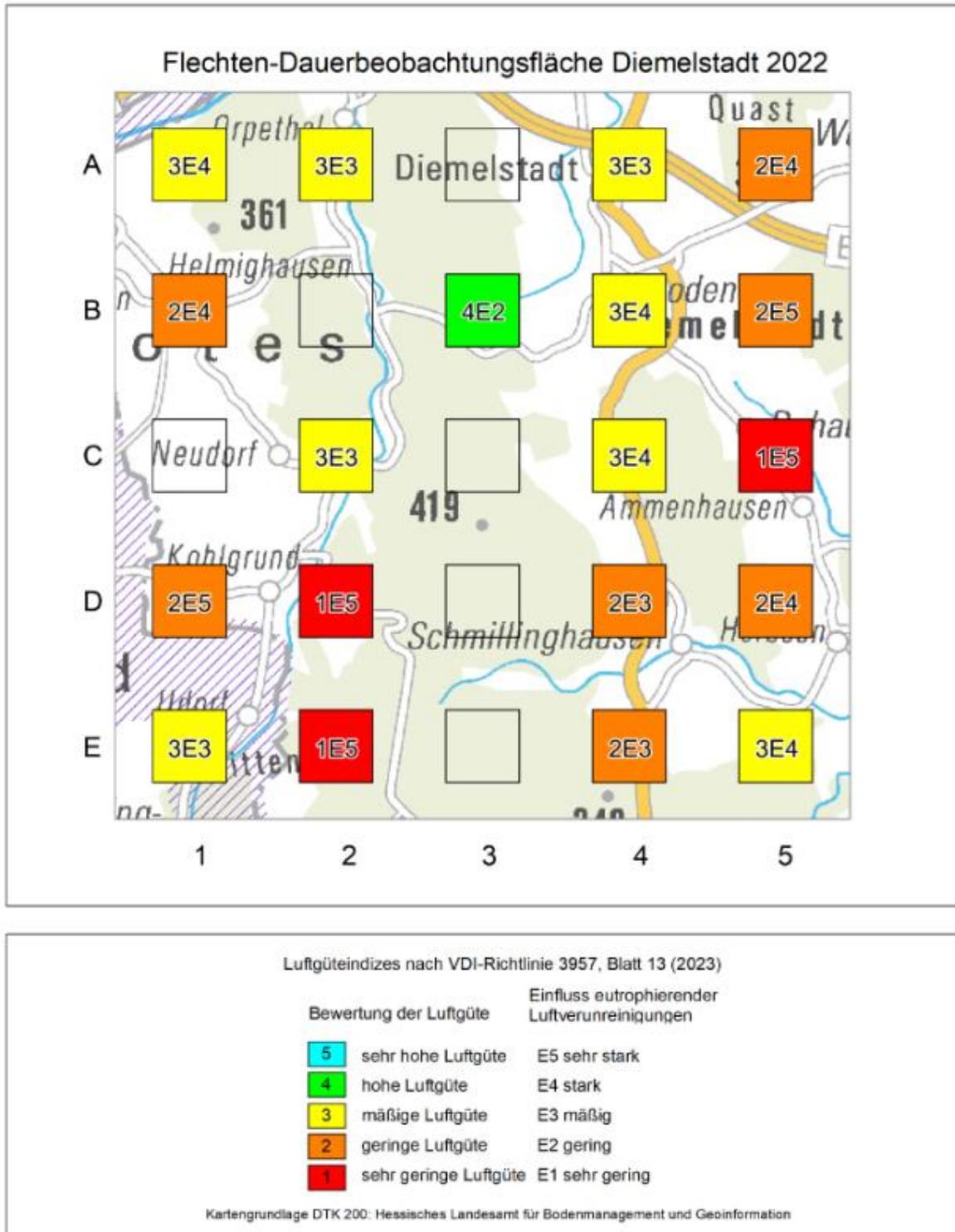


Abb. 27: DBF Diemelstadt - Luftgütekarte 2022

Dauerbeobachtungsfläche Melsungen

Der Raum Melsungen, als ursprünglich am stärksten belastete Dauerbeobachtungsfläche eingestuft, beginnt 1992 gemeinsam mit der Fläche am Flughafen mit der geringsten Flechten-Diversität aller Dauerbeobachtungsflächen (Abb. 28). Dies trifft sowohl für die Referenzarten als auch für die Eutrophierungszeiger zu. Mit der Stilllegung der östlich gelegenen großen SO₂-Emittenten im Raum Leipzig-Bitterfeld Anfang der neunziger Jahre ließen die SO₂-Immissionen nach, die insbesondere bei winterlichen Ostwindwetterlagen bis in den Nordosten von Hessen die Flechtenbestände dezimierten. In Folge begann auch auf der DBF Melsungen eine allmähliche Erholung der Flechtenvegetation. Die Flechten-Diversitätswerte der Referenzarten steigen bis heute an, und dokumentieren eine verbesserte Luftgüte. Parallel dazu verzeichnen die Eutrophierungszeiger einen stetigen Anstieg ihrer Diversitätswerte, der prozentual den der Referenzarten noch übertrifft. Es ist festzuhalten, dass die lufthygienische Situation sich auch in den letzten fünf Jahren wieder leicht verbessert hat, die günstige Entwicklung jedoch durch die zunehmenden Eutrophierungswirkungen gebremst wird.

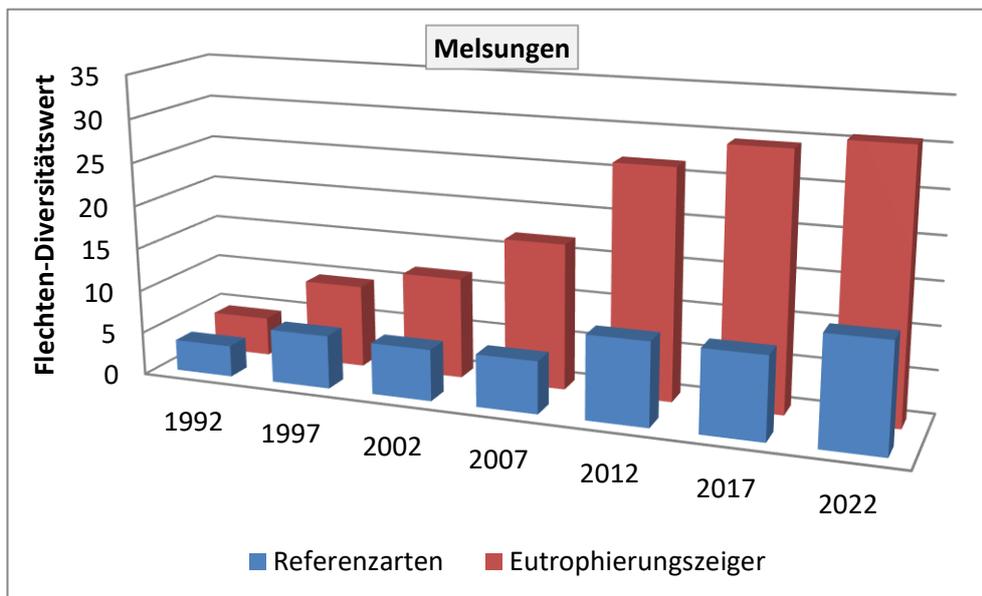


Abb. 28: DBF Melsungen - Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2022

Die Karte der zeitlichen Entwicklung der Luftgüte (Abb. 29) im Raum Melsungen veranschaulicht die leichte aber stetige Verbesserung im Laufe der letzten Jahrzehnte. Die ungünstige Luftgüte „sehr gering“ (rot) in Niederbeisheim wird aktuell nicht mehr gefunden (Abb. 30). Der Süden der Dauerbeobachtungsfläche, der den Knüllwald betrifft, zeigt –wie auch vor fünf Jahren – eine hohe Luftgüte (grün).

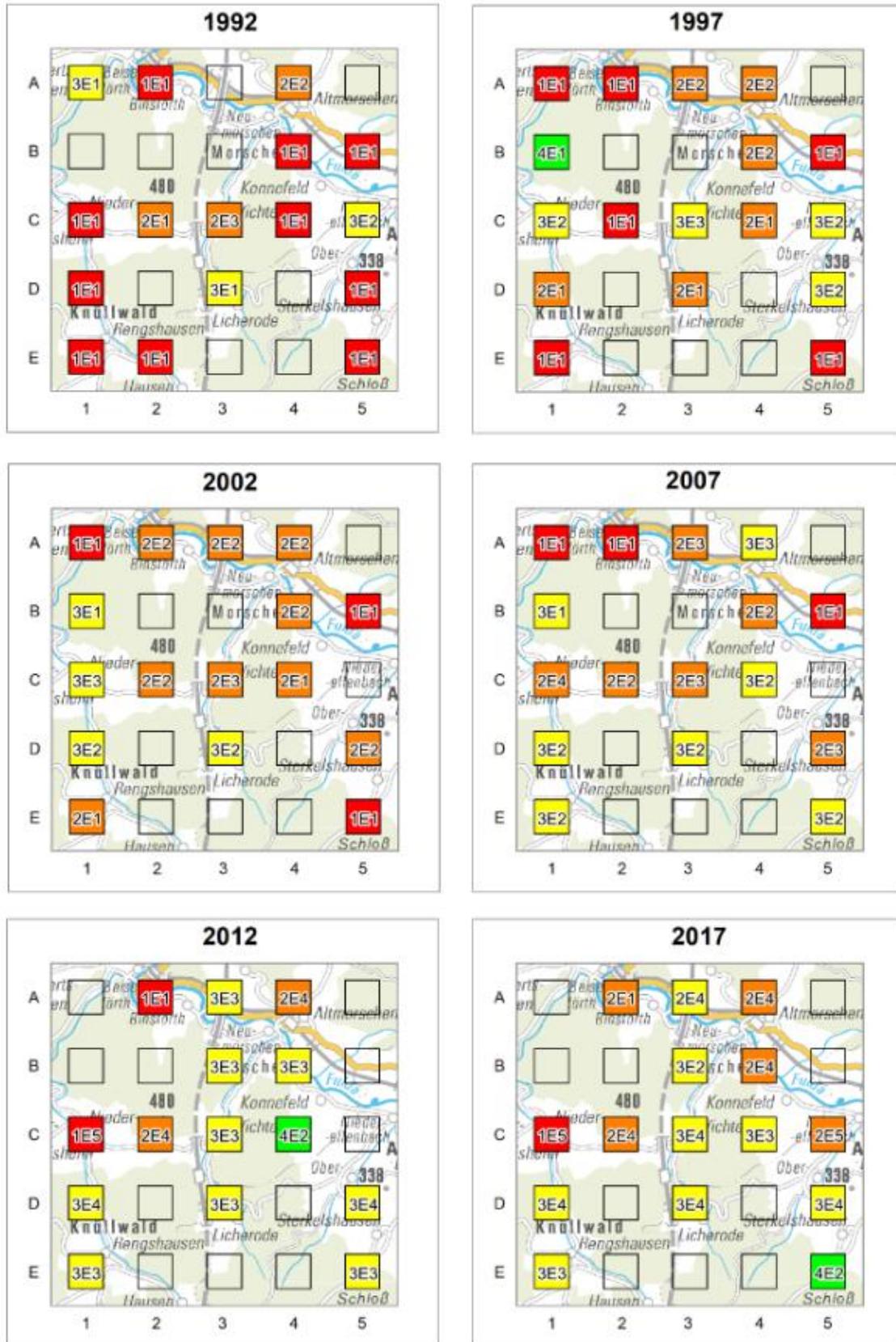


Abb. 29: DBF Melsungen - Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017

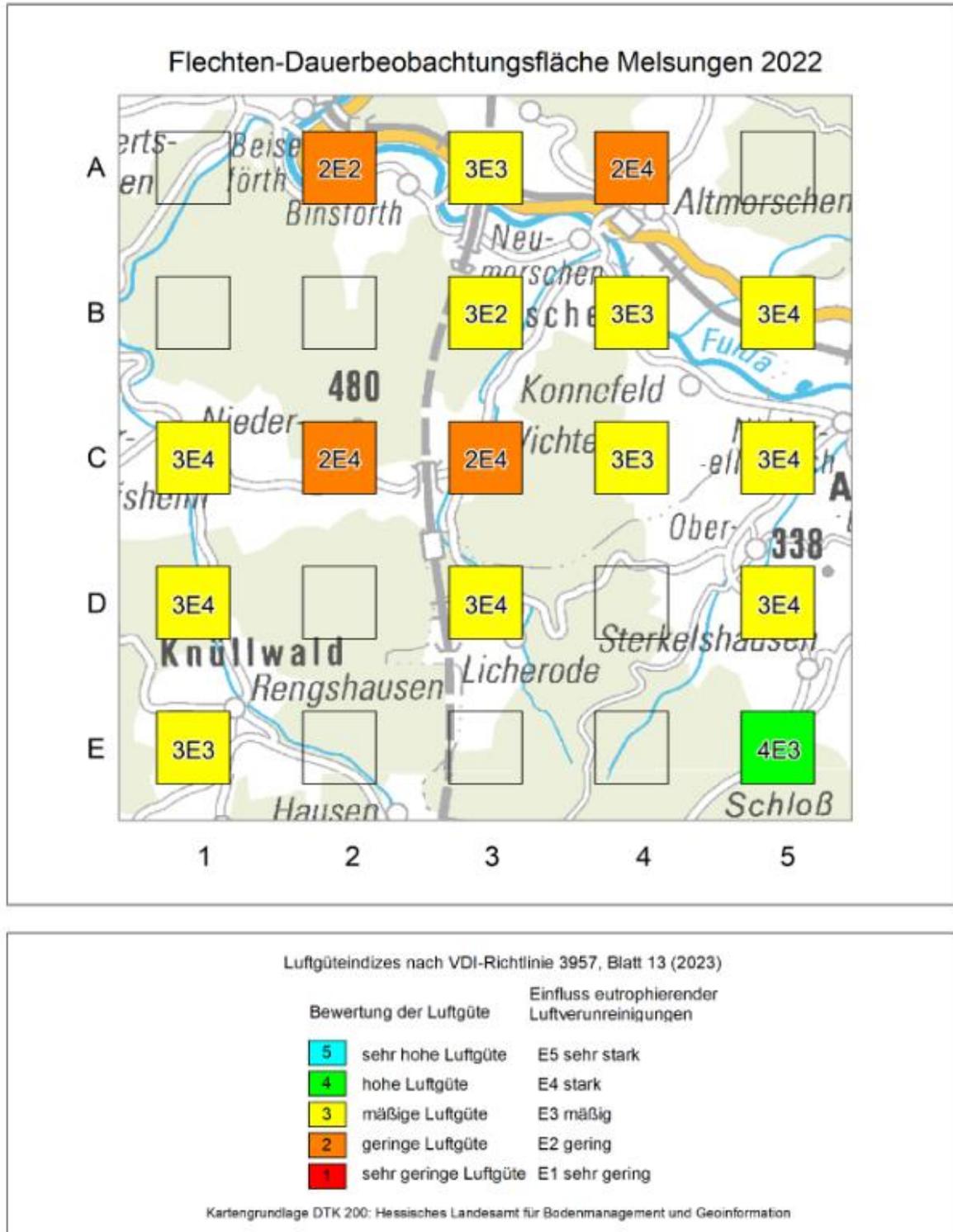


Abb. 30: DBF Melsungen - Luftgütekarte 2022

Dauerbeobachtungsfläche Rhön

Die DBF Rhön wies 1992 von allen Dauerbeobachtungsflächen bei weitem die höchste Flechten-Diversität der Referenzarten auf. Da sie 1997 nicht untersucht wurde, kann über einen relativ langen Zeitraum von 10 Jahren keine Aussage getroffen werden. In 2002 musste ein deutlicher Rückgang der Referenzarten festgestellt werden (Abb. 31). Seitdem stagniert die Diversität der Referenzarten auf mittlerem Niveau. Bei den Eutrophierungszeigern hingegen ist ein steter Anstieg zu konstatieren, der sich auch im letzten Fünfjahreszeitraum weiter fortgesetzt hat. Die vom UBA veröffentlichte Stickstoffdeposition ($11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) (UBA - Umweltbundesamt 2018) liegt nur knapp unter der von Diemelstadt.

Es wird somit eine zunehmende Wirkung eutrophierender Luftbestandteile belegt. In Folge werden die Referenzarten, die gegen diese Immissionen empfindlich reagieren, geschädigt.

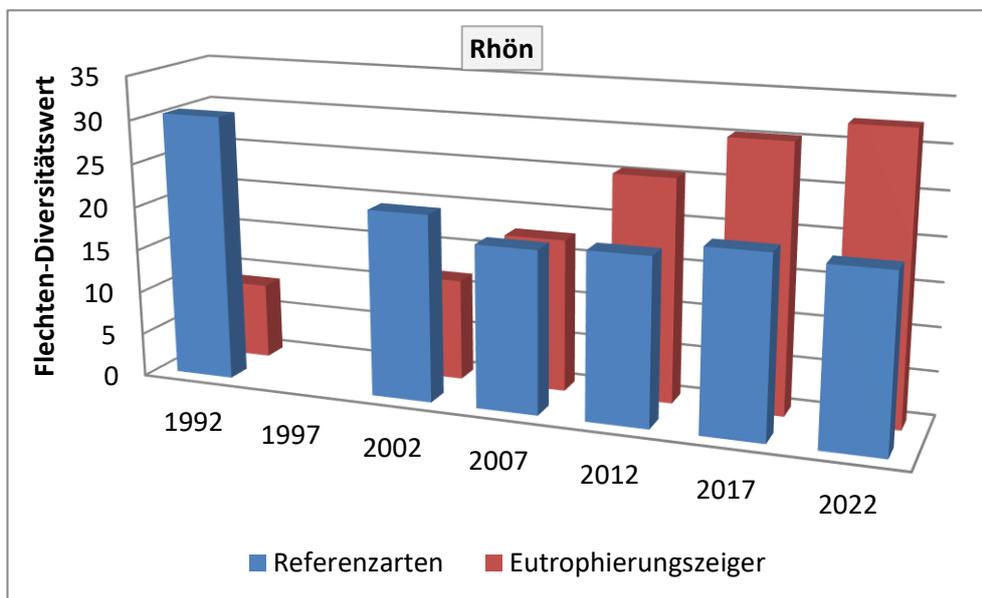


Abb. 31: DBF Rhön - Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2022

Die Luftgütekarten (Abb. 32, Abb. 33) der DBF Rhön zeigen, dass die lufthygienische Situation sich in den letzten fünf Jahren nicht weiter verbessert hat. Statt sieben sind nur noch drei Messflächen grün (hohe Luftgüte) und die Zahl der orange gekennzeichneten Messflächen hat sich von zwei auf vier erhöht. Bei einem weiteren Anstieg der Eutrophierungszeiger ist in Zukunft auch auf der DBF Rhön mit einer zunehmend ungünstigeren Bewertung der Luftgüte zu rechnen.

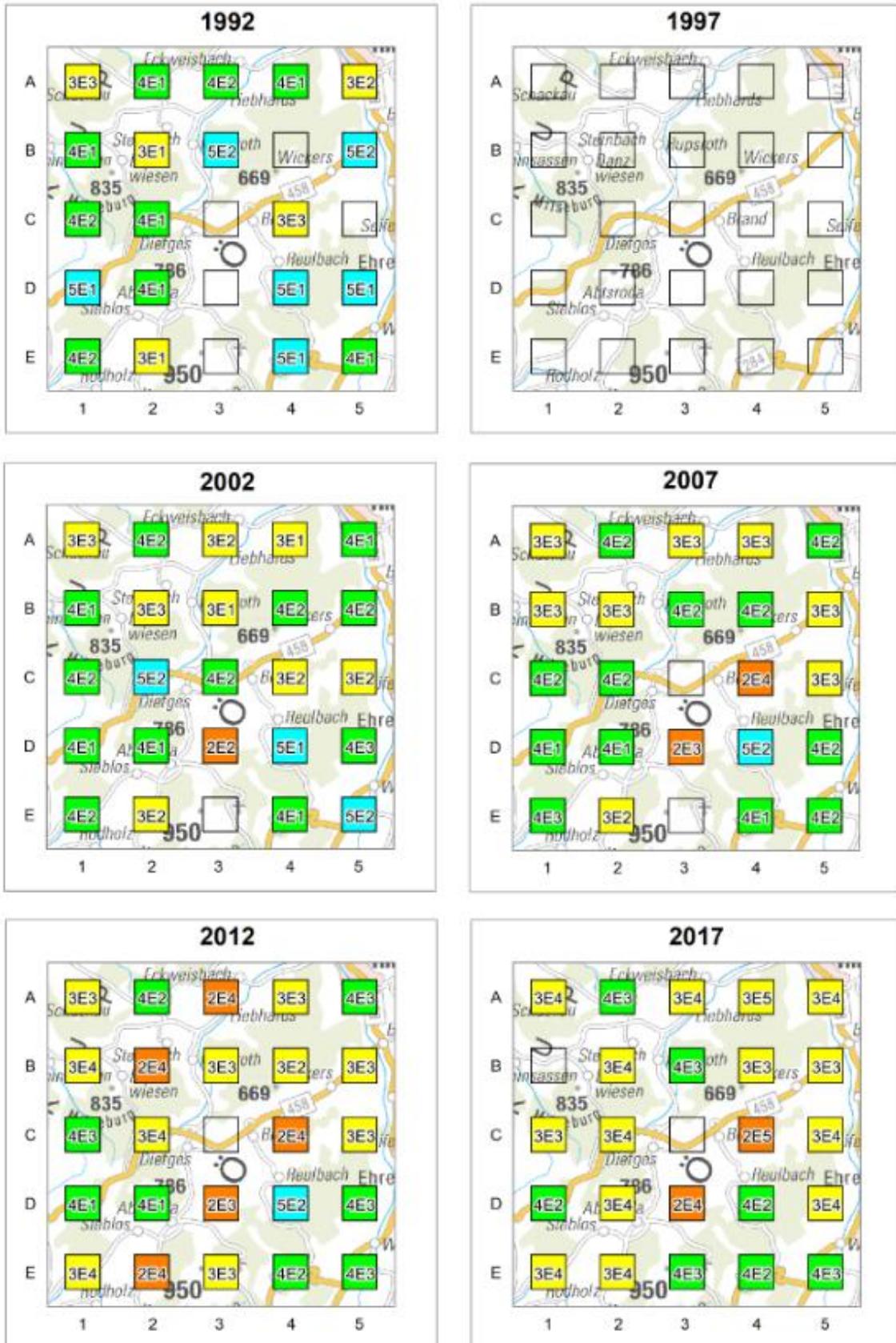


Abb. 32: DBF Rhön - Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017

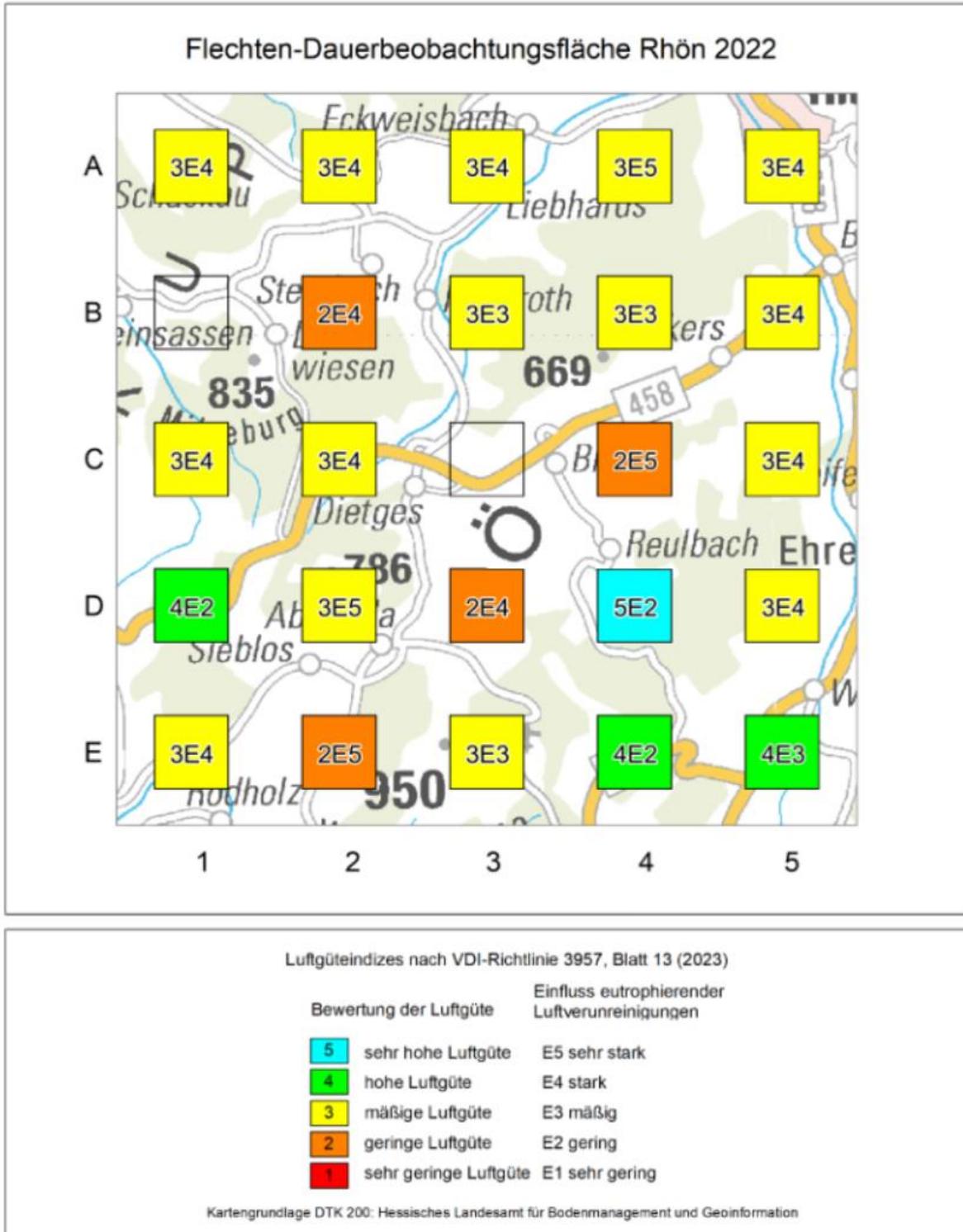


Abb. 33: DBF Rhön - Luftgütekarte 2022

Dauerbeobachtungsfläche Gießen

Die im ländlichen Umland südöstlich des Gießener Stadtgebietes gelegene Dauerbeobachtungsfläche Gießen, 1992 als hoch belastet eingestuft, verhält sich in ihrer Flechtenentwicklung ähnlich wie Melsungen. Von einem geringen Anfangsniveau ausgehend, nehmen sowohl die Diversitätswerte der Referenzarten als auch die der Eutrophierungszeiger stetig zu (Abb. 34). Die positive Entwicklung der Referenzarten, die eine verbesserte Luftgüte indiziert, wird durch die starken Effekte der Eutrophierung gebremst.

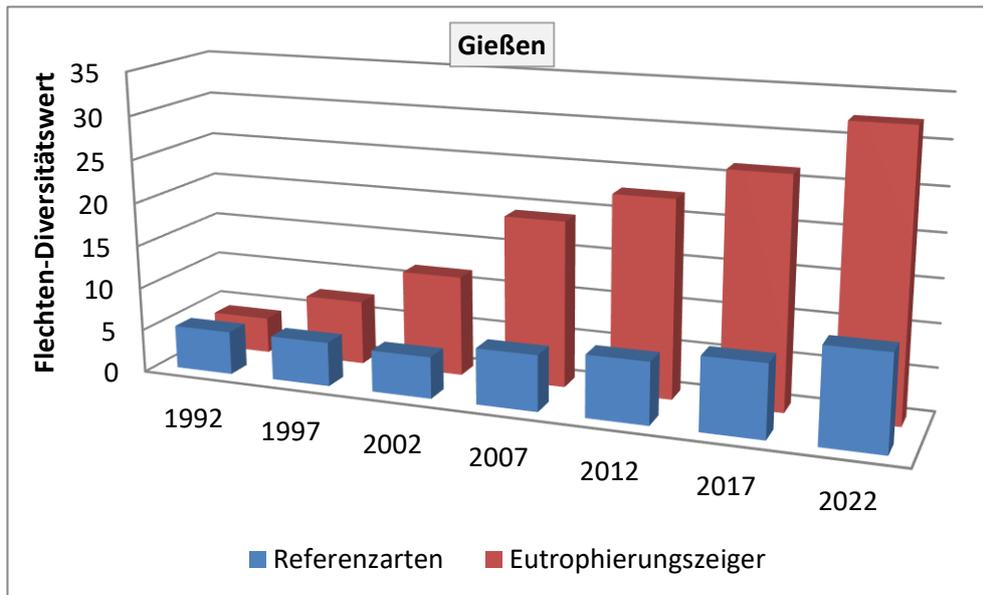


Abb. 34: DBF Gießen - Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2022

Die zeitliche Entwicklung der Luftgüte im Raum Gießen (Abb. 35) zeigt, dass die positive Entwicklung, die von 2002 bis 2007 eingetreten war, sich bis 2012 nicht fortgesetzt hat. Im Beobachtungszeitraum von 2012 bis 2017 weisen drei Messflächen schlechtere Luftgüteebewertungen auf, während sich fünf Messflächen verbessert haben. Dabei haben sich die walddahen Messflächen im Nordwesten der Dauerbeobachtungsfläche besser entwickelt als die landwirtschaftlich geprägten südlichen gelegenen Flächen. In den letzten fünf Jahren bis 2022 (Abb. 36) hat die Luftgüteebewertung trotz positiver Entwicklung der Referenzarten nachgelassen: Dies wird, wie auch auf anderen Dauerbeobachtungsflächen, durch die überproportional starke Zunahme des Diversitätswertes der Eutrophierungszeiger verursacht.

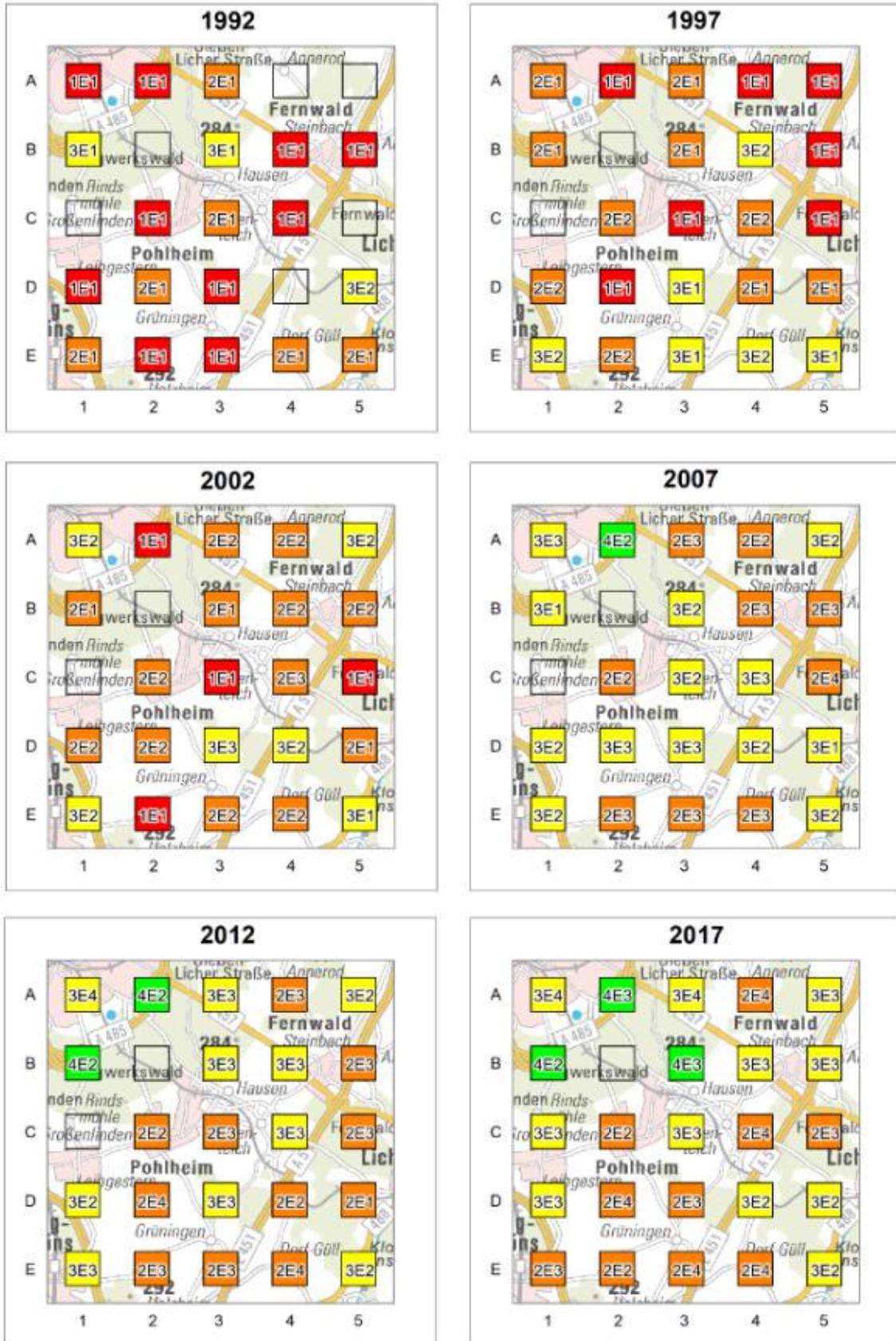


Abb. 35: DBF Gießen - Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017

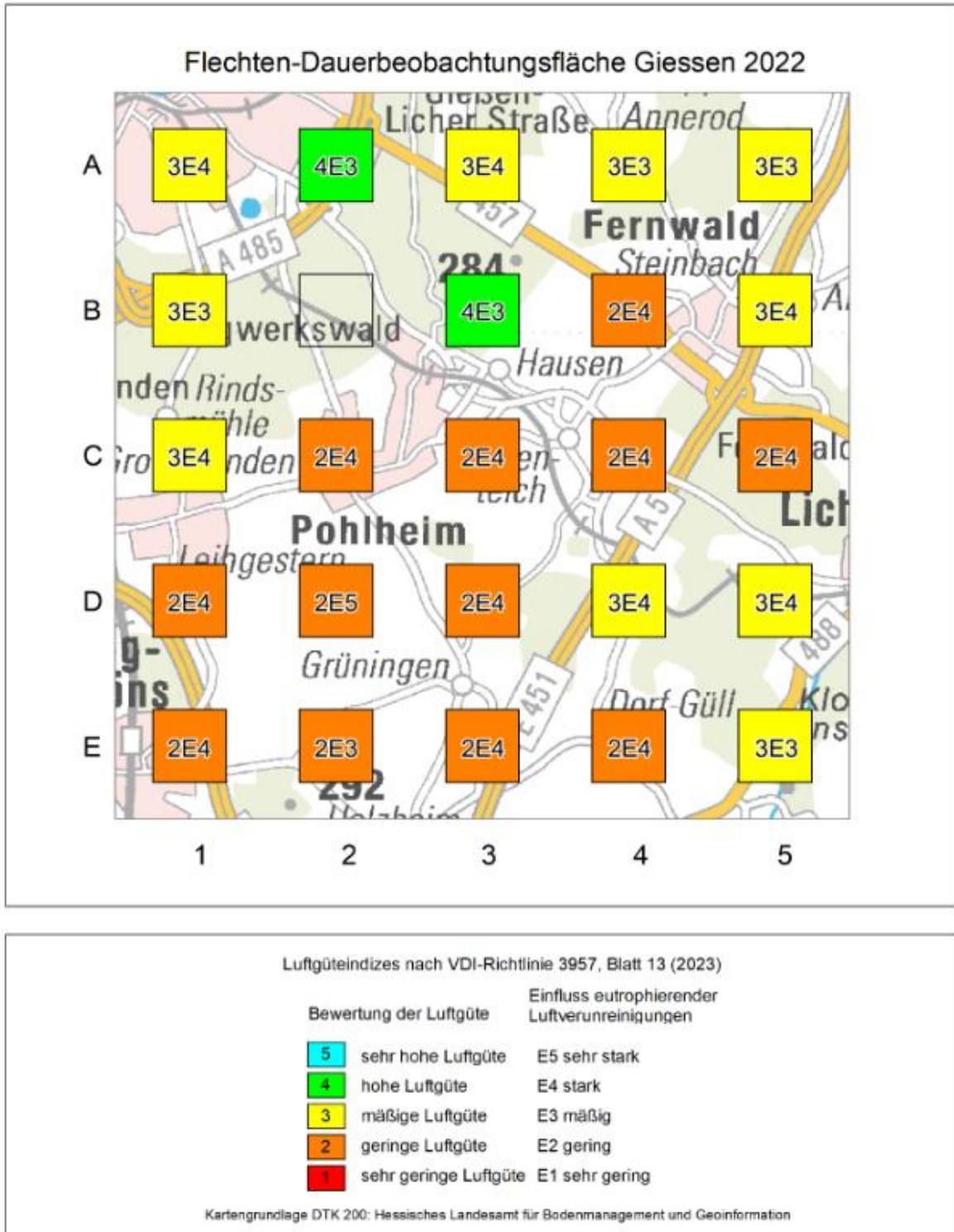


Abb. 36: DBF Gießen - Luftgütekarte 2022

Dauerbeobachtungsfläche Limburg

Die zu Anfang der Untersuchungen als nur gering belastet eingestufte Dauerbeobachtungsfläche Limburg startete 1992 mit vergleichsweise hohen Flechten-Diversitätswerten insbesondere der Referenzarten (Abb. 37). Die Häufigkeit dieser Arten nimmt bis 2007 ab, erholt sich in den Folgejahren aber wieder. Die Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger verzeichnen gleichzeitig einen Anstieg, der bis 2022 anhält und eine deutlich günstigere Entwicklung der durch die Flechten angezeigte Luftgüte nicht zulässt.

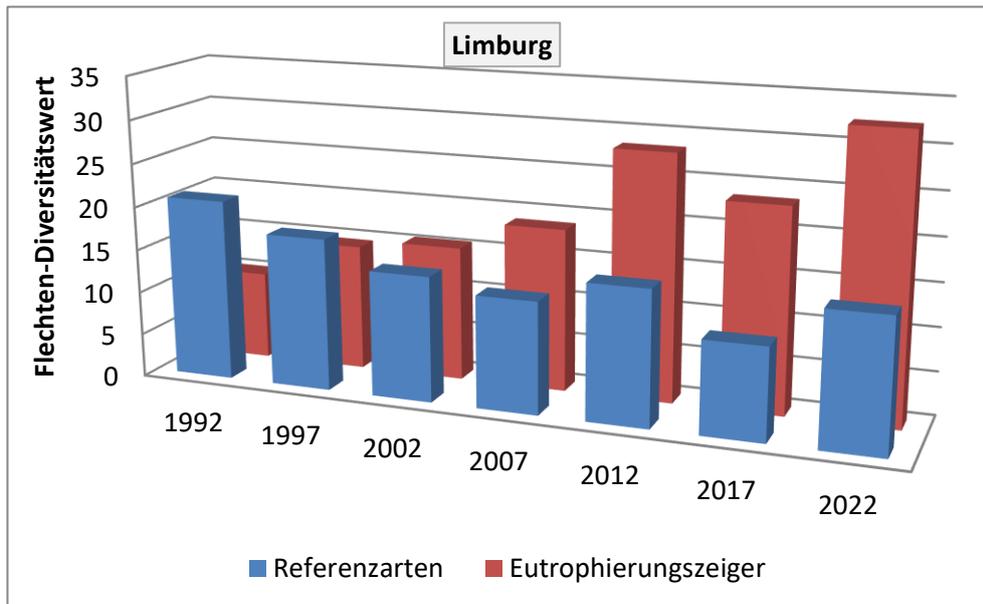


Abb. 37: DBF Limburg - Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2022

Die Entwicklung der Luftgüte (Abb. 38) der ursprünglich gering belasteten Dauerbeobachtungsfläche (DBF) Limburg stellt sich über den fünfundzwanzigjährigen Untersuchungszeitraum als ungünstig heraus. Es gibt zwar nur eine einzige Messfläche in 2007, die der Kategorie „Luftgüte sehr gering“ (rot) zuzuordnen ist. Jedoch steigt die Zahl der Flächen in der Kategorie „Luftgüte gering“ (orange) an und erreicht im Jahr 2022 sechs Flächen (Abb. 39). Auf den landwirtschaftlich intensiver genutzten Flächen um Villmar werden im gesamten Zeitraum höhere Belastungen dokumentiert als im walddreichen Gebiet im Osten der DBF um Langhecke.

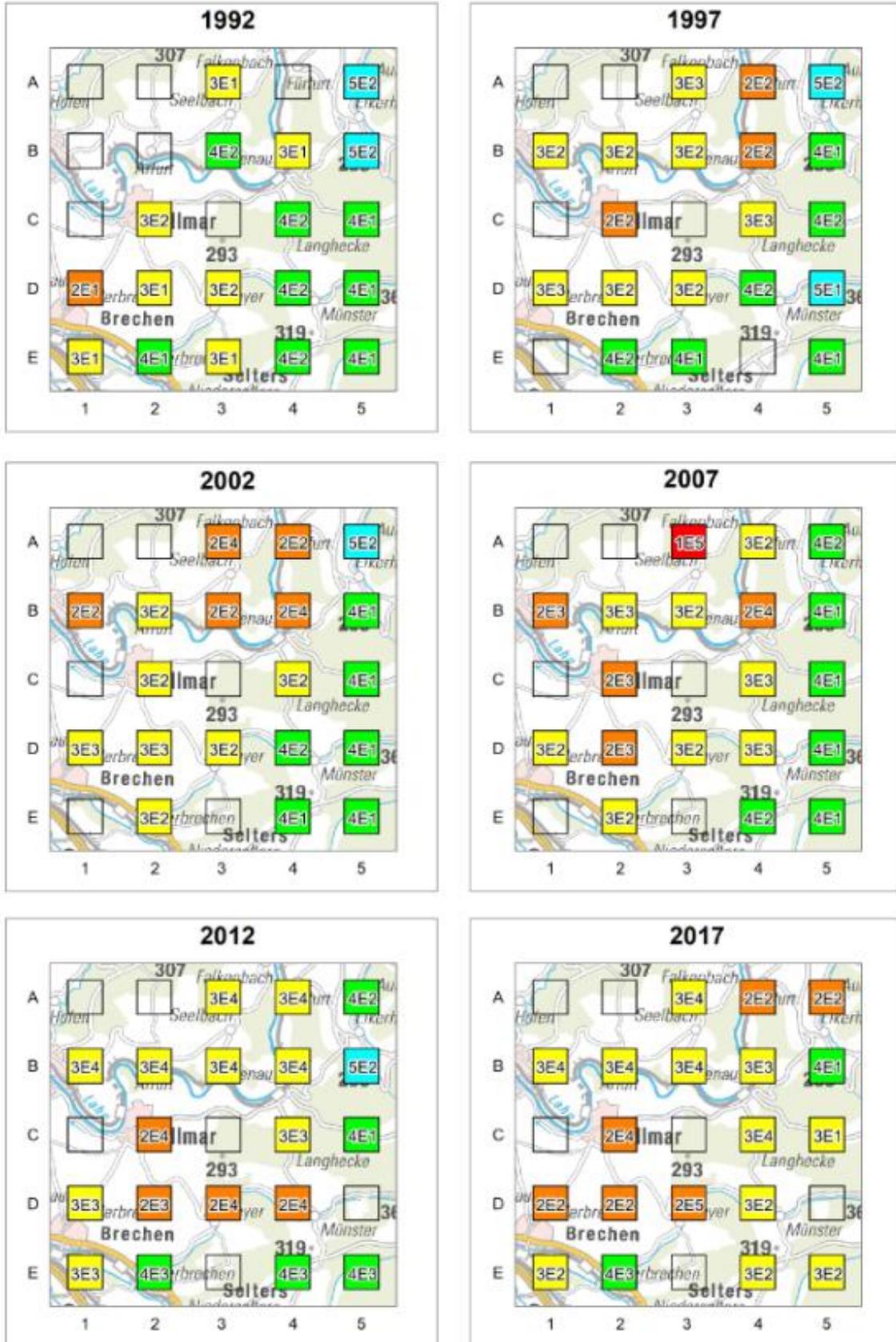


Abb. 38: DBF Limburg - Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017

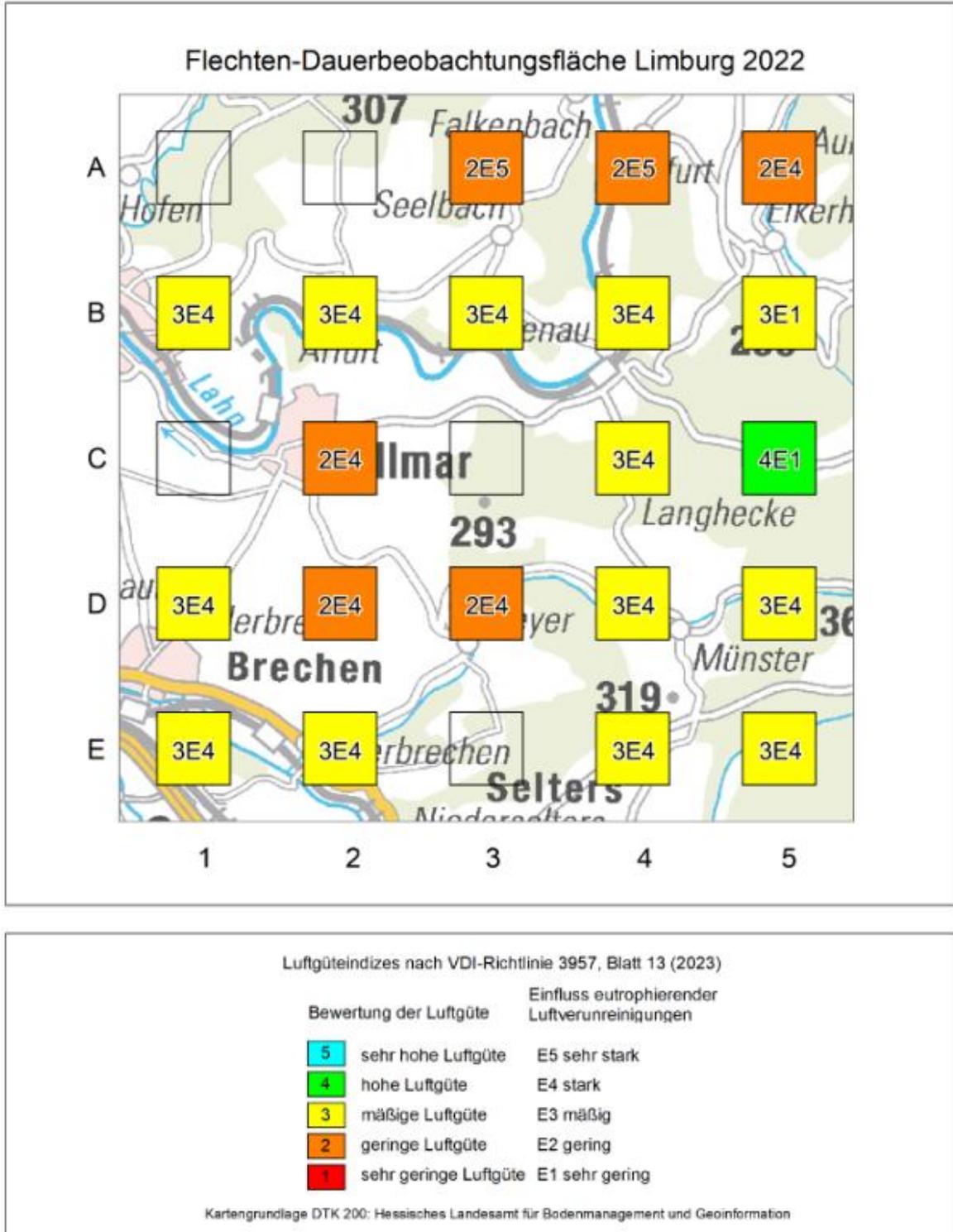


Abb. 39: DBF Limburg - Luftgütekarte 2022

Dauerbeobachtungsfläche Spessart

Die DBF Spessart – ursprünglich ebenfalls als mäßig bis gering belastet eingestuft – verhält sich hinsichtlich der Diversitäts-Entwicklung beider Flechtengruppen (Abb. 40) ähnlich wie Limburg. Einer vorübergehenden Abnahme der Diversitätswerte der Referenzarten in 2002 und 2007 und anschließenden Erholung der Bestände steht eine deutliche Zunahme der Eutrophierungszeiger zwischen 2007 und 2012 gegenüber. Seitdem sind Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger jedoch bis heute nicht weiter angestiegen, so wie auf den anderen Dauerbeobachtungsflächen (Abb. 56). Im letzten Betrachtungszeitraum sind sie sogar geringfügig gesunken. Die nur mittleren Eutrophierungswirkungen erlauben den nährstoffempfindlichen Referenzarten ihre Bestände zu erhalten, was sich günstig auf die Bewertung der Luftgüte auswirkt.

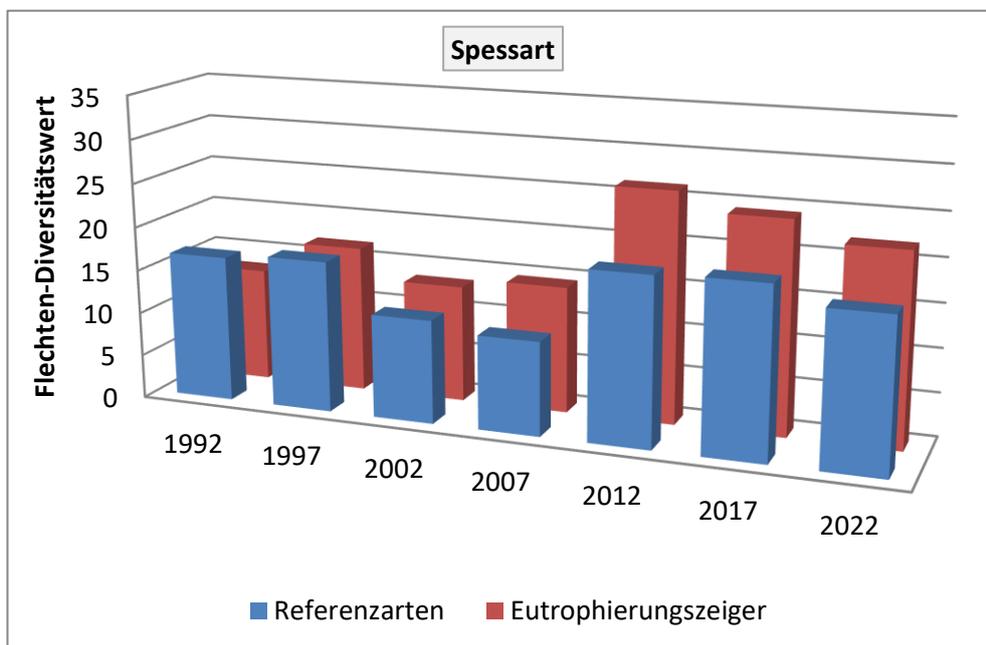


Abb. 40: DBF Spessart - Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2022

Auch die kartografische Darstellung der Luftgüte auf der Dauerbeobachtungsfläche Spessart (Abb. 41) zeigt, dass nach einem bislang nicht erklärbaren Absinken der Luftgüteindizes von 1997 bis 2002 diese sich wieder erholten. Seit 2012 stellt sich die lufthygienische Situation der DBF wieder ausgesprochen gut dar. Auch sind in den letzten fünf Jahren kaum Änderungen eingetreten. Lediglich eine Messfläche südwestlich von Jossa ist um eine Luftgütestufe schlechter eingestuft (Abb. 42). Bis heute ist die Dauerbeobachtungsfläche Spessart hessenweit mit der besten Luftgüte ausgezeichnet. Vermutlich geben die im landesweiten Vergleich niedrigen Stickstoffdepositionen von $9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ hier den qualitätsgebenden Referenzarten gute Gedeihmöglichkeiten. Auch der Waldreichtum trägt wahrscheinlich zur günstigen lufthygienischen Situation bei.

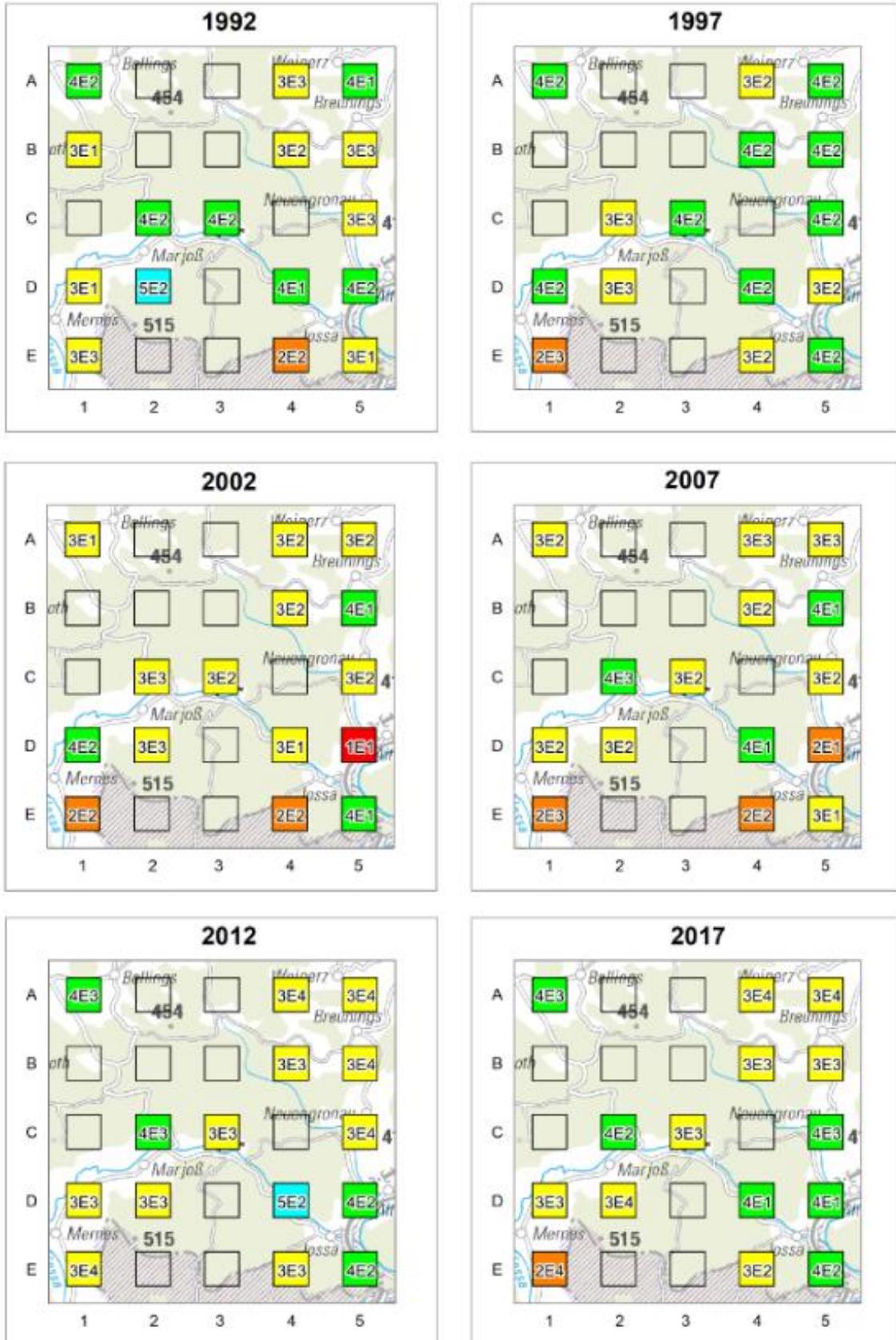


Abb. 41: DBF Spessart - Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017

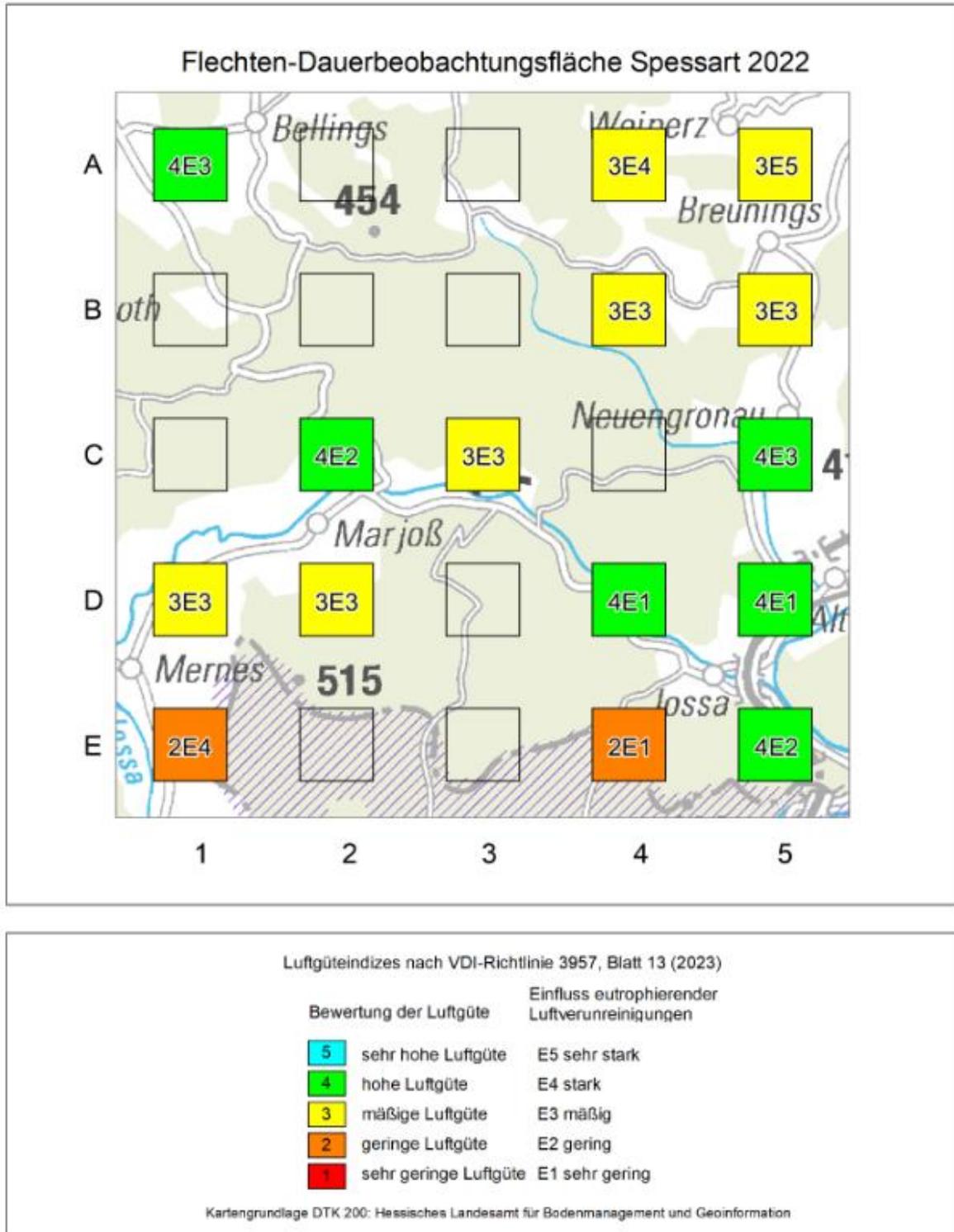


Abb. 42: DBF Spessart - Luftgütekarte 2022

Dauerbeobachtungsfläche Biebesheim

Die Flechten-Diversität der DBF Biebesheim entwickelte sich (Abb. 43) – beginnend mit einem sehr niedrigen Ausgangsniveau – ähnlich wie die der anderen in 1992 hoch belasteten Dauerbeobachtungsflächen Flughafen, Melsungen und Gießen. Die Diversität der Referenzarten nimmt im Beobachtungszeitraum zwar leicht zu, bleibt jedoch bis heute auf einem niedrigen Niveau. Die Häufigkeit der Eutrophierungszeiger nimmt bis heute deutlich zu; der rasante Anstieg zwischen 2007 bis 2012 hat sich in den Folgejahren bis 2022 verlangsamt. Die Werte weisen auf eine langjährige lufthygienische Belastung und eine zusätzliche ungünstige Wirkung von Nährstoffeinträgen auf dieser Dauerbeobachtungsfläche hin.

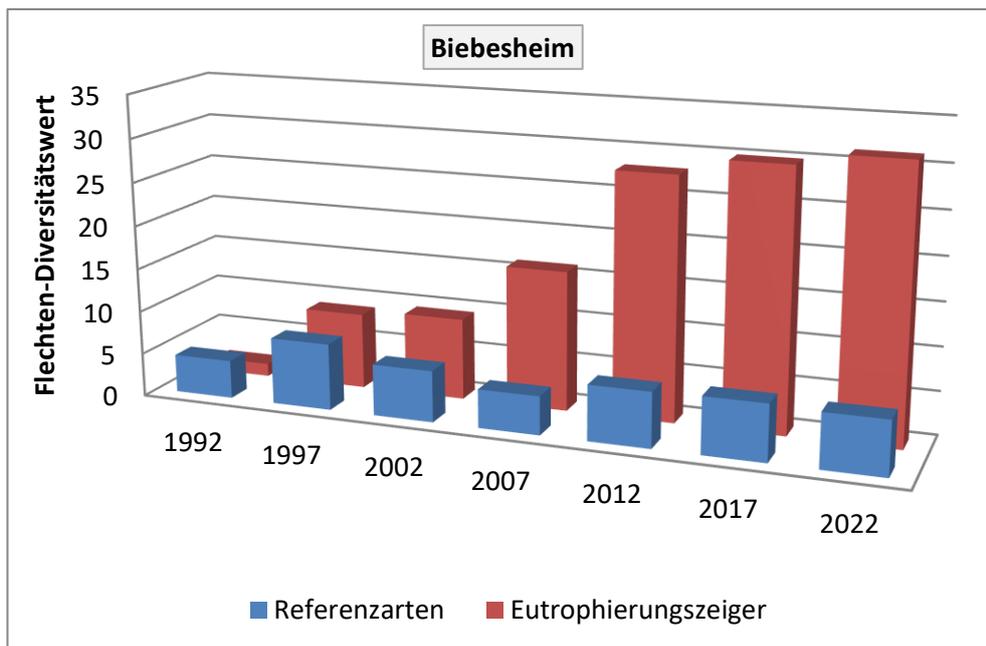


Abb. 43: DBF Biebesheim - Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2022

Nach den Luftgütekarten der DBF (Abb. 44) 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 und erstmals ein Fehlen der ungünstigsten Luftgütestufe (rot) verzeichnet werden, die bis 2017 angehalten hat. In den vergangenen fünf Jahren bis 2022 hat sich die durch die Flechten angezeigte Luftgüte sich auf einigen Flächen, insbesondere im Westen der DBF, wieder verschlechtert (Abb. 45). Hier sind die eutrophierenden Luftschadstoffe zumindest mit verantwortlich, die zu einem Anstieg der Eutrophierungszeiger und zu einem leichten Rückgang der Referenzarten geführt haben.

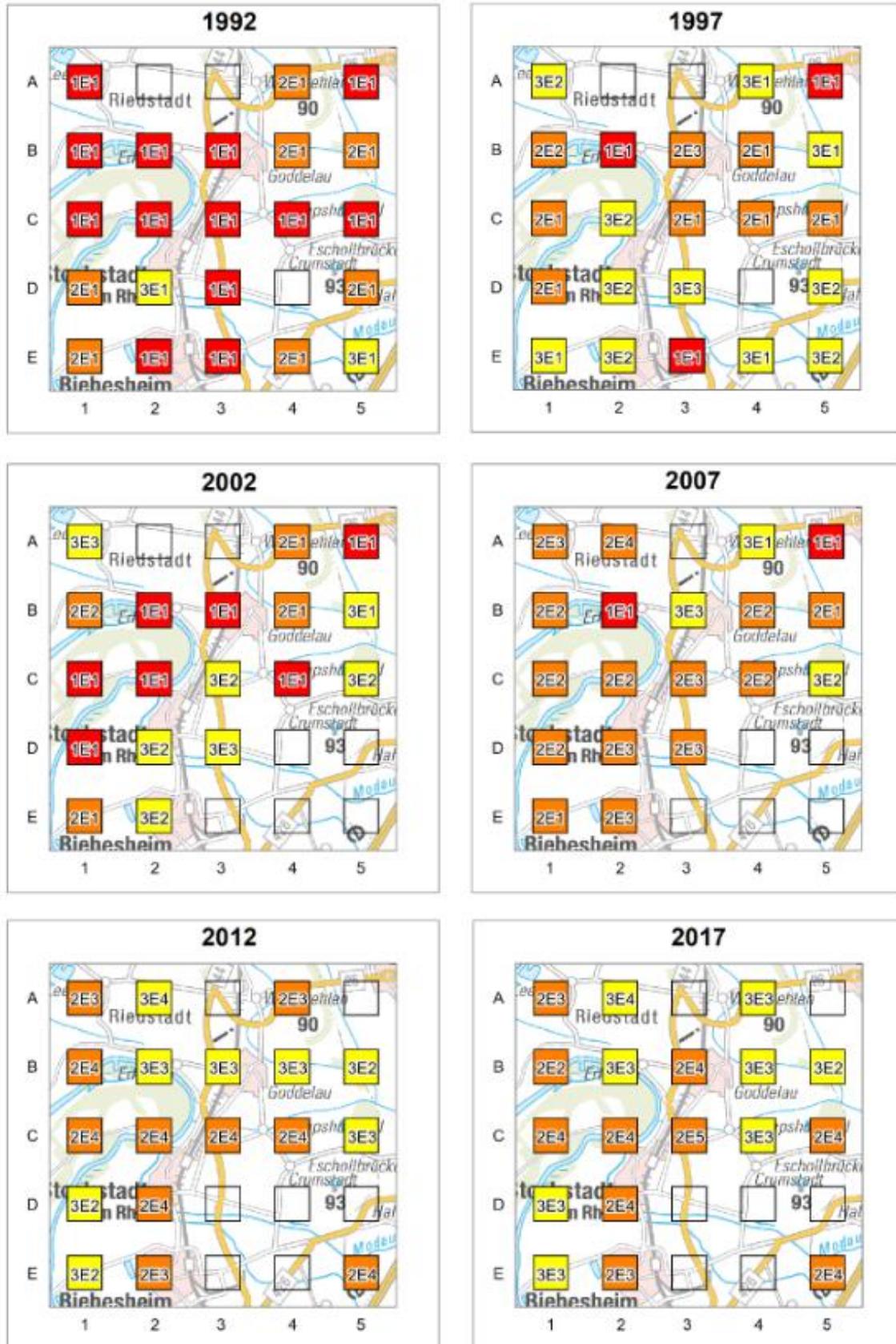


Abb. 44: DBF Biebesheim - Entwicklung der Luftgüte von 1992-2017

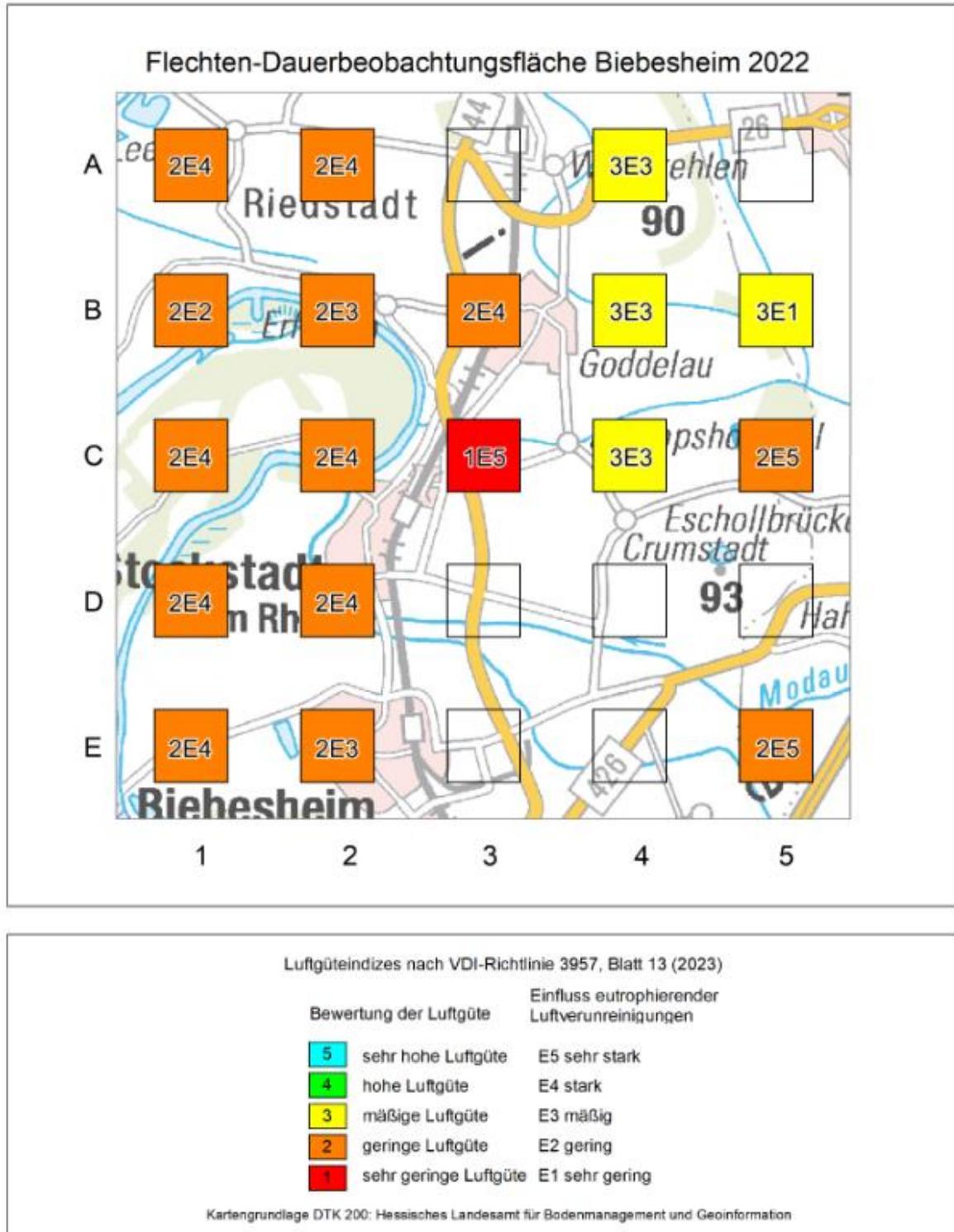


Abb. 45: DBF Biebesheim - Luftgütekarte 2022

Untersuchungsfläche Flughafen

Die Untersuchungsfläche 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 deutlichen Vorsprung zeigen.

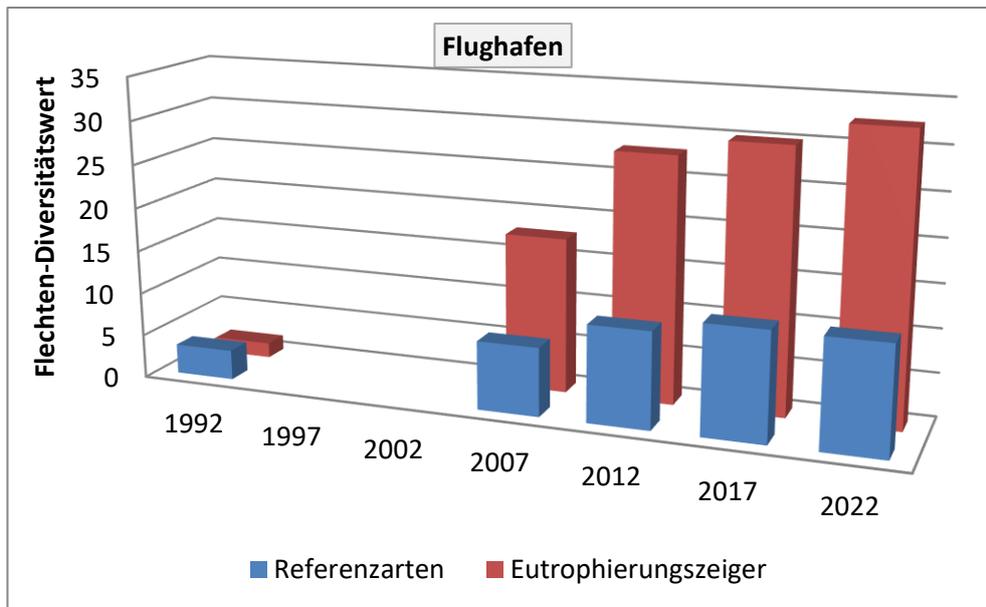


Abb. 46: Untersuchungsfläche Flughafen - Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2022 (1997, 2002: keine Daten)

Die zeitliche Entwicklung der Luftgüte auf den Messflächen im Umfeld des Frankfurter Flughafens zeigt Abb. 47. Die räumlichen Lücken auf der Karte sind damit zu erklären, dass das Betriebsgelände des Frankfurter Flughafens und die Waldgebiete methodisch bedingt nicht kartiert werden können. Es befinden sich dort keine freistehenden Bäume, die die Anforderungen an Trägerbäume erfüllen.

Es lässt sich deutlich erkennen, dass in den 15 Jahren von 1992 bis 2007 eine deutliche Verbesserung der Luftgüte eingetreten ist. In der ersten Untersuchung im Jahr 1992 gehörten 80 % der damals untersuchten 20 Messstellen der schlechtesten Kategorie an (rot, sehr geringe Luftgüte). Dies wird wie in den übrigen Untersuchungsgebieten in Hessen auf die hohe allgemeine Immissionsbelastung, insbesondere durch saure Luftverunreinigungen wie Schwefeldioxid, zurückgeführt. Bis 2007 haben sich die Verhältnisse grundlegend gewandelt. Es ergab sich ein deutlich günstigeres Bild – eine Entwicklung, die sich bis 2017 fortgesetzt hat. In den darauffolgenden fünf Jahren bis 2022 haben die Luftgüteindizes wieder etwas nachgelassen. So werden aktuell die meisten Messflächen mit „mäßige Luftgüte“ (gelb), gefolgt von „geringe Luftgüte (orange) bewertet (vergrößert in Abb. 48 dargestellt).

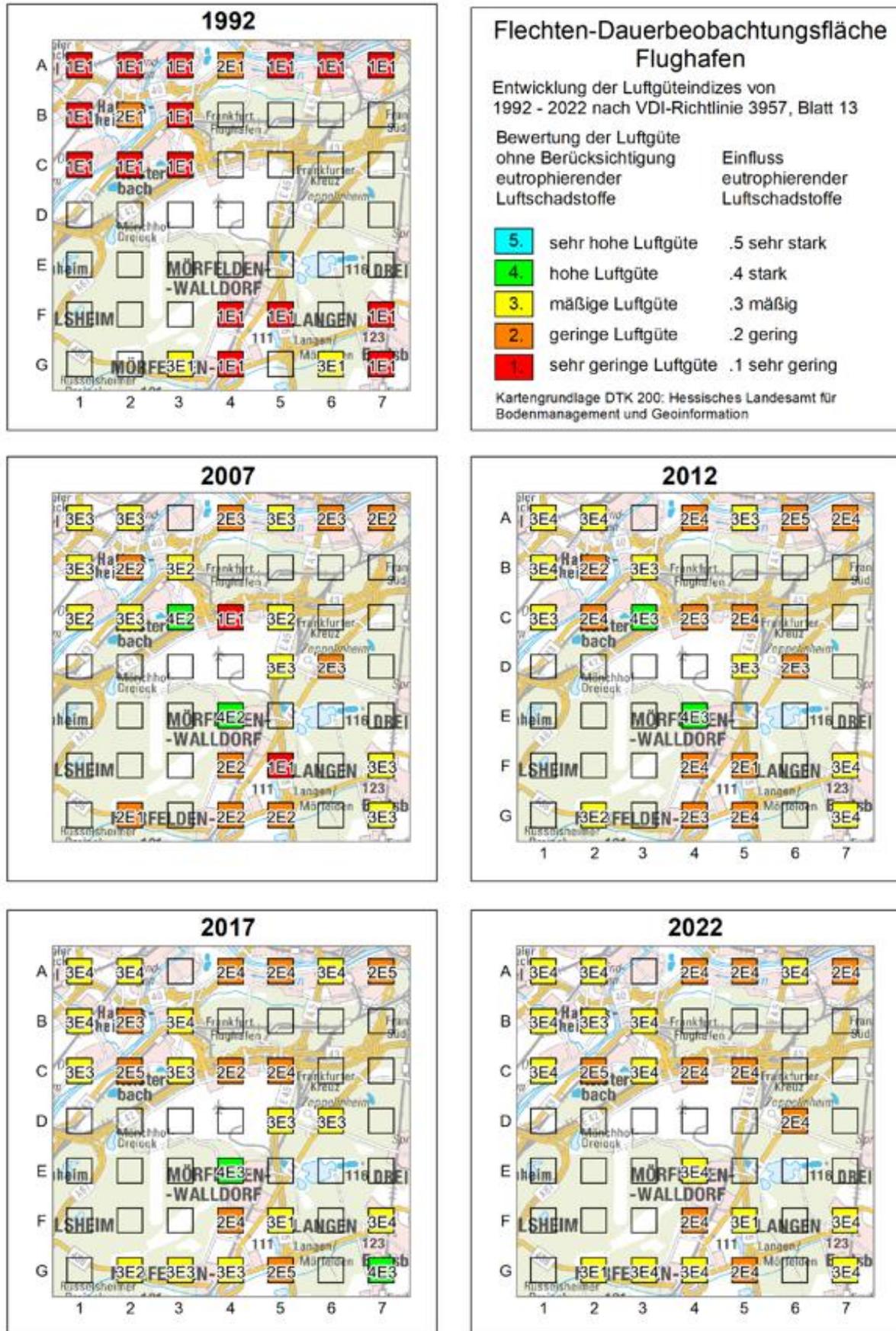


Abb. 47: Untersuchungsfläche Flughafen - Entwicklung der Luftgüte von 1992-2022

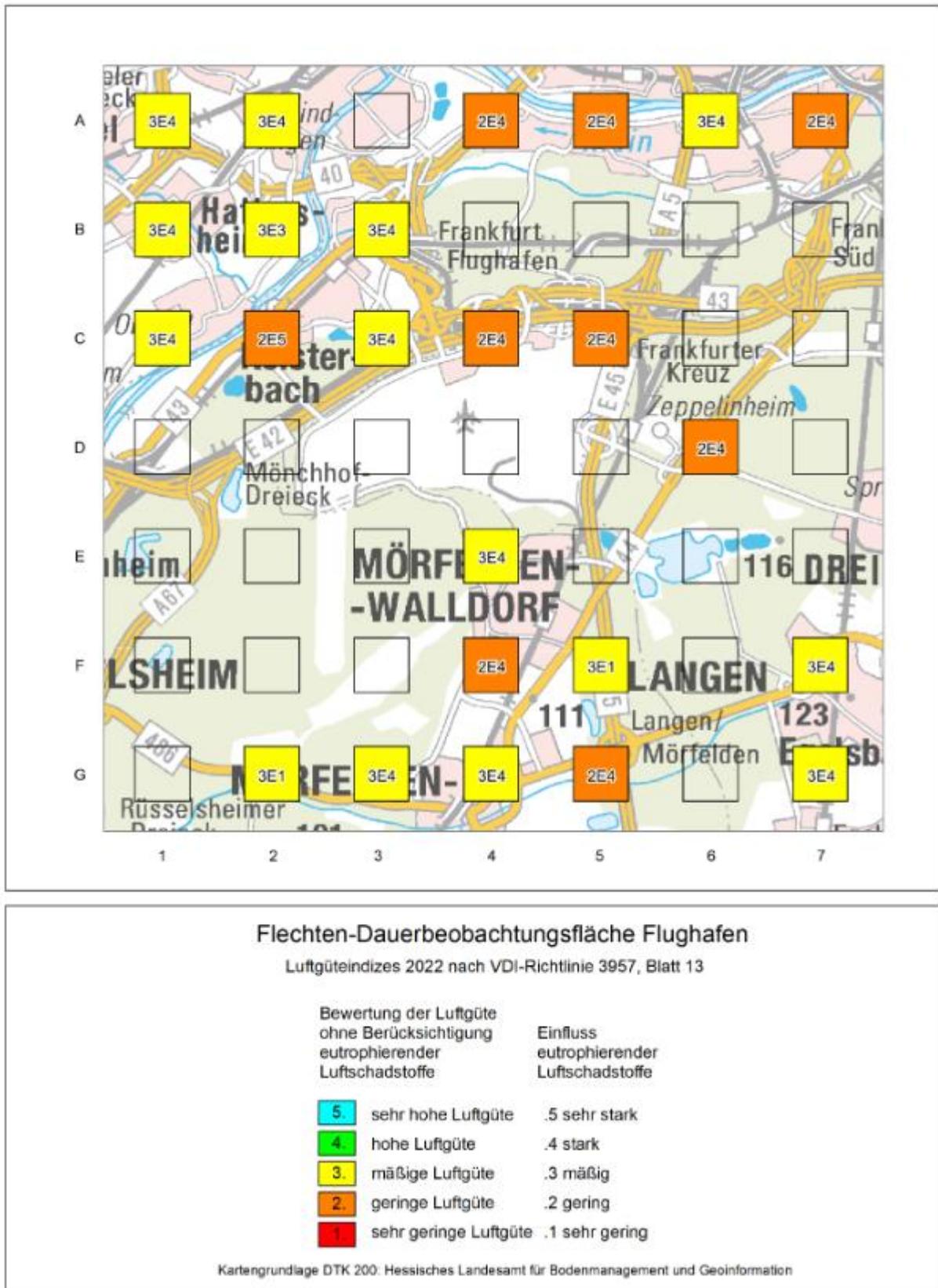


Abb. 48: Untersuchungsfläche Flughafen - Luftgütekarte 2022

In den letzten fünf Jahren angestiegene Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger sind ein Indiz dafür, dass die Wirkungen eutrophierender Luftschadstoffe auf der DBF Flughafen die Luftgütebewertung mindern.

Für keines der Untersuchungsjahre im Zeitraum 1992 bis 202 lässt sich eine räumliche Verteilung der Flechten-Indizes nachweisen, die einen direkten Bezug zum Flughafenbetrieb vermuten lassen. Dies lässt jedoch nicht den Schluss zu, dass keine luftthygienischen 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 sind andere Methoden des Biomonitoring passend. Der Verein Deutscher Ingenieure stellt geeignete Richtlinien zur Verfügung, darunter die zur Weidelgras-Exposition (VDI 3957 Blatt 2 2020), zur Grünkohl-Exposition (VDI 3957 Blatt 3 2024) oder zur Torfmoos-Exposition (VDI 3957 Blatt 17 2008).

Zusammenfassung der luftthygienischen Entwicklung der hessischen DBF von 1992-2022

Die zeitliche Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte gibt einen wichtigen Hinweis zur Veränderung der luftthygienischen Situation. Ein Anstieg der Flechten-Diversitätswerte bei den Referenzarten ist als Verbesserung der Luftgüte zu werten, während ein Anstieg der FDW der eutrophierungstoleranten Flechtenarten zunehmende Auswirkungen luftgetragener Nährstoffverbindungen anzeigt.

Betrachtet man die Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte aller DBF (Abb. 50), so sind die Werte für Referenzarten im letzten Betrachtungszeitraum nur geringfügig angestiegen, während die Diversitätswerte für Arten, die durch einen übermäßigen Nährstoffeintrag gefördert werden, von 2017 bis 2022 deutlich zugenommen haben (Abb. 49). Im landesweiten Mittel erreichen Eutrophierungszeiger seit 1997 höhere Flechten-Diversitätswerte als Referenzarten. In den letzten fünfzehn Jahren hat sich die Dominanz der Eutrophierungszeiger gegenüber der Referenzarten massiv verstärkt. So ist festzuhalten, dass die weiter zunehmenden Wirkungen eutrophierender Immissionen offenbar einer Verbesserung der luftthygienischen Situation entgegenstehen. Der günstige Trend in der Entwicklung des Luftgüteindex seit 1992, der bis 2012 für die meisten Dauerbeobachtungsflächen festgestellt werden konnte, hat sich in den vergangenen zehn Jahren abgeschwächt oder teilweise sogar ins Gegenteil verkehrt.

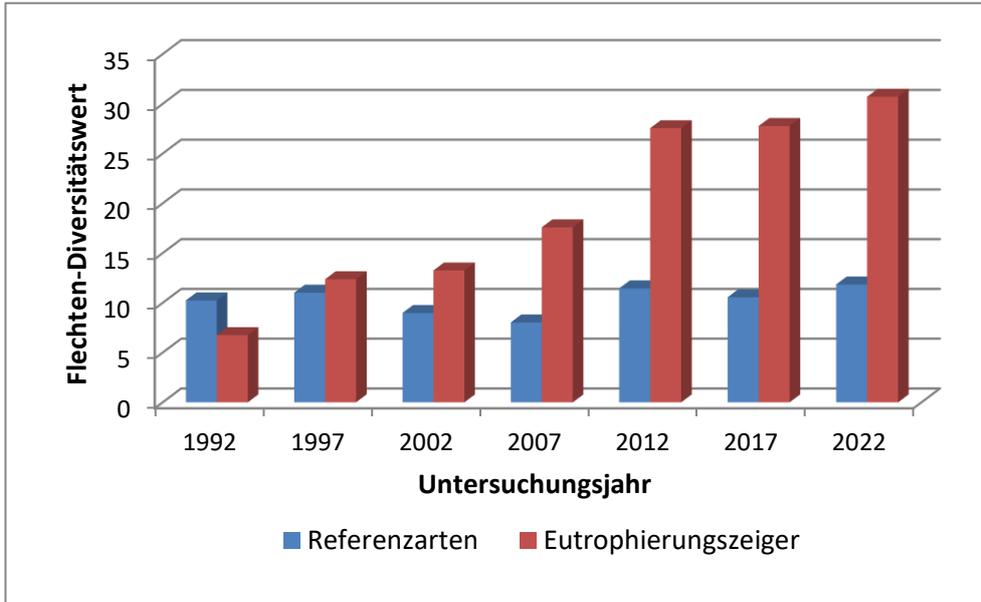


Abb. 49: Zeitlicher Verlauf der Flechten-Diversitätswerte (FDW) der Referenzarten und Eutrophierungszeiger für alle DBF (ohne Rhön und Flughafen, da diese nicht durchgehend untersucht worden waren)

Die durch Flechten angezeigte lufthygienische Situation hat sich in den letzten fünf Jahren auf den meisten untersuchten Dauerbeobachtungsflächen in Hessen (mit Ausnahme der DBF Melsungen) nicht verbessert (Abb. 50).

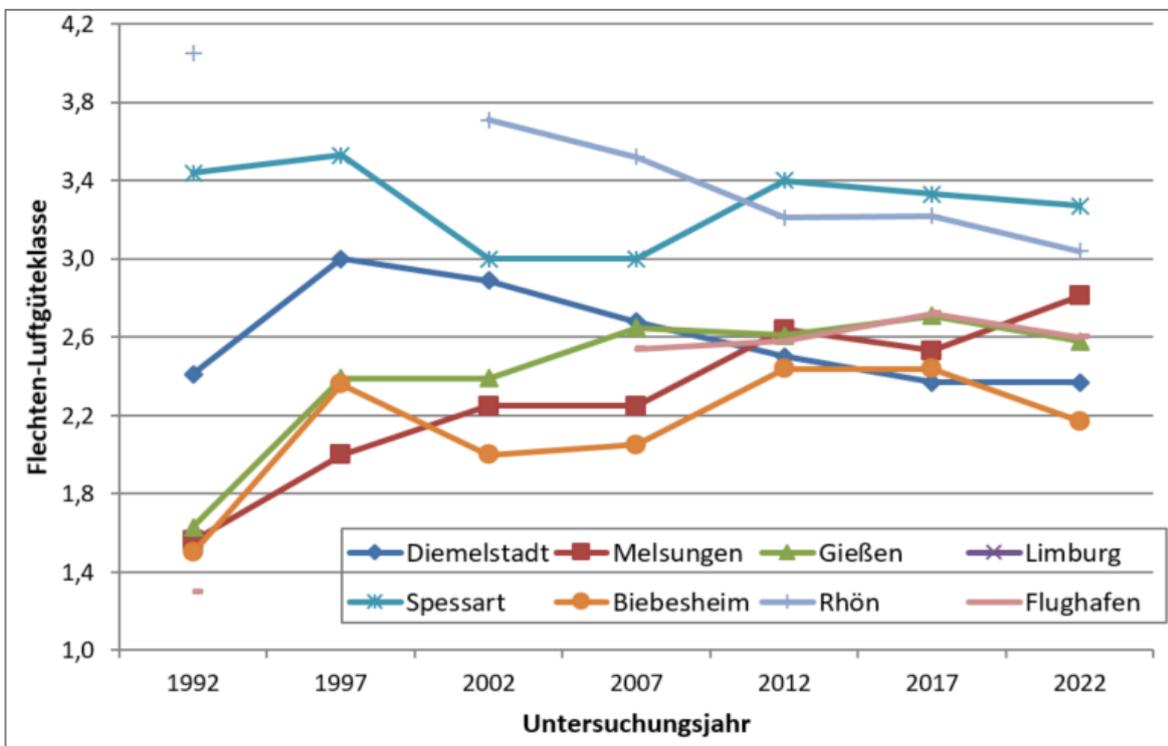


Abb. 50: Entwicklung der Luftgüte, dargestellt anhand der mittleren Flechten-Luftgüteklassen der Dauerbeobachtungsflächen

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 wie etwa der Stickstoffoxide sind in Hessen weiter rückläufig (Abb. 51). Gründe sind vor allem die Minderung der Emissionen im Verkehrssektor aufgrund des zunehmenden Anteils emissionsärmerer Fahrzeuge, sowie Luftreinhaltepläne für Städte (HLUG - Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie 2015; HLNUG - Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie 2022).

Von 2019 bis 2020 lässt sich ein überdurchschnittliches Sinken der NO₂-Konzentration an Verkehrsschwerpunkten beobachten, welches auf die COVID19-Pandemie und die damit einhergehenden Schutzmaßnahmen und ihre massiven Auswirkungen auf Mobilität und Verkehrsaufkommen zurückzuführen ist (Ditas et al. 2021). Diese Werte alleine sind somit kaum geeignet, Eutrophierungswirkungen auf Flechten zu erklären.

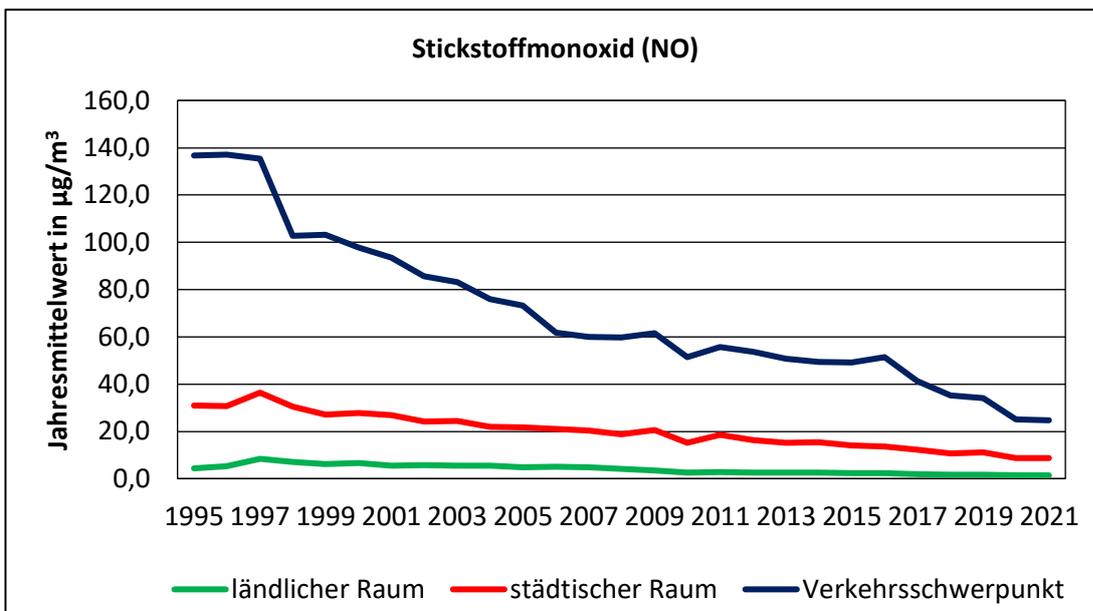
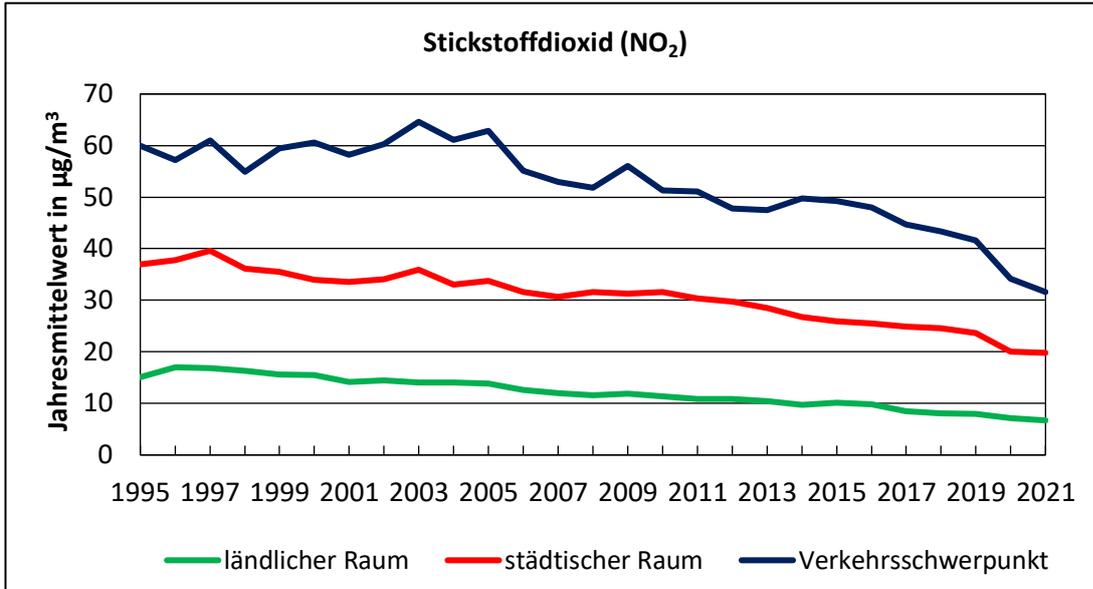


Abb. 51: Zeitlicher Verlauf der Stickstoffdioxid und der Stickstoffmonoxid-Konzentrationen an Luftmessstationen in verschiedenen hessischen Regionen (Datenquelle: : (HLUG - Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie 2015; HLNUG - Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie 2022))

So haben augenscheinlich andere Schadstoffgruppen mit eutrophierender Wirkung einen negativen Einfluss auf den durch Flechten ermittelten Luftgüteindex, was im Folgenden näher betrachtet werden soll.

Exkurs: Wirkungen eutrophierender Luftverunreinigungen

Zunächst einmal wird auf eutrophierende Wirkungen auf die Umwelt im Allgemeinen eingegangen (Abb. 52). Der Fokus liegt hier auf dem Stickstoff als Hauptnährstoff. Ein Übermaß an pflanzenverfügbaren Stickstoffverbindungen ist aus folgenden Gründen kritisch zu bewerten: Durch Eutrophierung geförderte nitrophytische Arten dringen in ursprünglich nährstoffarme Ökosysteme ein und verdrängen dort solche Pflanzen, die nährstoffarme Standorte mit geringer Konkurrenz bevorzugen; eine Verringerung der Biodiversität ist die Folge (Bundesamt für Umwelt 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 Absenkung des pH-Wertes im Boden erhöht die Bioverfügbarkeit von Nährstoffen und von toxischen Metallkomplexen (Ionenaustausch), was wiederum die Eutrophierung ansteigen lässt und gleichzeitig – bei hohen Konzentrationen – zu toxischen Erscheinungen führen kann (LfU - Bayerisches Landesamt für Umwelt 2004). Im humiden mitteleuropäischen Klima wird ein Teil der infolge der Versauerung mobilisierten Ionen ausgewaschen und dem Grundwasser zugeführt – und steht somit für das Pflanzenwachstum nicht zur Verfügung. Andererseits führt eine erhöhte Stickstoffzufuhr bei Pflanzen zu übermäßigem Wachstum und – damit einhergehend – zu verminderter Trocken- und Frostresistenz sowie zu geringeren Abwehrkräften gegenüber Schaderregern.

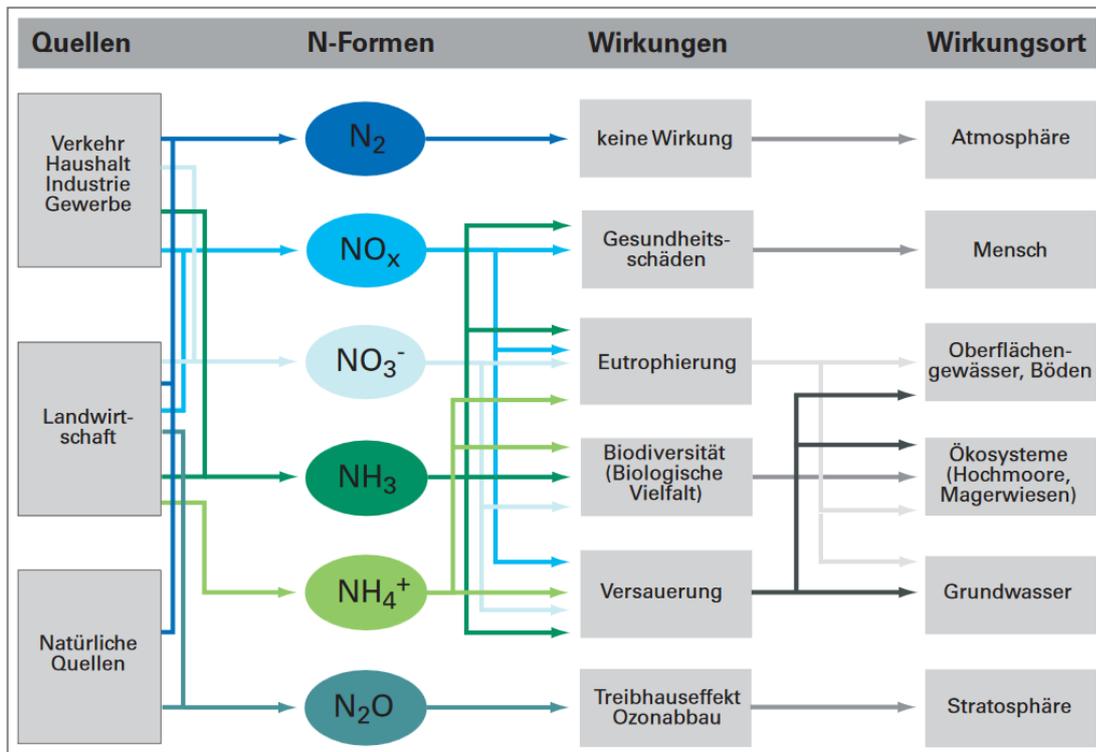


Abb. 52: Stickstoffverbindungen, Vorkommen und Wirkungen (LUBW-Landesanstalt für Umwelt)

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 insbesondere die reaktiven Stickstoffverbindungen wirksam. Nährstoffe können in der Atmosphäre gasförmig, gelöst oder an Partikel gebunden sein. Die Stickstoffoxide NO und NO₂ sind von Flechten nicht unmittelbar nutzbar, können jedoch durch Umwandlungsprozesse in der Atmosphäre zu pflanzenverfügbarem Nitrat (NO₃⁻) oxidiert werden. Flechten nutzen als Stickstoffquellen vor allem Nitrat (NO₃⁻) und Ammoniak/Ammonium (NH₃/NH₄) (van Dobben 1996; van Dobben und Bakker 1996; van Herk 1999; Franzen-Reuter 2004; Hauck 2010).

Eine bedeutende Rolle für den atmosphärischen Eintrag von Nährstoffen in Ökosysteme 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 - Bayerisches Landesamt für Umwelt 2004).

In Mitteleuropa ist die Landwirtschaft der Hauptquelle bei der Emission von Ammoniak (UBA - Umweltbundesamt 2013). Das reaktive Gas wird aus der Tierhaltung und bei der Ausbringung von Gülle freigesetzt und 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 - Bayerisches Landesamt für Umwelt 2004).

Einen geringeren Beitrag an den Emissionen von Ammoniak leistet der Kraftfahrzeugverkehr. Hier sind es die Abgase belegter, kalter oder gealterter Katalysatoren, die Ammoniak freisetzen (Frahm 2006; LUBW-Landesanstalt für Umwelt; Bartholmeß et al. 2011). Nach Angaben des österreichischen Umweltbundesamtes emittieren die benzinbetriebenen Kraftfahrzeuge je nach Katalysortyp und Verkehrsfluss zwischen 20 und 50 mg Ammoniak je Kilometer (UBA - Umweltbundesamt 2004).

Ammoniak hat eine nur kurze Verweilzeit in der Atmosphäre. Eine eutrophierende Wirkung auf Pflanzen bzw. Flechten tritt daher nur in der unmittelbaren Umgebung der Emissionsquelle auf. Hier kann Ammoniak gasförmig, in Wasser gelöst oder durch trockene Deposition in Kontakt mit den Flechten kommen.

Dämmgen et al. beschreiben den komplexen Weg des Ammoniaks nach dessen Emission (UBA - Umweltbundesamt 2013): Als sehr reaktives und basisch wirkendes Gas bildet es in der Atmosphäre mit den atmosphärischen Säuren Salpetersäure (HNO₃) und Schwefelsäure (H₂SO₄) Salze, die auf existierenden Keimen aufwachsen. Diese NH₄-haltigen Partikel haben typische Durchmesser unter 1 µm. Sie verbleiben als schwebende Teilchen in der Luft und können über weite Entfernungen transportiert werden. In einer Grafik wird dies verdeutlicht (Abb. 53). Nach dem Ammoniak-Abbau sind es die Folgeprodukte wie Ammonium (NH₄⁺), die auch an weit entfernten Orten deponiert werden und dort als Nährstoffe wirken können.

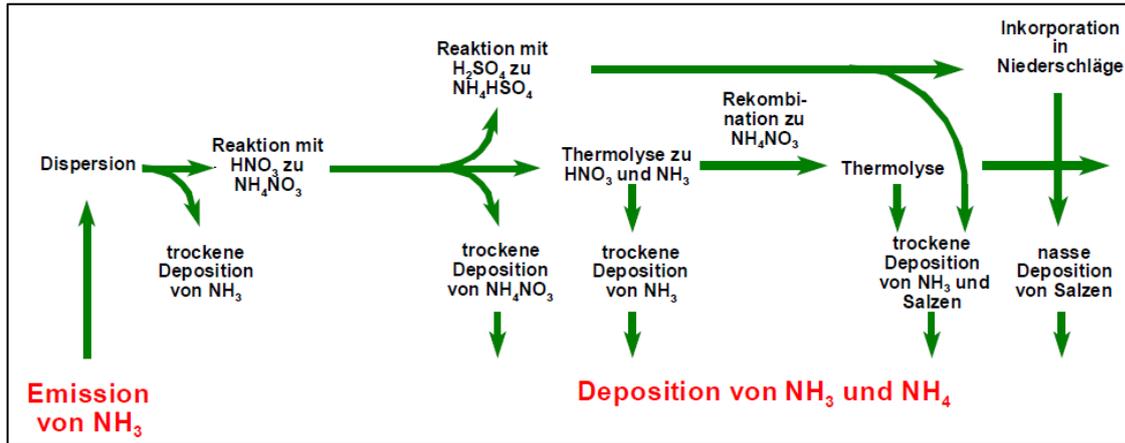


Abb. 53: Emission, Dispersion, vertikaler und horizontaler Transport, chemische Reaktion und Deposition von Ammoniak und Ammonium (Dämmgen und Erisman 2002)

Um die Belastung mit Feinstaub zu reduzieren, ist die großräumige Minderung der Ammoniakemissionen besonders effektiv. In Mitteleuropa besteht ein beträchtlicher Anteil des Feinstaubs aus NH_4 -Salzen.

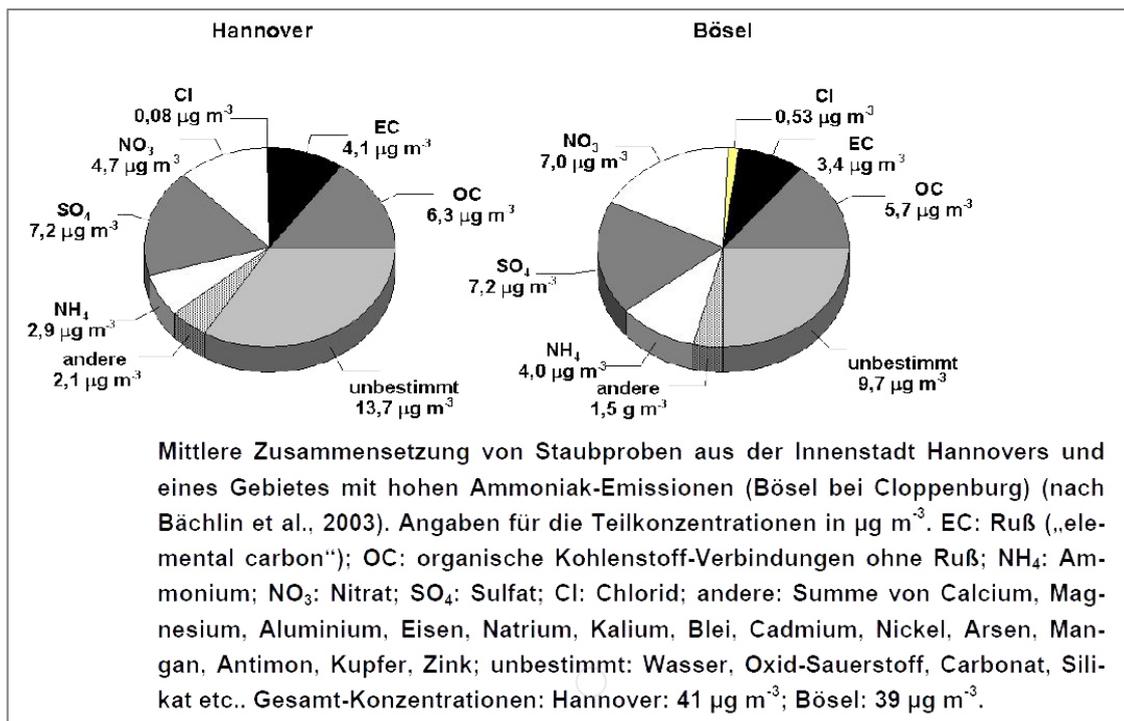


Abb. 54: Ergebnisse aus Staubanalysen (UBA 2013)

Die Entwicklung der Ammoniakemissionen stellt sich nach Berechnungen des Thünen-Instituts seit 1990 als bundesweit rückläufig dar. Bundesweit liegen die NH_3 -Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft inklusive der Ausbringung von Gärresten im Jahr 2019 bei 557.800 Tonnen und damit um 18,2 % niedriger als 1990 und um 0,009 % niedriger als im Jahr 2005 (Rösemann et al. 2021).

Die gemessenen atmosphärischen Ammoniakkonzentrationen sind dabei lokal durchaus unterschiedlich. An verschiedenen hessischen Messstationen steigen die Werte zwischen 2006 und 2009 sogar noch an (Abb. 55) (Dämmgen et al. 2013). Dazu gehören Limburg nahe der Flechten-Dauerbeobachtungsfläche Limburg und Bad Arolsen, das unmittelbar südlich der DBF Diemelstadt liegt. Das Gebiet Spessart hingegen zeigt nur geringe Schwankungen der Ammoniakkonzentration auf einem niedrigeren Niveau.

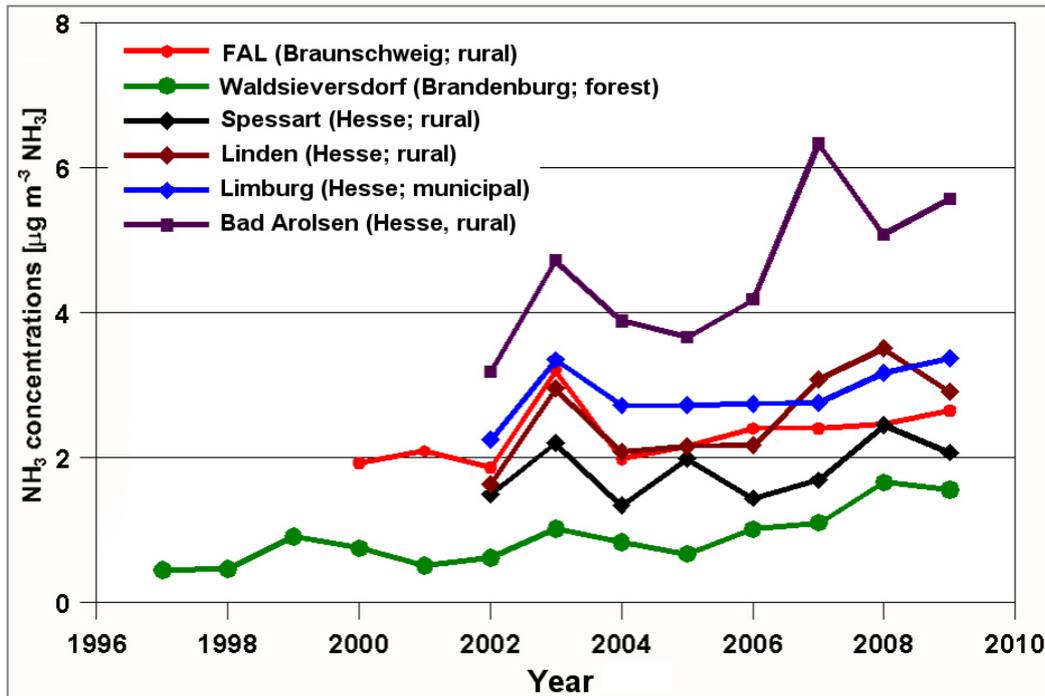


Abb. 55: Entwicklung der Ammoniakkonzentrationen in verschiedenen Gebieten Deutschlands (Dämmgen et al. 2013)

Um weitere Anhaltspunkte für räumliche Unterschiede des Nährstoffeintrags in Hessen zu erhalten, wurden aus Modellen entwickelte Daten des Umweltbundesamtes zur Gesamtdeposition reaktiven Stickstoffs herangezogen (UBA - Umweltbundesamt 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 werden können. Gewählt wurde die Landnutzungsklasse „Wiesen und Weiden“, da sie dem Offenland nahekommt, in dem die Flechtenträgerbäume überwiegend kartiert worden waren. Die N-Depositionswerte für die Flechten-Dauerbeobachtungsflächen liegen demnach zwischen $8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (DBF Limburg) und $12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (DBF Diemelstadt) (UBA - Umweltbundesamt 2018).

Auf der DBF Spessart wird, angezeigt durch vergleichsweise geringe Flechten-Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger, eine für Hessen niedrigere Immissionsbelastung mit

eutrophierenden Verbindungen belegt (Abb. 56). Auch die Stickstoffdeposition ist an der waldreichen DBF Spessart im Südosten von Hessen mit $9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ relativ gering. Die in der Grafik folgenden Dauerbeobachtungsflächen Melsungen bis Flughafen zeigen FDW der Eutrophierungszeiger auf gleichem hohem Niveau bei N-Depositionen zwischen 8 und $11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Landesweit die höchsten Eutrophierungswirkungen belegen die Ergebnisse der DBF Diemelstadt. Hier zeigen sich die höchsten FDW der Eutrophierungszeiger bei gleichzeitig hoher Stickstoffdeposition ($12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Mit verursacht wird dies durch die Lage der DBF Diemelstadt im Nordwesten Hessens mit räumlicher Nähe zu den Intensivlandwirtschaftsgebieten Nordrhein-Westfalens und West-Niedersachsens.

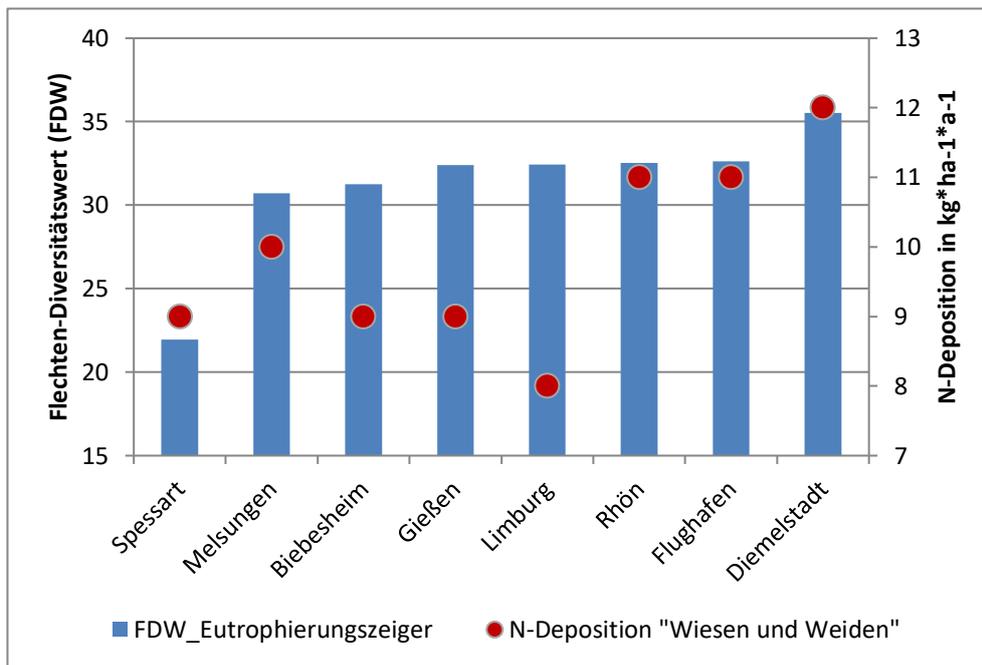


Abb. 56: Flechten-Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger im Jahr 2022 und Stickstoffdeposition für die Landnutzungsklasse „Wiesen und Weiden“ aus Dreijahresmittelwerten der Jahre 2013-2015 (UBA - Umweltbundesamt 2018)

Eine Korrelationsanalyse der Stickstoff-Depositionsdaten mit der Flechtendiversität der Eutrophierungszeiger ließ jedoch nur einen mäßigen Zusammenhang erkennen ($r = +0,45$). Die Spanne der Eutrophierung ist vermutlich zu gering, um eine deutlichere Differenzierung zu erreichen. 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 - Umweltbundesamt 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 (UBA - 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

Seit 1997 wurde auf jeder Messfläche an einem ausgewählten Baum eine Folienaufnahme erstellt. In jedem Untersuchungsjahr wurde die Aufnahme nach Möglichkeit am selben Baum wiederholt. Wenn ein Baum nicht mehr geeignet war (Nutzungsänderung, Alterserscheinungen) oder dieser mittlerweile gefällt war, wurde an einem Ersatzbaum eine neue Zeitreihe begonnen.

Es sollen die Ergebnisse einer Auswahl von Bäumen (Tab. 9) beispielhaft dargestellt werden, an denen seit Beginn der Untersuchungen eine Folie gezeichnet werden konnte. Dies waren auf jeder DBF drei Bäume mit Ausnahme der DBF Diemelstadt, an der nur zwei Bäume durchgängig bearbeitet werden konnten. Dargestellt wird die Entwicklung vier häufiger Blattflechtenarten, die sich aufgrund ihrer ökologischen Ansprüche deutlich unterscheiden.

Auf den untersuchten Folien erreichte die Artengruppe *Physcia adscendens/tenella* in 2022 auf allen Dauerbeobachtungsflächen die höchsten mittleren Deckungsprozente. Beide Arten sind aufgrund der Ähnlichkeit ihrer Initialstadien und ihres rasigen Wachstums bei der Folienaufnahme nicht zu trennen. Für die folgende Betrachtung wurden ökologisch aussagekräftige – ebenfalls häufige – Arten ausgewählt.

Tab. 9: Auswahl von Trägerbäumen zur Darstellung der Ergebnisse des Folienverfahrens

Nr.		Diemelstadt	Melsungen	Rhön	Gießen	Limburg	Spessart	Biebesheim
1	Baumnr. 2022	(keine)	25-1341	05-1155	04-1040	15-816	13-871	06-620
	Baumart		Spitzahorn	Esche	Apfelbaum	Birnbaum	Apfelbaum	Apfelbaum
	Umfang in cm		139	258	190	99	130	107
2	Baumnr. 2022	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	211	173	205	230	260	188	330
3	Baumnr. 2022	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	130	141	206	340	300	105	388

Die Schwärzliche Schwielenflechte (*Phaeophyscia orbicularis*) ist ein typischer Eutrophierungszeiger (vgl. Abb. 21.). Die schmalblättrige Art bevorzugt nährstoffreiche, staubimprägnierte Rinde von Laubbäumen (Wirth und Kirschbaum 2024). Zu Beginn der Untersuchungsreihe wurde sie bei den Folienaufnahmen nur auf wenigen Dauerbeobachtungsflächen in Südhessen (Biebesheim, Spessart, Limburg) in geringer Deckung erfasst. Die Art hat seitdem ihren Flächenanteil auf allen DBF erhöht (Abb. 57). An den ausgewählten drei Bäumen der DBF Gießen nimmt sie aufgrund offensichtlich sehr guter Wuchsbedingungen seit mittlerweile 20 Jahren deutlich zu und erreicht aktuell eine mittlere Deckung von etwas über 60 %. Das Ergebnis bestätigt, wie auch in der Flechtenkartierung bereits ausgeführt, dass an den Bäumen landesweit eine erhöhte Nährstoffverfügbarkeit die eutrophierungstolerante Art gefördert hat.

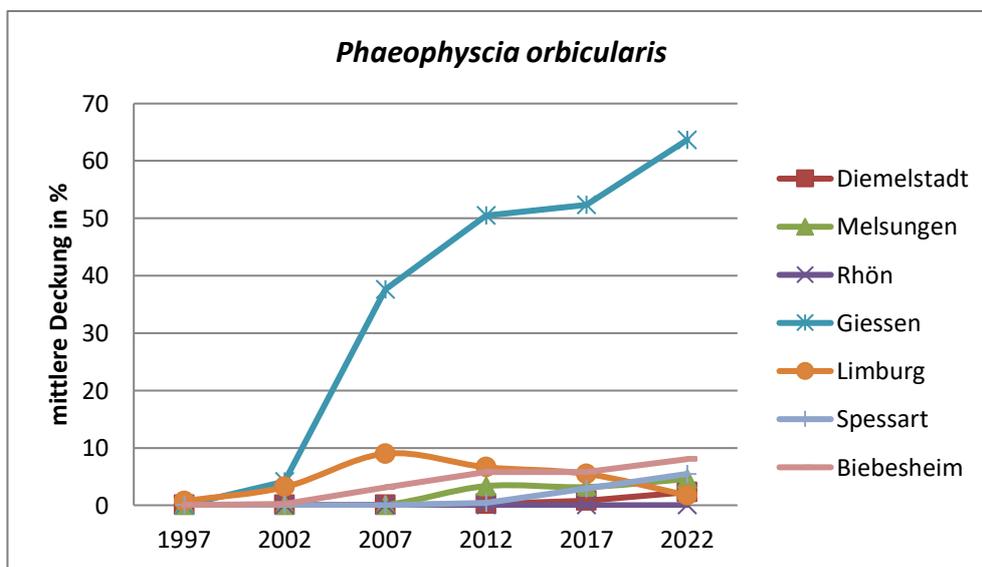


Abb. 57: Entwicklung des Deckungsgrades von *Phaeophyscia orbicularis* aus Folienaufnahmen ausgewählter Bäume

Auch die Wand-Gelbflechte (*Xanthoria parietina*) gehört zu den Eutrophierungszeigern (vgl. Abb. 21). Zu Beginn der Untersuchung in 1997 wurde sie ausschließlich an den Biebesheimer Bäumen in geringer Flächendeckung auf der Folie erfasst (Abb. 58). 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. Zwischen 2012 und 2017 ist die Flächendeckung an den betrachteten Biebesheimer Bäumen deutlich zurückgegangen, um in den letzten fünf Jahren wieder anzusteigen. Für den vorübergehenden Rückgang sind Gründe wie Beschattung, Parasiten oder Immissionen denkbar, die den Bestand der Art jedoch nur vorübergehend beeinträchtigt haben. Einheitlicher zeigt sich die Entwicklung auf den meisten anderen Dauerbeobachtungsflächen, wo ein steter Anstieg der Flächendeckung von *Xanthoria parietina* zu beobachten ist. Lediglich an den hier für die Betrachtung ausgewählten Folien der DBF Limburg wurde sie 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 und ihr Vorkommen im Kronenbereich von Sträuchern und Bäumen sehr auffällig („Vergilbung“, siehe auch Titelbild des Berichtes).

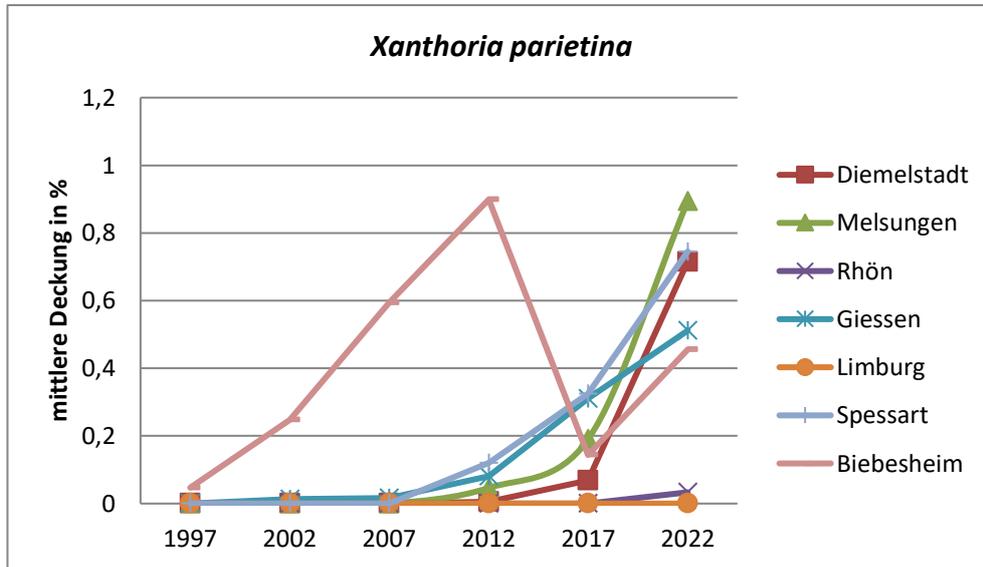


Abb. 58: Entwicklung des Deckungsgrades von *Xanthoria parietina* aus Folienaufnahmen ausgewählter Bäume

Mit *Hypogymnia physodes* (vgl. Abb. 20) liegt eine Art mit deutlich anderen ökologischen Ansprüchen vor. Als Acidophyt bevorzugt sie saure Rinde (Wirth und Kirschbaum 2024). 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 und Windisch 1995). Die Abb. 59 legt nahe, dass im Spessart und in der Rhön eine Neutralisation der einst versauerten Borken vergleichsweise spät eingesetzt hat. Höhere Niederschläge und ein geringeres Aufkommen alkalischer Stäube können die Ursache sein. Auf den übrigen Dauerbeobachtungsflächen hat die Art im Untersuchungszeitraum an den Foliensäulen eine untergeordnete Rolle gespielt.

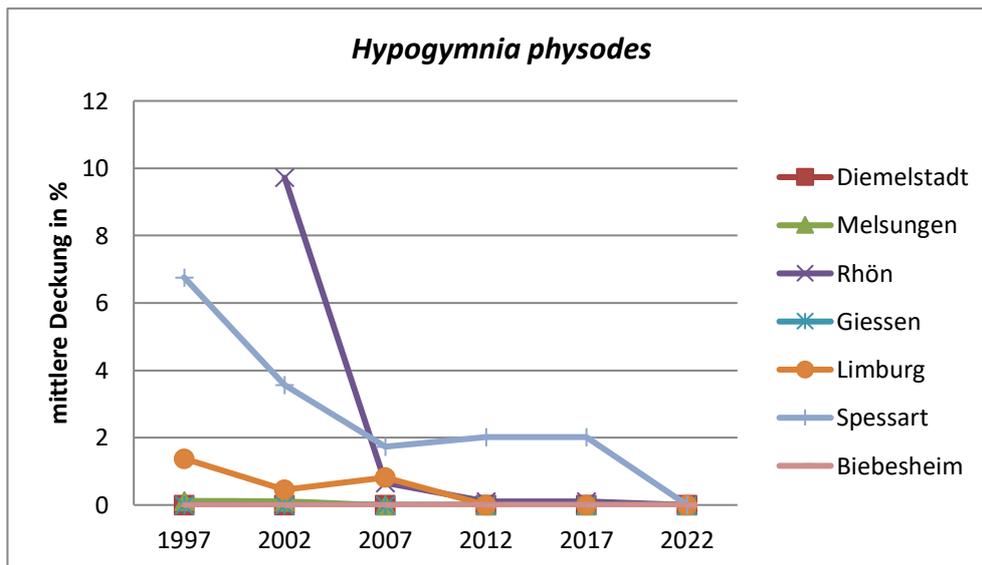


Abb. 59: Entwicklung des Deckungsgrades von *Hypogymnia physodes* aus Folienaufnahmen ausgewählter Bäume

Die Blattflechte *Parmelia sulcata* (vgl. Abb. 22) gehört aufgrund ihrer breiten ökologischen Amplitude zu den häufigsten Blattflechten Mitteleuropas. Sie bevorzugt eher nährstoffreiche Rinde (Wirth und Kirschbaum 2024).

Die Ergebnisse der Folienaufnahme zeigen ein wenig einheitliches Bild (Abb. 60). Auf der Dauerbeobachtungsfläche Spessart ist die prozentuale Deckung von *Parmelia sulcata* recht stabil im zweistelligen Bereich. Auf der DBF Limburg wurden bis 2012 hohe Werte erreicht, seit 2017 ist die Deckung der Art jedoch nur noch sehr gering und auf dem Niveau der übrigen Dauerbeobachtungsflächen. Positiv hervorzuheben ist die Flächendeckung der Flechtenart auf der DBF Melsungen, die im langjährigen Verlauf kontinuierlich ansteigt.

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.

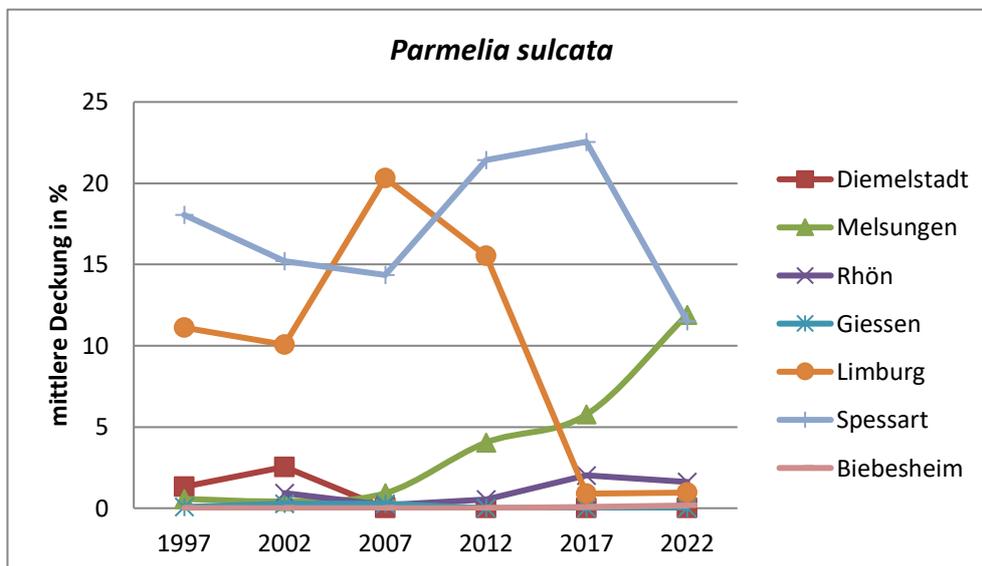


Abb. 60: Entwicklung des Deckungsgrades von *Parmelia sulcata* aus Folienaufnahmen ausgewählter Bäume

Das Folienvorverfahren 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 Foliemethode zukünftig auch für neue Aufgabenstellungen – wie das Klimawandel-Biomonitoring – zum Einsatz kommen kann. Bislang liegt eine Zeitreihe von 25 Jahren vor, in der eine Reihe von identischen Bäumen lückenlos untersucht wurde.

5.4 Luftgüteuntersuchungen in den Städten Wetzlar und Gießen

In Wetzlar und Gießen werden Immissionswirkungen durch die Flechtenkartierung und die Entwicklung von Borken-pH-Werten dargestellt. Es wird zunächst ein Überblick über die Entwicklung der Immissionsbelastung im Untersuchungsgebiet gegeben.

5.4.1 Entwicklung der Immissionsbelastung

Zu Beginn der Flechten-Dauerbeobachtung in Wetzlar und Gießen im Jahr 1985 lagen die Schwefeldioxid-Konzentrationen noch auf einem hohen Niveau (Abb. 61). Wenige Jahre später fielen sie aufgrund verstärkter technischer Maßnahmen zur Emissionsminderung zunächst drastisch ab und haben sich seit etwa 2000 auf einem sehr niedrigen Wert eingependelt. Der Jahresmittelwert der SO₂-Konzentration beträgt im Jahr 2021 in Wetzlar noch 0,9 µg/m³ (HLNUG - Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie 2022).

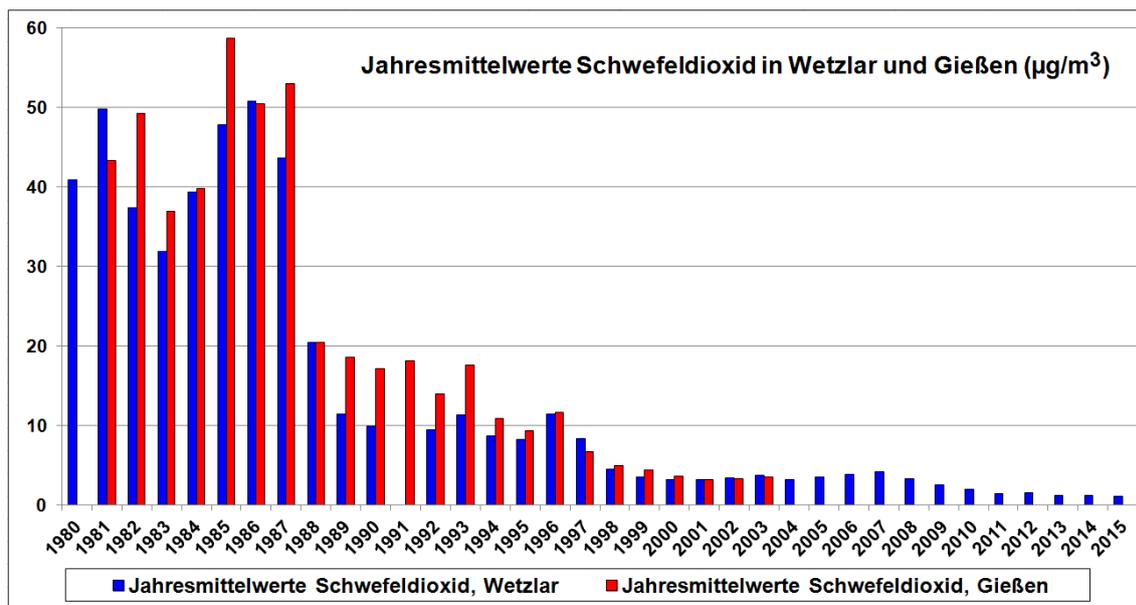


Abb. 61: Entwicklung der Schwefeldioxidgehalte in Wetzlar/Gießen (Jahresmittelwerte aus lufthygienischen Jahresberichten des HLNUG)

Emittiertes Schwefeldioxid reagiert in der Atmosphäre mit Wasser zu Schwefelsäure. Diese trug zu Zeiten hoher SO₂-Konzentrationen wesentlich zum sogenannten „sauren Regen“ bei. Neben der flechtenschädigenden wurden Baumborken angesäuert.

Zur Gesamtstaubdeposition gibt es aus Wetzlar eine längere Datenreihe als aus Gießen (in Gießen Daten seit 1987) (Abb. 62). Wetzlar als ehemalige Industriestadt mit einem im Norden der Stadt gelegenen Zementwerk war in den 1970er Jahren von hohen Staubdepositionen geprägt. Durch den Einbau von Filteranlagen haben sich die Verhältnisse ab Mitte der 1990er Jahre angenähert. Die Zementproduktion wurde schließlich im Jahr 2010 eingestellt.

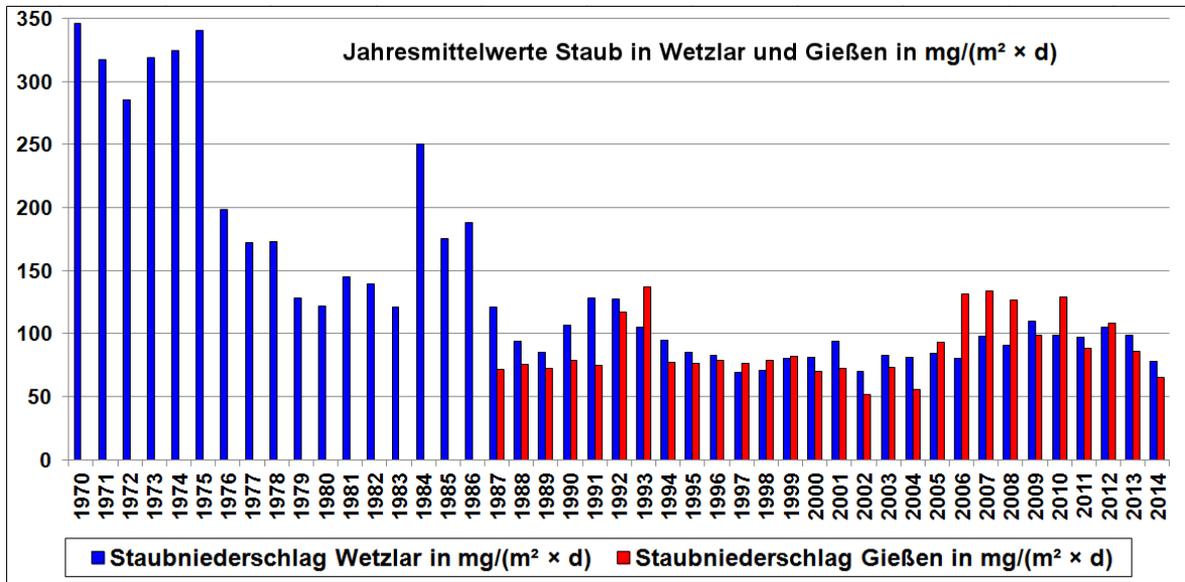


Abb. 62: Entwicklung der Staubdeposition in Wetzlar und Gießen seit 1970 (Jahresmittelwerte aus lufthygienischen Jahresberichten des HLNUG)

Der Vergleich des Staubniederschlags von drei Messstationen des HLNUG zeigt, dass die mittlere Staubdeposition in Wetzlar und Gießen bis 2016 zurückgegangen ist (Abb. 63). An den beiden industrienahen Stationen in Wetzlar übersteigt sie bis heute die Deposition an der Gießener Messstation Westanlage.

Auch für Feinstaub (PM10) sind die Jahresmittelwerte in den letzten 20 Jahren merklich gesunken und befinden sich seit etwa 2020 an den Wetzlarer und Gießener Messstationen auf nahezu gleichem Niveau (Abb. 64).

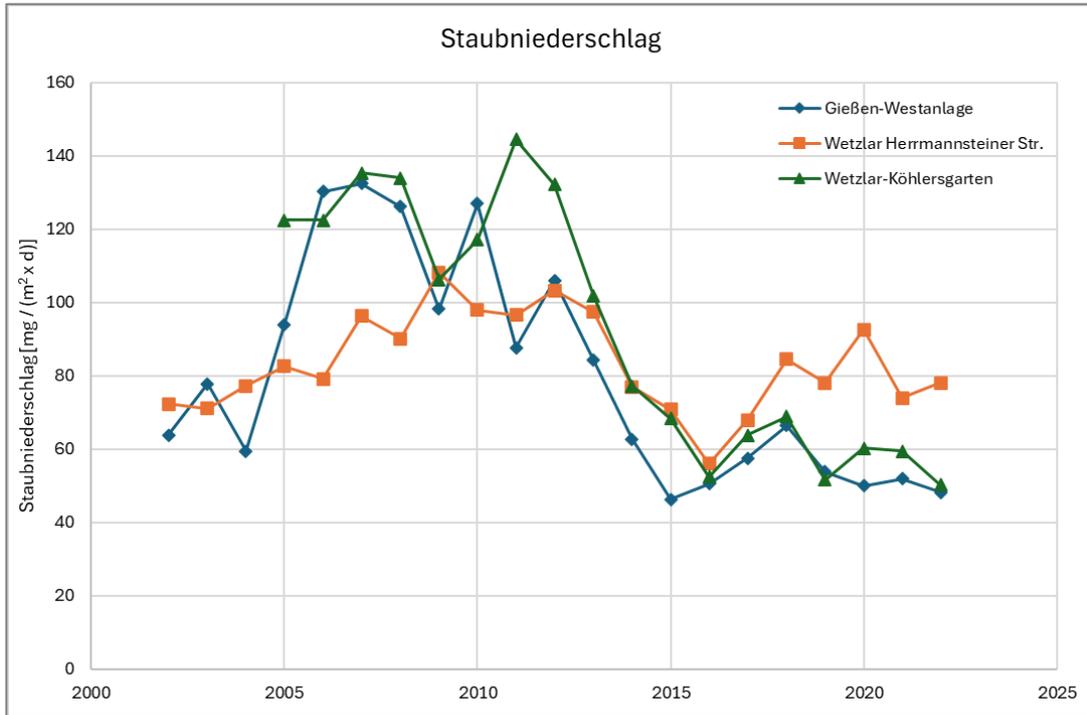


Abb. 63: Jahresmittelwerte der Staubdeposition in Wetzlar und Gießen von 2000 - 2022. Datenquelle: (HLNUG - Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie 2023)

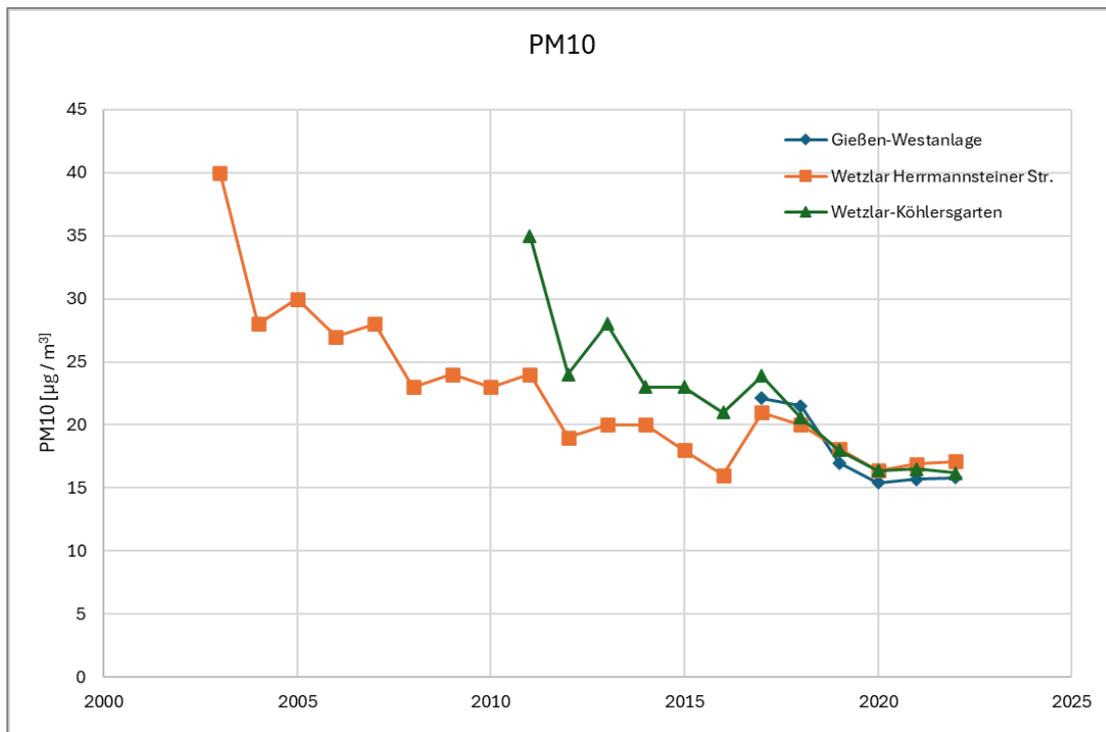


Abb. 64: Jahresmittelwerte der Feinstaubkonzentration (PM_{10}) in Wetzlar und Gießen. Datenquelle: (HLNUG - Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie 2023)

5.4.2 Aktuelle Flechten-Luftgütekarte von Wetzlar und Gießen

Die Bewertung der Luftgüte von Wetzlar und Gießen erfolgt analog zu der in den ländlichen Gebieten: Die Benennung des Luftgüteindex basiert auf Flechten-Diversitätswerten (FDW), wie im Methodenkapitel (Kap. 4.6.1) beschrieben. Die Messflächen sind entsprechend ihrer Luftgütestufe farblich in der Luftgütekarte eingezeichnet (Abb. 65).

Sowohl in Wetzlar als auch in Gießen werden Zonen deutlich unterschiedlicher Luftgüte erreicht.

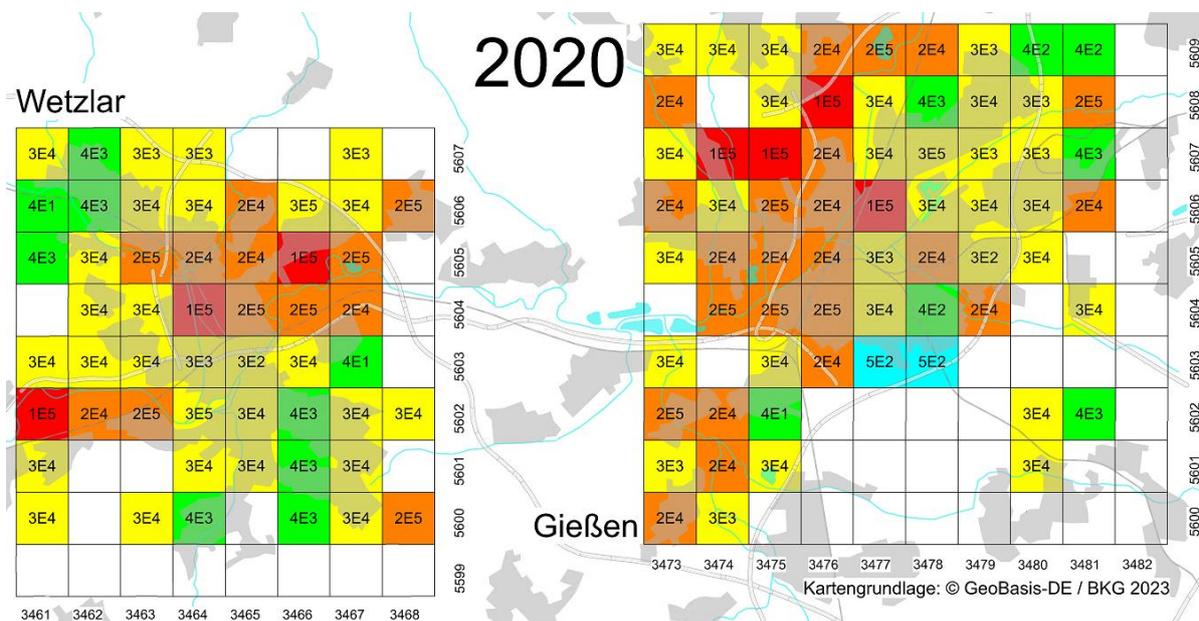


Abb. 65: Flechten-Luftgütekarte von Wetzlar und Gießen 2020

Bewertung der Luftgüte	Indexwert	Einfluss eutrophierender Luftverunreinigungen
5 sehr hoch	E5	sehr stark
4 hoch	E4	stark
3 mäßig	E3	mäßig
2 gering	E2	gering
1 sehr gering	E1	sehr gering

Abb. 66: Legende zur Luftgütebewertung

In Wetzlar gibt es rot gekennzeichnete Messflächen, die 2020 eine nur sehr geringe Luftgüte erreicht haben:

- 3461/5602 nordwestlich Wetzlar-Steindorf
- 3464/5604 Niedergirmes, Gutleutstraße
- 3466/5605 Niedergirmes, Dammstraße

Auch die meisten der orange markierten Flächen (geringe Luftgüte) sind im Norden der Stadt anzutreffen, so dass der Norden im Bereich Niedergirmes sich durch die Flechten indiziert als am höchsten belastet zeigt. Die Ergebnisse decken sich mit technischen Luftmessungen des HLNUG (Messstelle Wetzlar-Köhlersgarten), nach denen Wetzlar-Herrmannstein, das nördlich an Niedergirmes angrenzt, ein hessischer Schwerpunkt für Luftverschmutzung durch Schwermetalle darstellt. Jedoch werden auch hier, wie an allen hessischen Messstellen, die Grenz- und Zielwerte deutlich unterschritten. Als typische Quellen für Schwermetalle nennt das HLNUG die Industrie und den Kfz-Verkehr (HLNUG - Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie 2023).

Deutlich günstiger ist die durch Flechten angezeigte Luftgüte sowohl im Nordwesten von Wetzlar (westlicher Teil von Aßlar und Klein-Altenstädten) als auch im Süden der Stadt im Bereich Nauborn, Stoppelberg und der Taunusstraße. Hier werden zahlreiche Messflächen mit einer hohen Luftgüte (grün) bewertet.

In Gießen sind Messflächen mit einer sehr geringen Luftgüte (rot) nur im Nordwesten der Stadt gefunden worden:

- 3474/5607 Heuchelheim-Nord, Abendstern
- 3475/5607 Oberer Hardthof
- 3476/5608 südsüdöstlich von Wettengel-Launsbach



Es grenzen zahlreiche Flächen mit einer geringen Luftgüte (orange) an, so dass im Nordwesten von Gießen großflächig ungünstige lufthygienische Bedingungen durch Flechten angezeigt werden.

Günstiger stellt sich die Situation auf Messflächen im Nordosten, Osten und Süden der Stadt Gießen dar. Es werden Bereiche mit hoher Luftgüte (grün) an der Hangelsteinstraße, im Nordosten angrenzend an Buseck, in Gießen-Rödgen (Abb. 67) und östlich des Schiffenbergs erreicht. Im Bereich des Steinberger Wegs werden sogar Messflächen mit einer sehr hohen Luftgüte (blau) ausgezeichnet.

Abb. 67: Üppiger Flechtenbewuchs in Gießen-Rödgen mit Luftgütezeigern wie *Evernia prunastri*, *Parmelia sulcata* und *Hypogymnia physodes* (Foto: Windisch)

5.4.3 Zeitliche Entwicklung der Luftgüte in Wetzlar und Gießen

Betrachtet man Entwicklung der Luftgüteklassen im Laufe der Dauerbeobachtung seit 1985 für die beiden Städte (Abb. 68), so zeigt sich, dass Messflächen mit sehr geringer Luftgüte (Farbe Rot) rasch zurückgegangen sind. Im Jahr 2015 wurde diese ungünstige Luftgütestufe nicht mehr ermittelt. In 2020 trat sie jedoch in Wetzlar an drei und in Gießen an vier Mess-flächen wieder auf. Auch Messflächen mit geringer Luftgüte (Orange) sind im Laufe des Monitoring-Zeitraums zunächst zurückgegangen. In Gießen kehrte sich der Trend im letzten Betrachtungszeitraum (2015 bis 2020) um; es kam durchschnittlich zu einer Verschlechterung der Luftgütebewertung.

Flächen mit einer günstigen Luftgütebewertung (grün oder blau) werden in Wetzlar seit 1995 gefunden, in Gießen treten sie seit 2005 auf. Ihre Zahl ist jedoch nach wie vor gering. Es handelt sich in der Regel um Messflächen, die fernab von Industrieschwerpunkten oder größeren Verkehrsachsen liegen und durch Waldgebiete (Stoppelberg in Wetzlar, Hangelstein und Schiffenberger Wald in Gießen) lufthygienisch begünstigt sind.

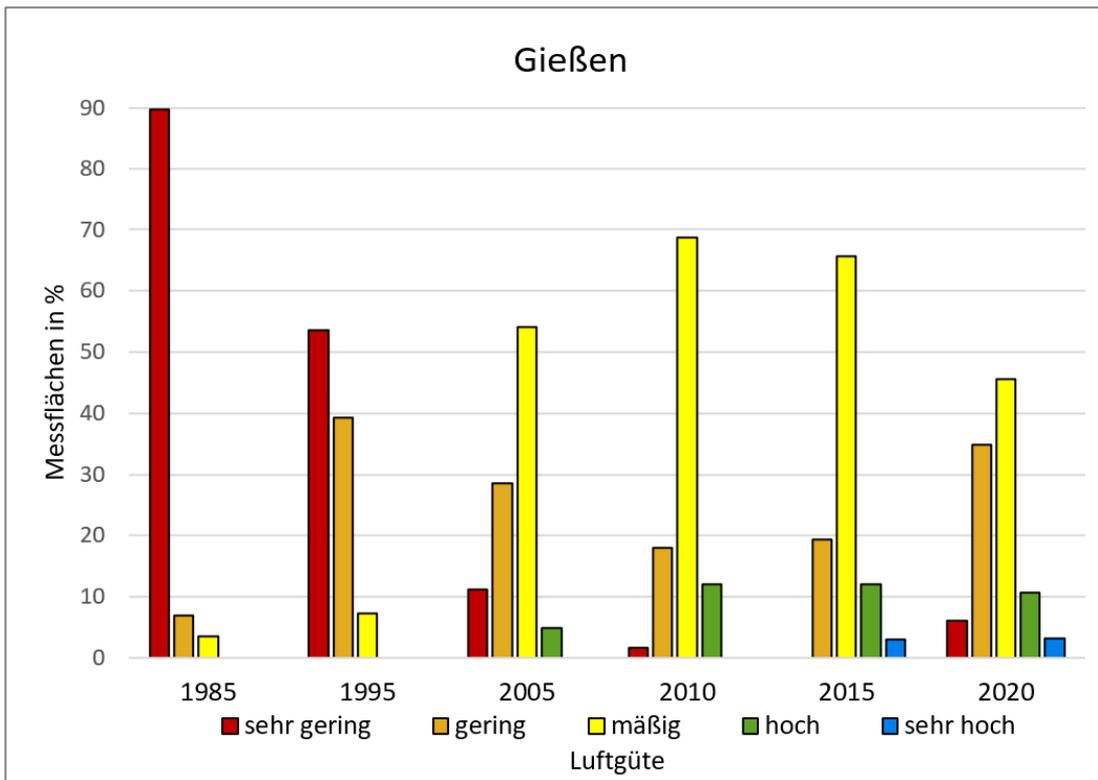
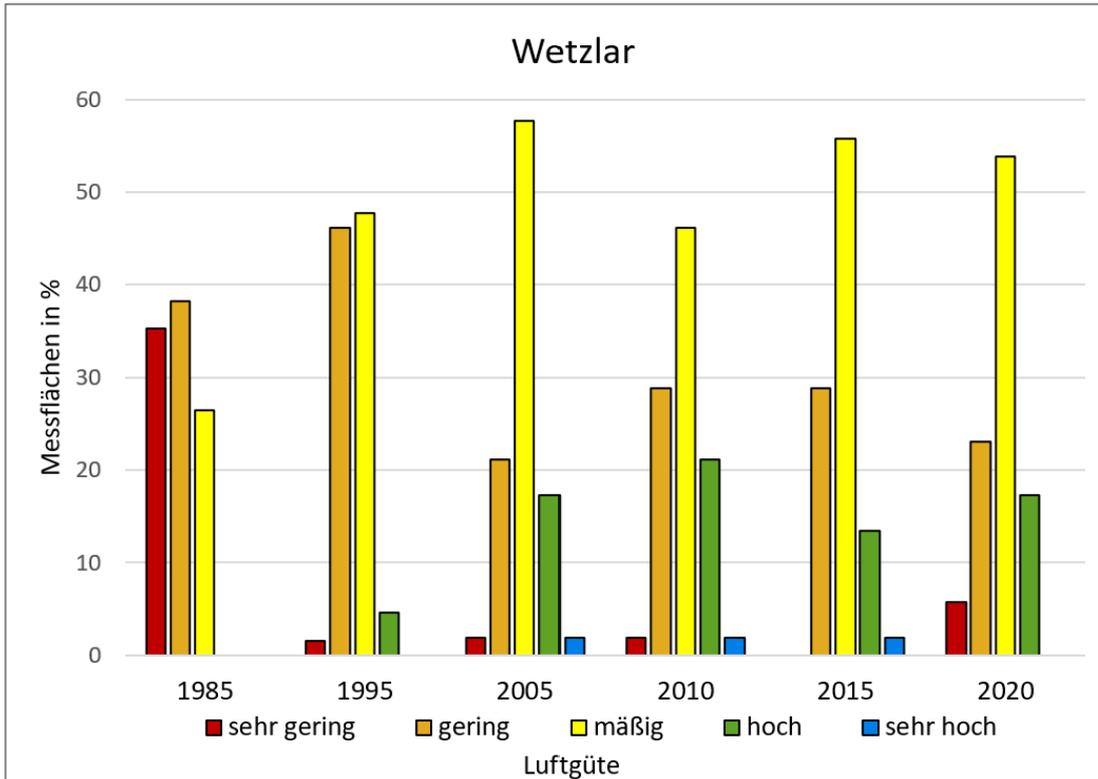


Abb. 68: Prozentuale Verteilung der Luftgüteklassen in Wetzlar (oben) und Gießen (unten) seit 1985

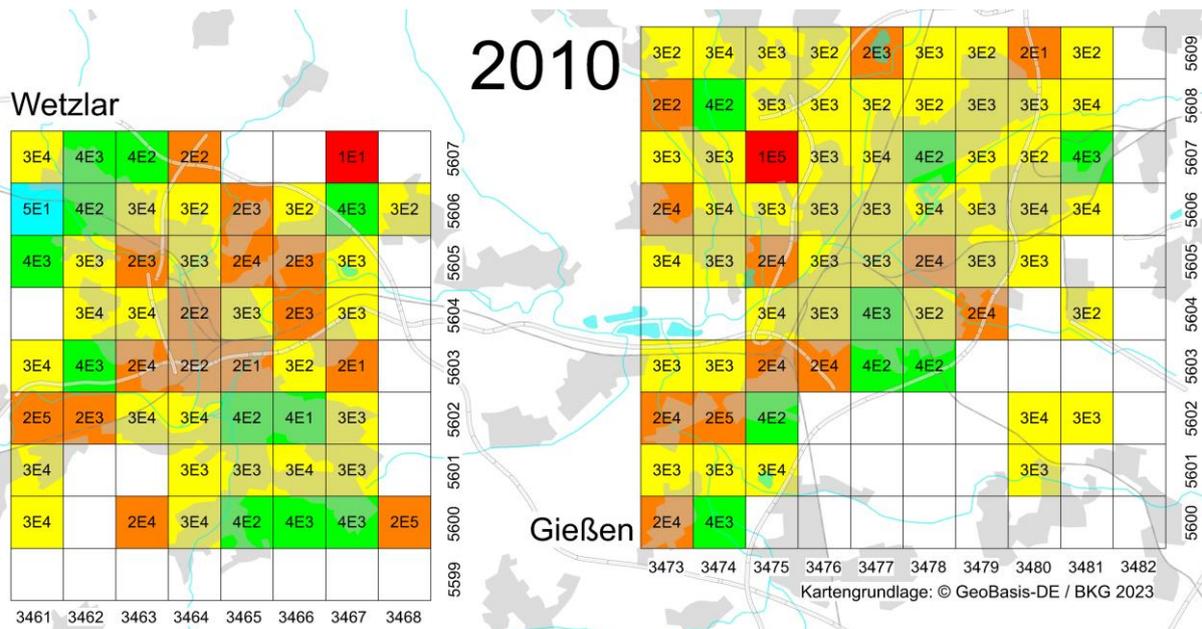
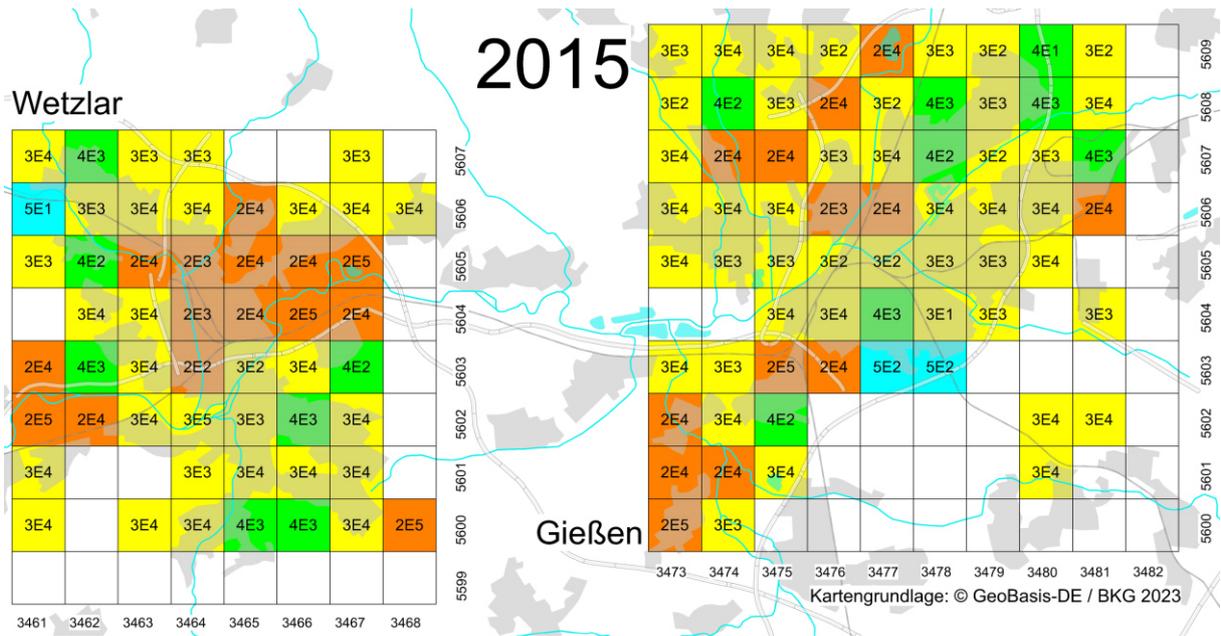


Abb. 69: Flechten-Luftgütekarten von Wetzlar und Gießen 2010-2015

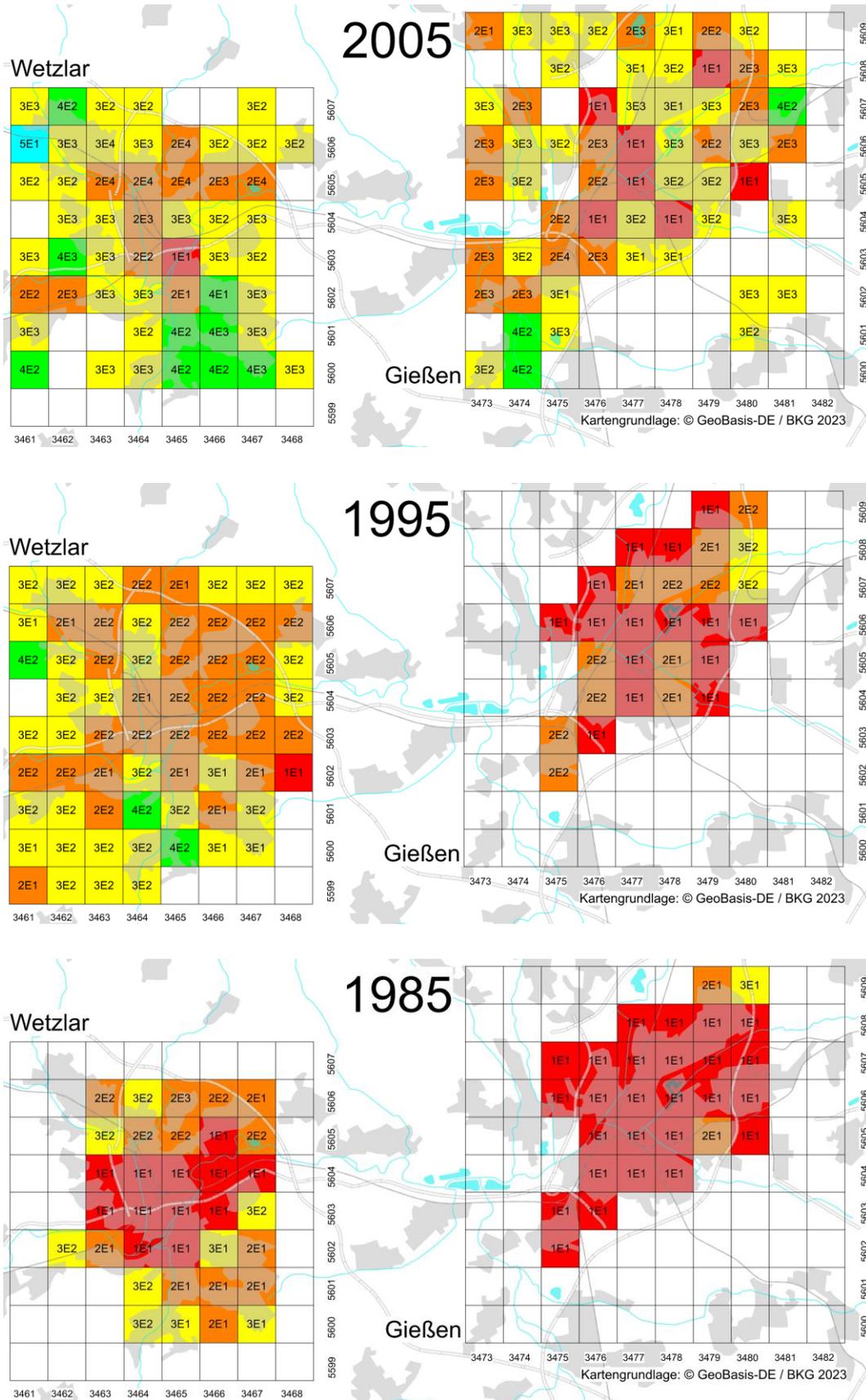


Abb. 70: Flechten-Luftgütekarten von Wetzlar und Gießen 1985 bis 2005

Die Interpretation der städtischen Flechten-Luftgüte erfolgt analog der der ländlichen DBF: Der Luftgüteindex basiert auf Flechten-Diversitätswerten (FDW). Der FDW wird anhand der Artenzahl und Häufigkeit der im Aufnahmegitter vorkommenden Flechtenarten ermittelt. Er wird getrennt für Referenzarten (die meisten hier betrachteten Flechtenarten) und Eutrophierungszeiger berechnet. Die zeitliche Entwicklung dieser Diversitätswerte gibt einen wichtigen Hinweis zu den Ursachen der 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.

Der Flechten-Diversitätswert der Referenzarten (FDW_{Ref}) zeigt auch im Zeitraum 2015-2020 wieder einen Anstieg, sowohl des arithmetischen Mittelwerts (+ 1,4) als auch des Maximums (+ 0,2) (Abb. 71). Die Betrachtung lässt den Schluss zu, dass eine verbesserte lufthygienische Situation erreicht werden konnte. Jedoch ist der Anstieg des FDW der Eutrophierungszeiger (FDW_{Eu}) im Vergleich zu dem der Referenzarten überproportional (Abb. 71). So haben sich im Zeitraum 2015-2020 der arithmetische Mittelwert des FDW_{Eu} um einen Wert von 4,1 und das Maximum um 8,4 erhöht. Beide Werte übersteigen die der Referenzarten deutlich. Steigen die Wirkungen eutrophierender Luftverunreinigungen an, so resultieren höhere FDW_{Eu} . Eine solche Zunahme mindert die Bewertung der Luftgüte, da eutrophierende Verbindungen (Ammoniak, Stickstoffoxide, etc.) zur Luftbelastung beitragen. Bei der Ermittlung der Luftgüteklassen mittels der Matrix zur Bestimmung des Luftgüteindex (Abb. 8) resultieren folglich bei einer hohen FDW der Eutrophierungszeiger niedrigere Luftgüteklassen als aufgrund der Zunahme der FDW der Referenzarten zunächst angenommen werden kann.

Zusammenfassend kann zur flechtenindizierten Luftgüte in Wetzlar und Gießen gesagt werden:

- Für beide Städte kann durch die Flechtenkartierung jeweils im Nordwesten ein lufthygienischer Belastungsschwerpunkt ermittelt werden. Für Wetzlar liegen dort Daten des HLNUG vor, die Belastungen durch die schwermetalloverarbeitende Industrie und den Straßenverkehr nahelegen. Dagegen liegt für Gießen kein solches engmaschiges Luftmessnetz vor.
- Beide Städte weisen lufthygienisch günstige Bereiche auf. Diese liegen fernab von Industrie- und Verkehrsschwerpunkten und grenzen an Waldgebiete an.
- Nach den deutlichen Verbesserungen der Luftgüte nach Mitte der 1985er Jahre ist etwa ab dem Jahr 2010 eine Trendwende eingetreten. In den letzten Jahren hat die Luftgüte sich nicht mehr verbessert. Ein wichtiger Grund sind eutrophierende Wirkungen, die nährstofftolerante Flechtenarten stark fördern. Dies geht negativ in die Bewertung der Luftgüte ein.

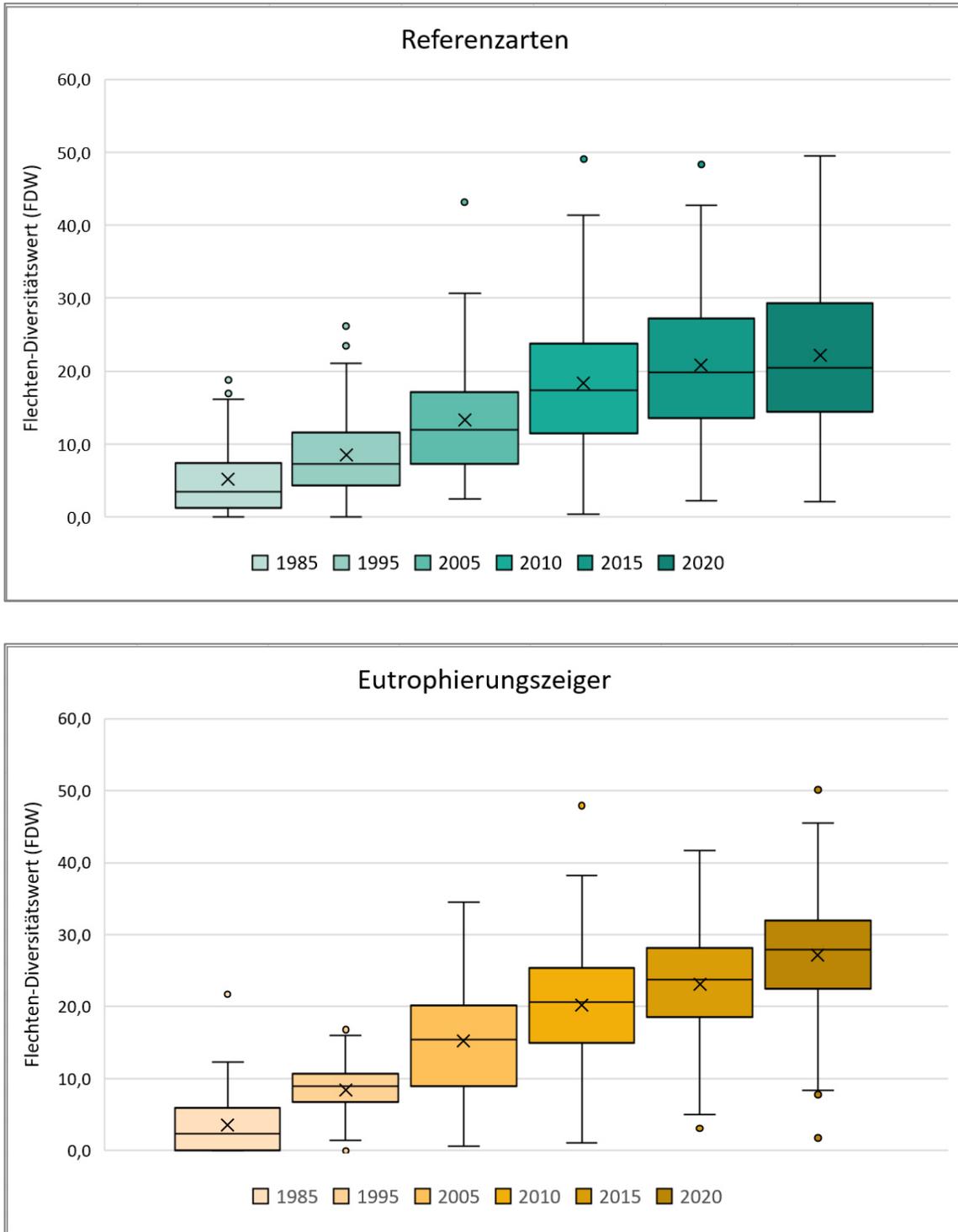


Abb. 71: Zeitliche Entwicklung des Flechten-Diversitätswertes der Referenzarten (FDW_{Ref}) und der Eutrophierungszeiger (FDW_{Eu}) an den Messflächen in Wetzlar und Gießen; Boxplot mit Darstellung des arithmetischen Mittelwerts als „x“

5.4.3.1 Ergebnis der Luftgütebewertung nach neuer Richtlinienfassung

Die Ergebnisse wurden nach den Vorgaben der im Jahr 2023 aufgelegten VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 für alle Kartierungsjahre neu berechnet. Die Neufassung der Eutrophierungszeigerliste kann zu einer neuen Einstufung der Flechten-Luftgüte auch für die früheren Kartierungsdurchgänge führen. Zu erwarten ist dies auf Messflächen, auf denen Flechtenarten erfasst wurden, die nach der alten Richtlinie als Referenzarten in die Berechnung eingingen, nach der neuen Richtlinie jedoch als Eutrophierungszeiger behandelt werden (vgl. Methodenkapitel 4.6.1).

Um das Ausmaß der Änderungen für die Luftgütebewertung zu quantifizieren wurde beispielhaft eine Auswertung der Daten aus der Flechtenkartierung in Wetzlar und Gießen aus 2015 sowohl nach der letzten Version der Richtlinie aus 2005 als auch nach der neuen Version aus 2023 vorgenommen. Es wurde geprüft, ob es durch die geänderte Auswertemethode zu einer Neubewertung der durch die Flechten angezeigten Luftgüte kommt. Es zeigte sich, dass die Luftgüte aus dem Jahr 2015 auf 71 von 138 Flächen (51%) um eine Stufe ungünstiger bewertet wird, wenn nach der neuen Richtlinie vorgegangen wird. Die Hauptursache ist dabei die Neueinstufung der häufigen und frequenzstarken Art *Candelariella reflexa*, die in der Richtlinienfassung aus 2023 erstmalig als Eutrophierungszeiger gewertet wird (vgl. Tab. 5). Die Art wurde in der vorliegenden Arbeit als Artengruppe mit dem Status „Eutrophierungszeiger“ ausgewertet (*Candelariella reflexa* s.l./*Candelariella xanthostigma*), weitere Erläuterungen finden sich im Methodenkapitel 4.6.1. Der Fall unterstreicht die Notwendigkeit, die Grunddaten von Langzeituntersuchungen immer wieder nach der jeweils aktuellen Richtlinienversion auszuwerten, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

5.4.4 Entwicklung der Borken-pH-Werte in Wetzlar und Gießen

Die Borken der kartierten Trägerbäume werden seit 1985 beprobt und ihr pH-Wert gemessen. Im Laufe der Untersuchungen ist ein Anstieg der Borken-pH-Werte zu erkennen (Tab. 10).

Tab. 10: Zeitliche Entwicklung der Borken-pH-Werte in Wetzlar und Gießen seit 1985 als arithmetische Mittelwerte

mittlerer Borken-pH-Wert										
	1985		2005		2010		2015		2020	
	Wetzlar	Gießen								
Apfelbaum	5,10	4,66	6,36	6,25	6,59	6,62	6,46	6,46	6,50	6,47
Bergahorn	3,80	-	6,16	5,72	6,53	6,20	6,38	6,27	6,27	6,29
Birnbaum	-	-	5,78	4,62	5,55	4,55	5,51	4,10	6,06	4,52
Esche	-	-	5,62	5,25	4,90	5,36	5,45	5,50	5,80	6,03
Linde	3,62	3,22	4,89	4,75	4,98	4,86	5,42	4,98	5,49	5,55
Pappel	4,65	3,74	5,46	5,62	5,81	5,41	6,10	5,50	5,97	5,81
Spitzahorn	-	-	5,58	6,10	5,91	6,40	5,95	6,31	6,00	6,26

Um die Lage und Streuung der Werte zu veranschaulichen folgen Darstellungen als Boxplots (Erklärung dazu im Methodenkapitel auf Seite 27). Eine Mischprobe von Bäumen einer Art auf einer Messfläche liefert einen Messwert. Dargestellt werden die Ergebnisse in absteigender Reihenfolge ihres Datenumfangs (Abb. 72 bis Abb. 77), beginnend mit der Linde, die am häufigsten und durchgängig seit 1970 beprobt wurde.

Für die Gießener Linden (Abb. 72) liegen Daten ab 1970 vor. Die Linde gilt zwar als Baumart mit „natürlicherweise eher niedrigem“ Borken-pH-Wert, dennoch dürften die Borken-pH-Werte zu Beginn der Messreihe mit etwa pH 3,2 deutlich unter dem natürlichen Borken-pH-Wert gelegen haben. In einer Publikation von Barkman aus 1958 wird der Borken-pH-Wert von Linde mit 4,8 bis 6,2 angegeben, wobei der Hinweis gegeben wird, dass höhere pH-Werte durch Staubimprägnierung der Baumstämme entstehen können (Barkman 1958).

Von 1970 bis 1985 ist noch kein Anstieg der Borken-pH-Werte zu erkennen, von 1985 bis 2005 hingegen haben die pH-Werte der Linden sich deutlich erhöht. Dies lässt sich mit der Entwicklung der SO₂-Immissionskonzentration erklären (vgl. Abb. 61), die nach 1987 aufgrund von Rauchgasentschwefelung deutlich reduziert werden konnte. In den Folgejahren konnten die Niederschläge die zuvor angereicherten Säuren aus den Baumborken zumindest teilweise auswaschen.

Zum Vergleich der Befunde beider Städte berichtet KIRSCHBAUM (Kirschbaum 2016): „Bemerkenswert sind die unterschiedlichen Entwicklungen der Rinden-pH-Werte in Wetzlar und in Gießen. In Wetzlar war die Ansäuerung aller Baumarten trotz vergleichbarer SO₂-Immissionen 1985 deutlich geringer als in Gießen. Dieses Phänomen lässt sich mit einer Besonderheit in der Wetzlarer Immissionssituation erklären. Dort gibt es neben den sauren Immissionen seit jeher auch Kalkstaubemittenten im Norden der Stadt. Die Kalkstaubimmissionen waren in den 60er und 70er Jahren des letzten Jahrhunderts so heftig, dass Wäsche, die dort morgens aufgehängt wurde, mittags grau und bretthart war (eigene Erfahrungen des Autors). Die basischen Stäube haben selbst 1970 – bei gleichzeitig hoher Schwefeldioxidbelastung – die sauren Immissionen teilweise neutralisiert, was zu einer geringeren Ansäuerung der dortigen Baumrinden führte.“

In den betrachteten 50 Jahren zeigen die Borken-pH-Werte der Linde für beide Städte einen deutlichen Anstieg. Der Median lag in Gießen in 1970 bei pH 3,2 und ist bis 2020 auf pH 5,5 angestiegen. Auch im letzten Betrachtungszeitraum fand bei den Gießener Linden noch eine Erhöhung statt. Hier könnten an die Bäume getragenen Stäube eine Rolle beim Anstieg der pH-Werte spielen. Die aktuell gemessenen Werte (Mediane beider Städte bei pH 5,5) befinden sich jedoch noch in dem von Barkman angegebenen Bereich und sind somit noch unauffällig.

Ursachen für erhöhte Borken-pH-Werte können alkalisierende Immissionen wie Ammoniak oder basenhaltige Stäube sein. Auf Ammoniak-Immissionen wurde bei der Interpretation der Flechtendaten bereits eingegangen (vgl. Abb. 55). Das gasförmige Ammoniak, freigesetzt etwa durch die Landwirtschaft oder den Straßenverkehr, wirkt nach Kontakt mit Wasser alkalisch und führt zu einem Anstieg des pH-Wertes.

Das Aufkommen basenhaltiger Stäube in Städten kann durch die naturräumlichen Bedingungen oder durch menschliche Aktivitäten verursacht sein. Die Alkalisierung städtischer Böden wird auf das Vorhandensein technogener Substrate wie Bau- und Trümmerschutt zurückgeführt (Endlicher 2012). Durch Aufwirbelungen von Stäuben können die nährstoffhaltigen, alkalischen Bodenbestandteile wiederum an die Bäume gelangen und an den Baumborken mit ihrer porösen Struktur anhaften.

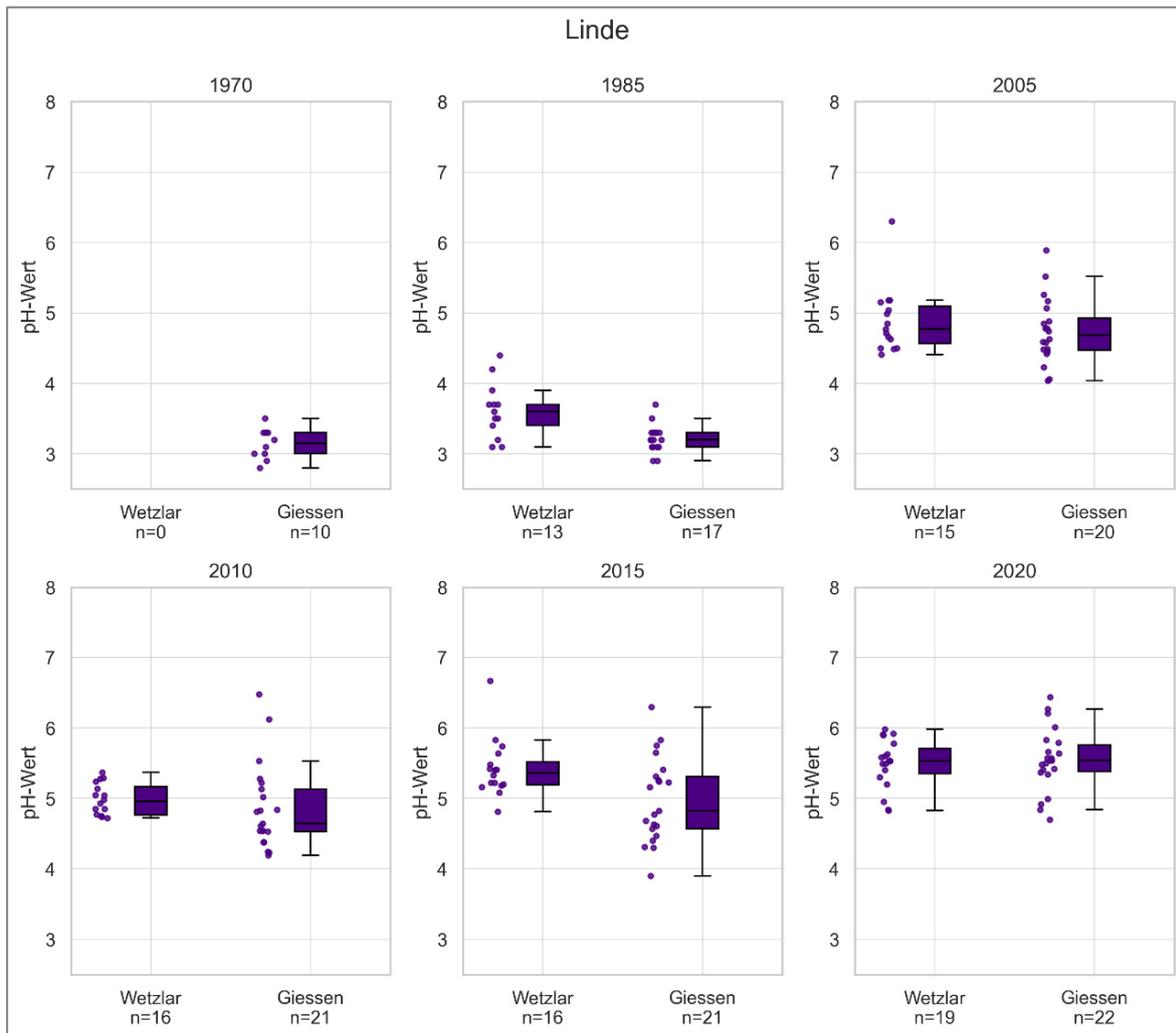


Abb. 72: Zeitliche Entwicklung der Borken-pH-Werte von **Linde** in Wetzlar und Giessen von 1970 bis 2020; Boxplots mit Punktdarstellung der Borken-pH-Werte einzelner Messflächen

Die Borken-pH-Werte der Baumarten Apfel (Abb. 73) und Pappel (Abb. 74) waren bereits im Untersuchungsjahr 1985 höher als die der Linde, da ihre Borken aufgrund ihrer höheren Pufferkapazität saure Immissionen teilweise neutralisieren können. Sie werden daher nachvollziehbar als Baumarten mit subneutraler Borke eingestuft. Bei beiden Borken sind die pH-Werte in den 20 Jahren von 1985 bis 2005 weiter deutlich angestiegen und danach bei einem pH-Median von etwa 6,5 verblieben.

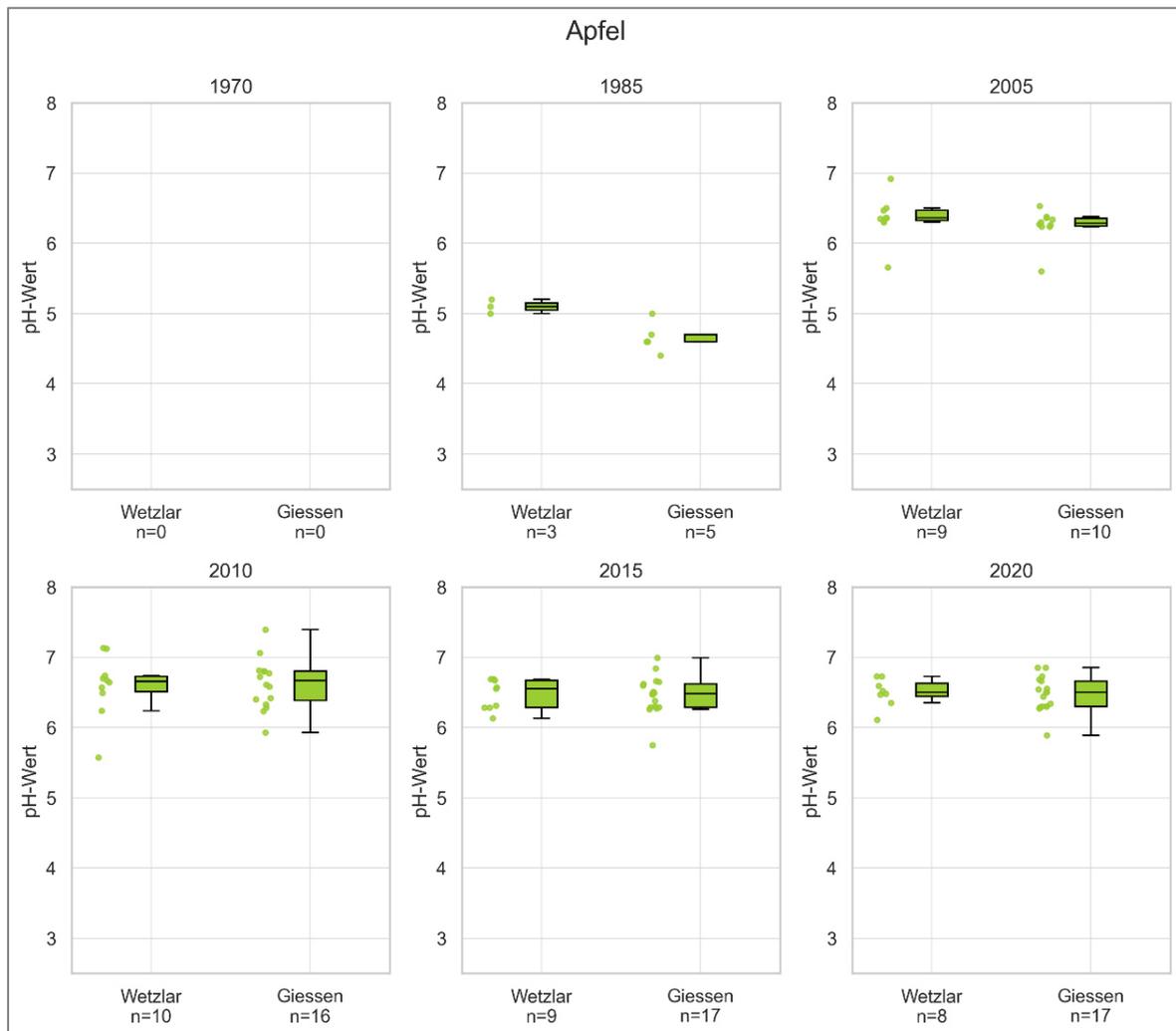


Abb. 73: Zeitliche Entwicklung der Borken-pH-Werte von **Apfelbaum** in Wetzlar und Giessen von 1970 bis 2020; Boxplots mit Punktdarstellung der Borken-pH-Werte einzelner Messflächen

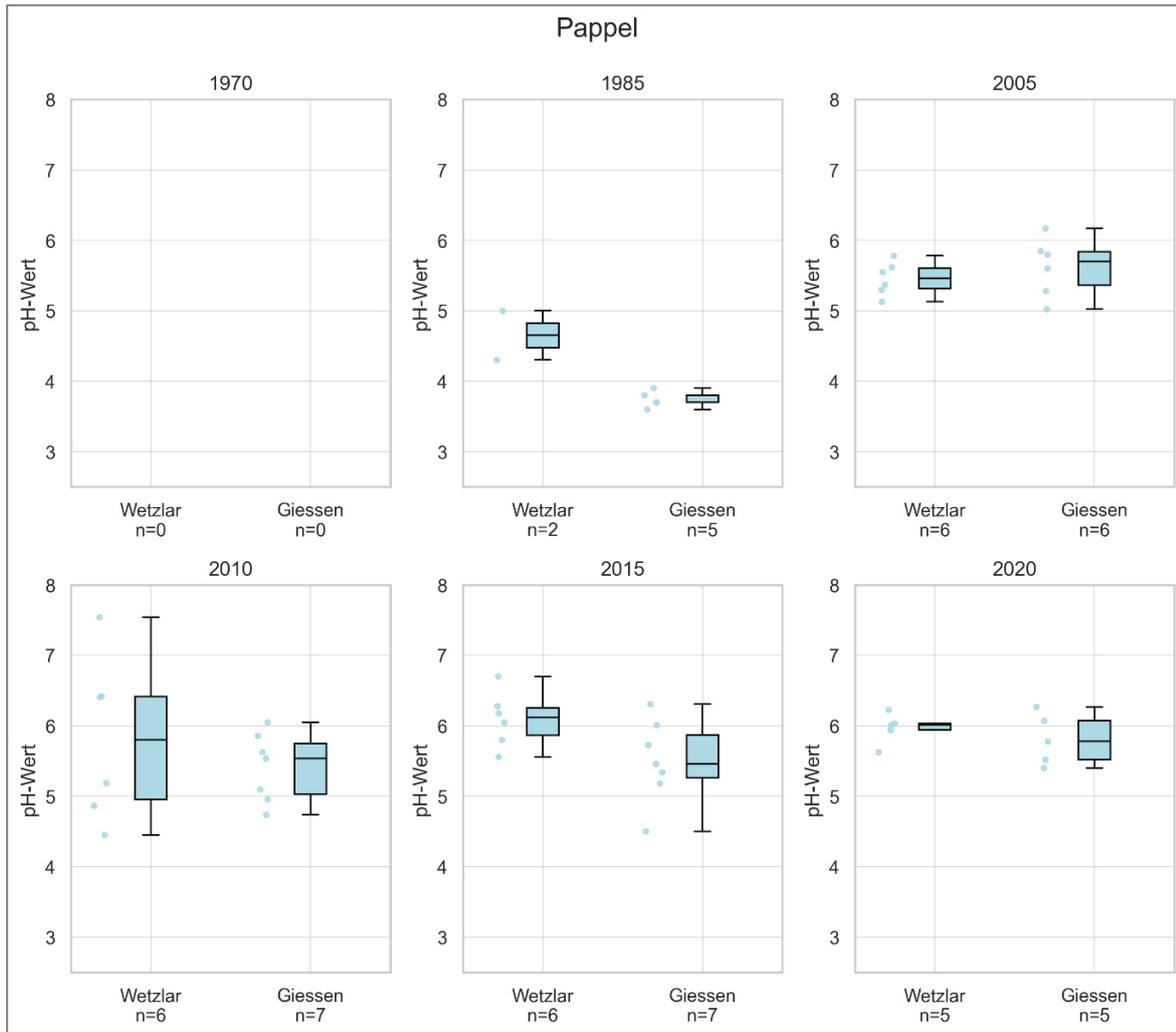


Abb. 74: Zeitliche Entwicklung der Borken-pH-Werte von **Pappel** in Wetzlar und Giessen von 1970 bis 2020; Boxplots mit Punktdarstellung der Borken-pH-Werte einzelner Messflächen

Auch die Baumarten Bergahorn (Abb. 75), Spitzahorn (Abb. 76) und Esche (Abb. 77) werden als Baumarten mit subneutraler Borke eingestuft. Hier liegen Messwerte erst ab 2005 und nur für jeweils wenige Messflächen vor. Die Werte des Bergahorns liegen vergleichsweise hoch, mit Medianen > pH 6 seit 2010. Bei Spitzahorn und Esche liegt der Median etwas niedriger; höhere Werte werden erst in der letzten Untersuchung erreicht.

Die Ergebnisse der Ahornarten sind für zukünftige Untersuchungen nutzbringend, da die Arten im städtischen Bereich zunehmend gepflanzt wurden. Auch weitere, insbesondere trockenresistente Baumarten, können in den nächsten Jahrzehnten für das Borken-Monitoring interessant werden.

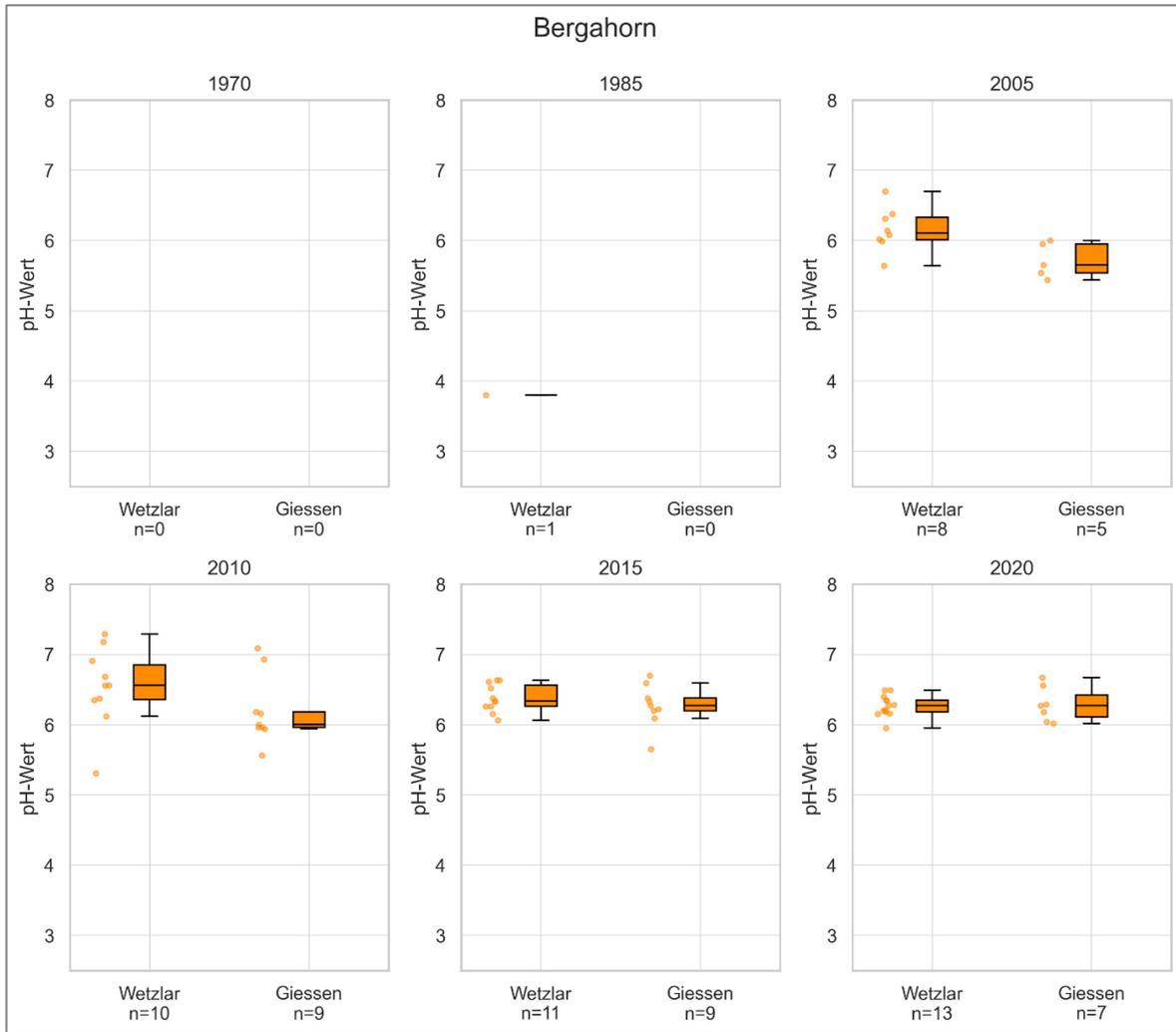


Abb. 75: Zeitliche Entwicklung der Borken-pH-Werte von **Bergahorn** in Wetzlar und Giessen von 1970 bis 2020; Boxplots mit Punktdarstellung der Borken-pH-Werte einzelner Messflächen

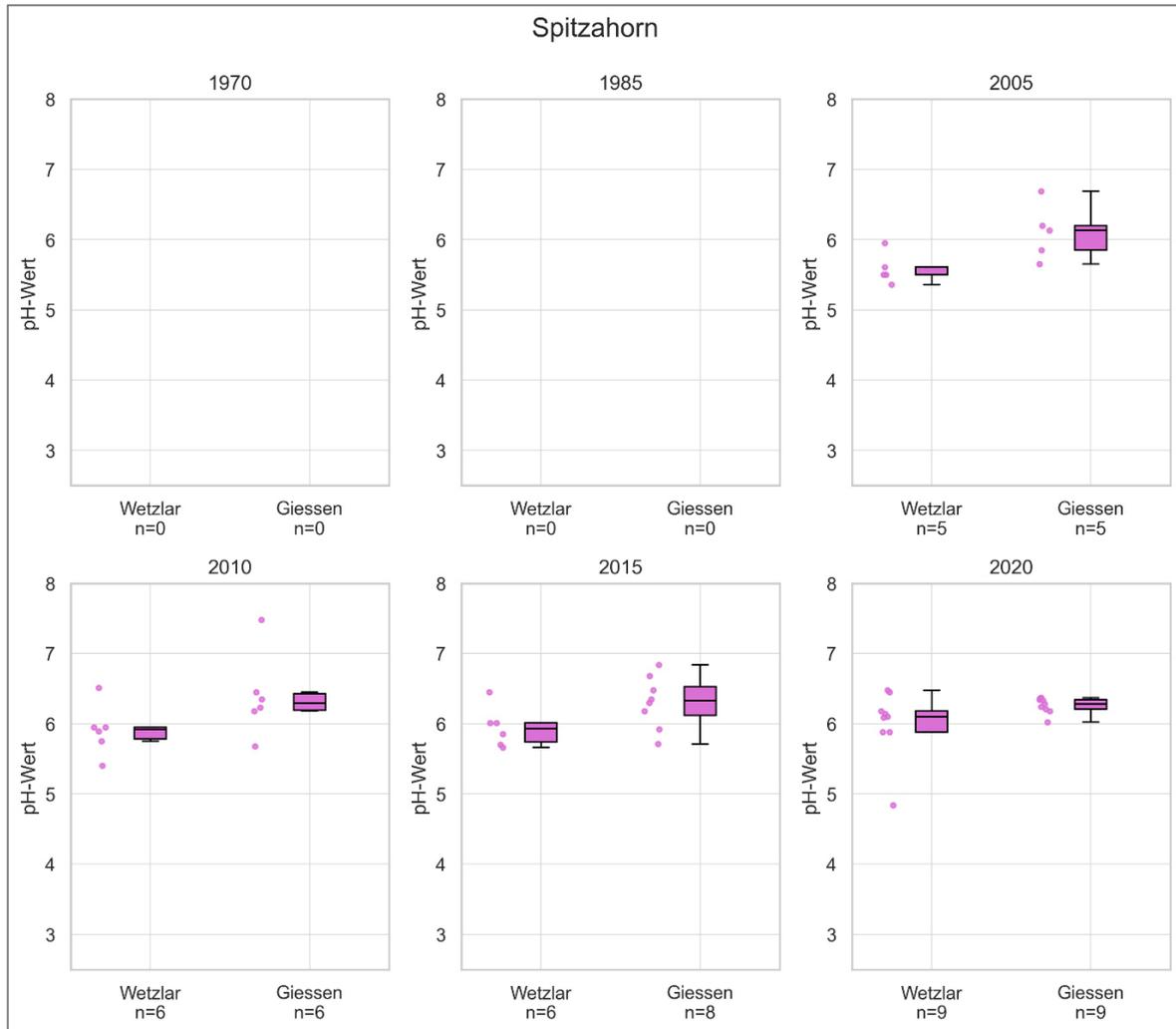


Abb. 76: Zeitliche Entwicklung der Rinden-pH-Werte von **Spitzahorn** in Wetzlar und Giessen von 1970 bis 2020; Boxplots mit Punktdarstellung der Rinden-pH-Werte einzelner Messflächen

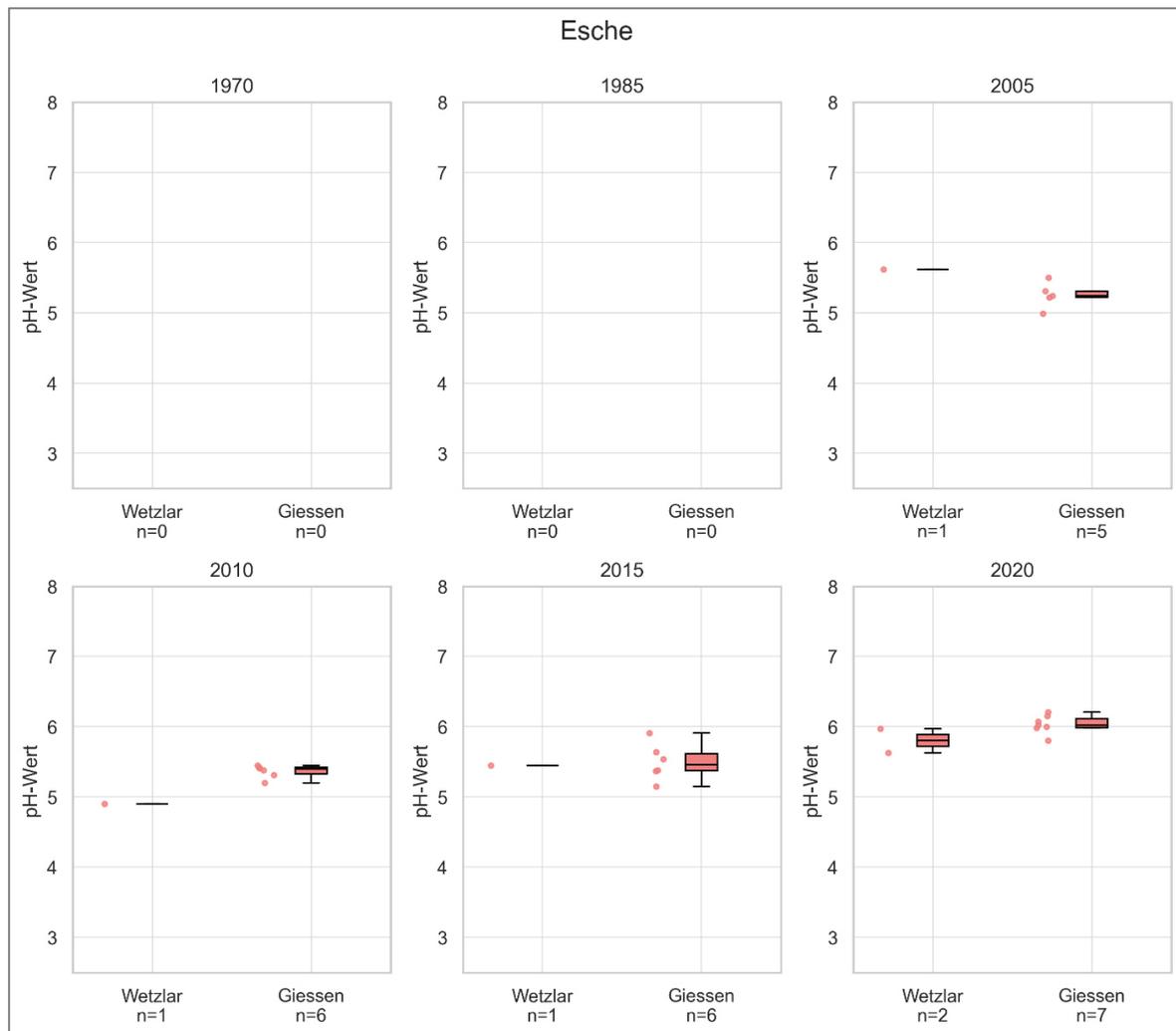


Abb. 77: Zeitliche Entwicklung der Borken-pH-Werte von **Esche** in Wetzlar und Giessen von 1970 bis 2020; Boxplots mit Punktdarstellung der Borken-pH-Werte einzelner Messflächen

5.5 Wirkungen von lokalen Klimaveränderungen in den ländlichen Dauerbeobachtungsflächen Hessens

Zur Darstellung der Ergebnisse des Flechten-Klimabiomonitorings werden zwei Methoden, die in der Richtlinie des VDI 3957 Blatt 20 beschrieben sind, angewendet. Zum einen wird ein Klimawandelzeiger-Index (KWI) für die untersuchten Flächen berechnet, zum anderen erfolgt eine quantitative Auswertung der Diversität von Klimawandelzeigern.

5.5.1 Klimawandelzeiger-Index (KWI), erhoben an Baumstämmen

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

In der Kartierung von Baumstämmen der Klimabäume wurden an den landesweit zehn untersuchten Dauerbeobachtungsflächen zehn Klimawandelzeigerarten gefunden (Abb. 78). Die Blattflechtenart *Punctelia subrudecta* war am häufigsten, sie wurde an 53 von 200 Bäumen kartiert. Dahinter folgen *Punctelia jeckeri*, *Melanohalea elegantula* und *Flavoparmelia caperata*.

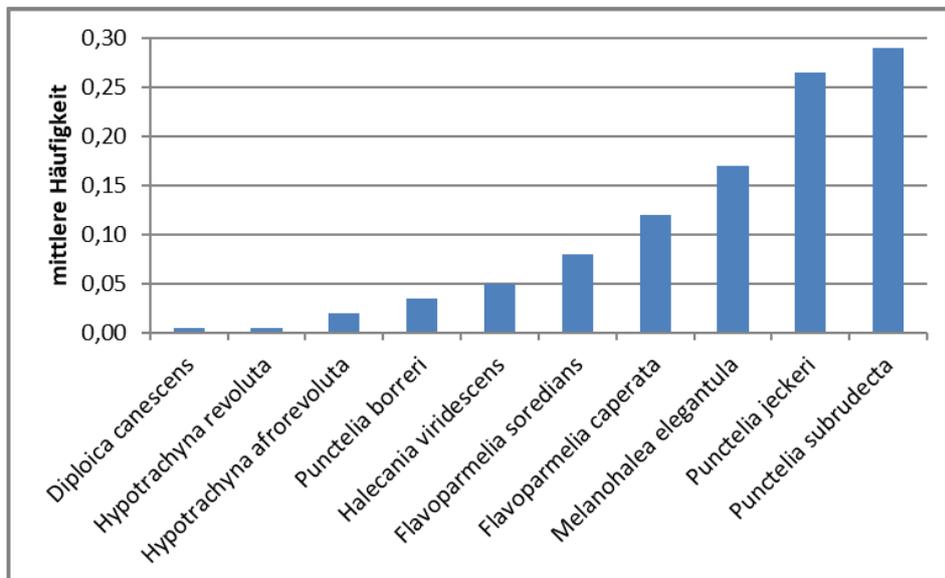


Abb. 78: Mittlere Häufigkeit der Klimawandelzeiger in 2022 an Klimabäumen für alle Dauerbeobachtungsflächen in Hessen



Abb. 79: Klimawandelzeiger in Hessen (**links:** Gefleckte Punktflechte (*Punctelia subrudecta*) (Foto: Kirschbaum); **rechts:** Caperatflechte (*Flavoparmelia caperata*) (Foto: Windisch)

Aus den mittleren Häufigkeiten der Klimawandelzeiger-Arten wird ein Klimawandelzeiger-Index (KWI) berechnet. Der KWI gibt an, wie viele der ausgewiesenen Klimawandelzeiger-Flechtenarten im Durchschnitt an den Bäumen kartiert werden. Ein Wert von 1 bedeutet, dass im Durchschnitt an jedem der kartierten Bäume eine Klimawandelzeigerart gefunden wurde.

Die zeitliche Entwicklung des KWI geben Abb. 80 und Tab. 11 wieder.

Auf 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. Damit bedarf die Fläche landesweit besondere Aufmerksamkeit. Die Werte sind hier auch in den vergangenen fünf Jahren wieder weiter angestiegen, so dass heute an jedem Baum durchschnittlich 1,95 klimawandelzeigende Flechtenarten angetroffen werden können.

Erstmalig in diesem langfristigen Monitoring zeigt der überwiegende Teil der Dauerbeobachtungsflächen einen Anstieg des Klimawandelzeiger-Index. Dabei besteht ein Nord-Süd-Gefälle. Die südlicher in Hessen gelegenen DBF, wie etwa Rheingau, Odenwald und Flughafen erreichen einen kräftigen Anstieg von 0,4 Indexpunkten oder mehr im letzten Zeitraum 2017-2022. Nach der statistischen Prüfung (Friedman-Test für nicht normalverteilte, gepaarten Daten) ist der Anstieg des KWI für die DBF Spessart und Odenwald signifikant und hat für die DBF Rhön das erforderliche Signifikanzniveau ($p < 0,05$) mit $p = 0,059$ nur knapp verfehlt.

Eine Ausnahme stellt die DBF Biebesheim dar, an der der Klimawandel-Index gleichgeblieben ist. Ein Grund könnten lufthygienische Belastungsfaktoren sein, die das Flechtenwachstum bremsen. Auf der DBF Melsungen finden sich bis heute nur kleine Bestände von Klimawandelzeigern an den untersuchten Bäumen. Die Fläche liegt im Nordosten von Hessen. Dies bestätigt die Annahme, dass die klimawandelzeigenden Arten von Westen und Süden her nach Deutschland einwandern (VDI 3957 Blatt 20 2017). Die nächste Untersuchung wird zeigen, ob die betreffenden Arten im Raum Melsungen häufiger geworden sind und auch dort lokale Klimawandelwirkungen anzeigen.

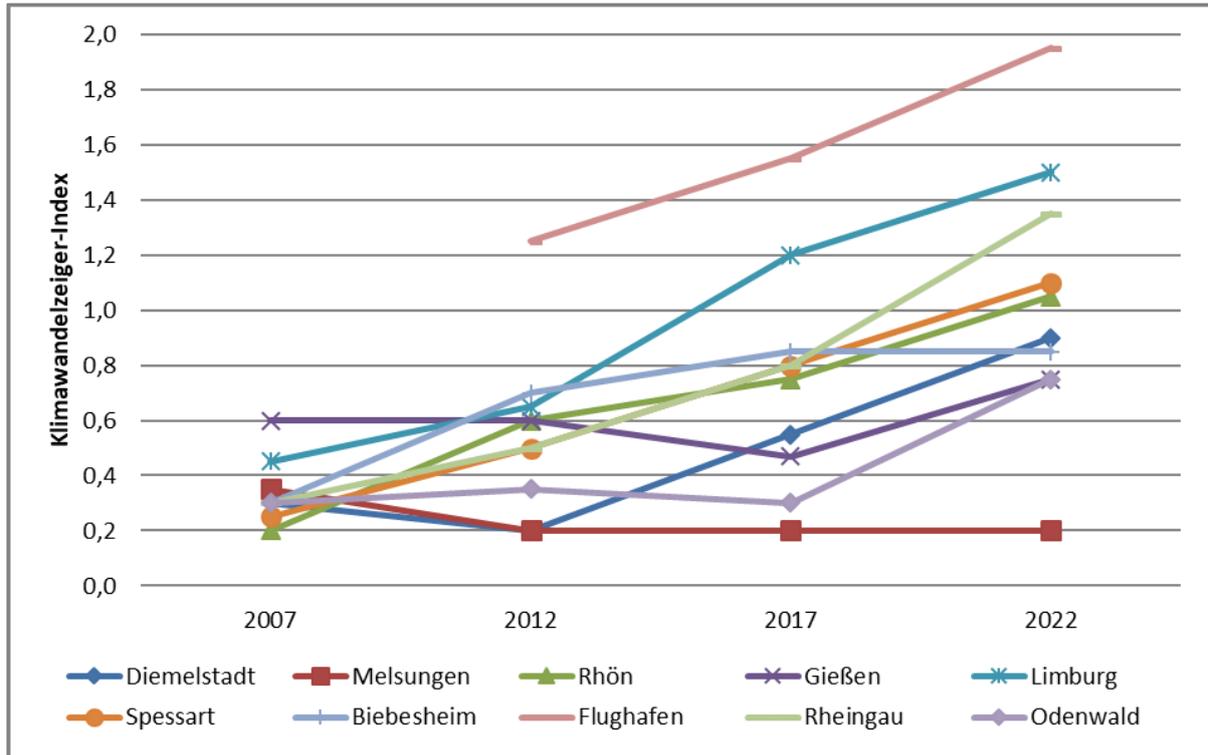


Abb. 80: Entwicklung des Klimawandelzeiger-Indexes 2007-2022 (für die DBF Flughafen liegen Daten erst ab 2012 vor)

Tab. 11: Entwicklung des Klimawandelzeiger-Index (KWI) der hessischen Dauerbeobachtungsflächen

DBF	KWI 2007	KWI 2012	KWI 2017	KWI 2022	KWI Zunahme (2017-2022)
Diemelstadt	0,30	0,20	0,55	0,90	+ 0,35
Melsungen	0,35	0,20	0,20	0,20	± 0,00
Rhön	0,20	0,60	0,75	1,05	+ 0,30(*)
Gießen	0,60	0,60	0,47	0,75	+ 0,30
Limburg	0,45	0,65	1,20	1,50	+ 0,30
Spessart	0,25	0,50	0,80	1,10	+ 0,30*
Biebesheim	0,30	0,70	0,85	0,85	± 0,00
Flughafen	keine Daten	1,25	1,55	1,95	+ 0,40
Rheingau	0,30	0,50	0,80	1,35	+ 0,55
Odenwald	0,30	0,35	0,30	0,75	+ 0,40*

* signifikante Erhöhung ($p < 0,05$) des KWI; (*) Signifikanz mit $p = 0,059$ knapp verfehlt; Friedman-Test

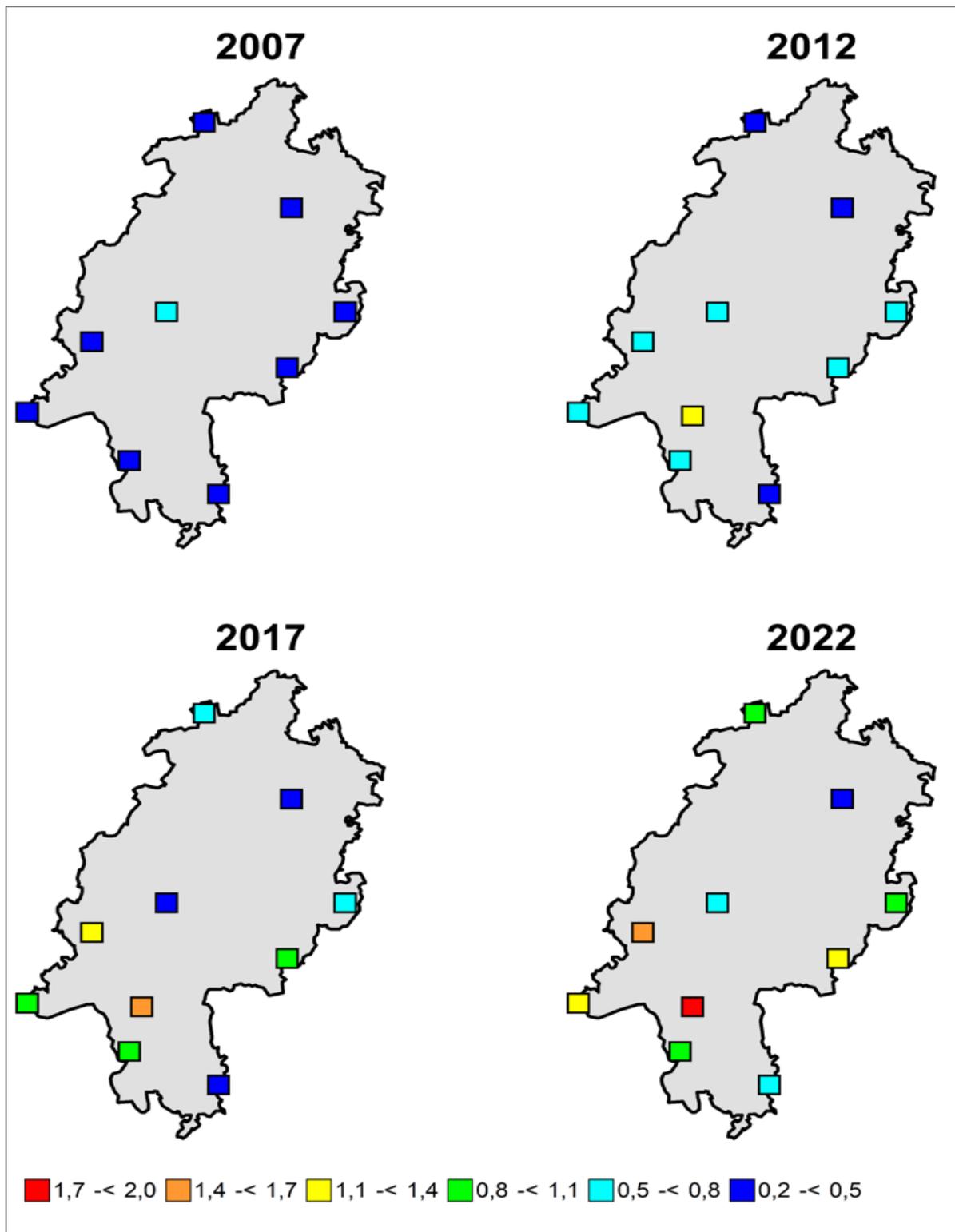


Abb. 81: Entwicklung des Klimawandelzeiger-Index (KWI) von 2007 bis 2022 aus der Kartierung von Baumstämmen standardisierter Trägerbäume

5.5.2 Flechten-Diversitätswert der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}), erhoben im Aufnahmegeritter

Diese zweite Möglichkeit der Auswertung nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 20 zum Klimawandel-Biomonitoring basiert auf den quantitativ in einem Flechtenaufnahmegeritter erfassten Frequenzen der Klimawandelzeiger (vgl. Tab. 6). Die Methode der Grunddatenerfassung entspricht derjenigen 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 30 Jahre (Abb. 82).

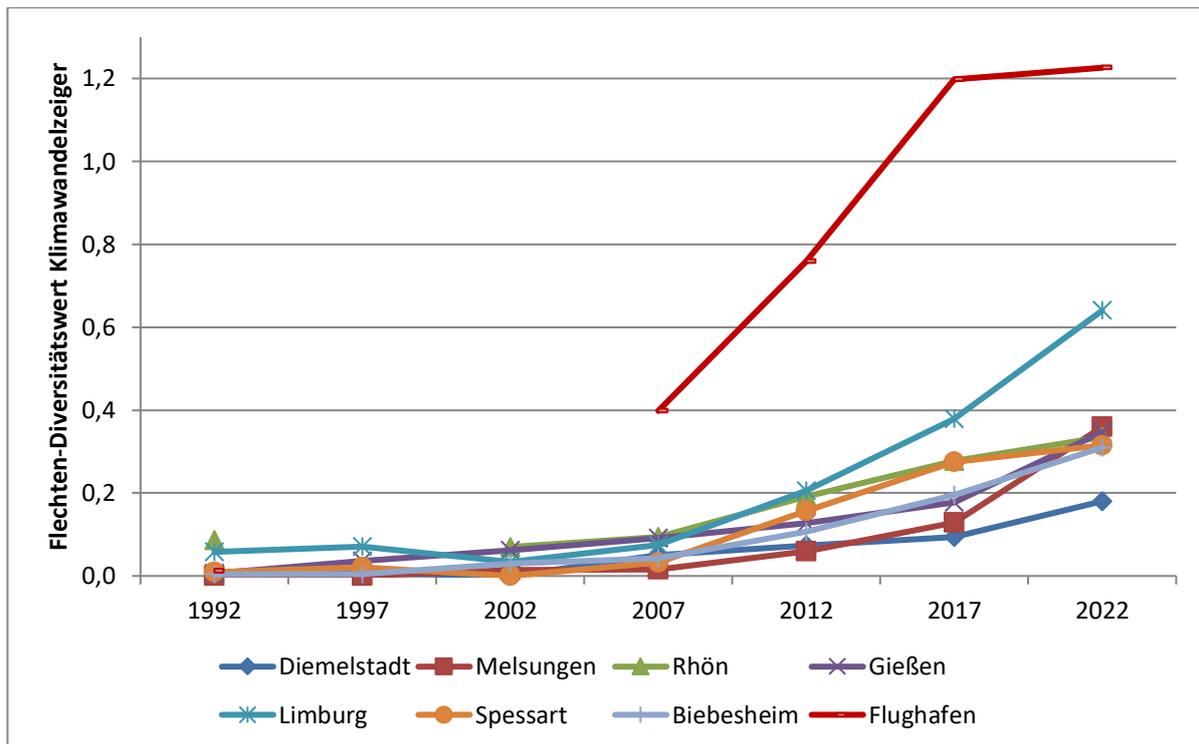


Abb. 82: Entwicklung des Flechten-Diversitätswertes der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}) von 1992-2022 im Aufnahmegeritter standardisierter Trägerbäume; die Untersuchungsfläche Flughafen wurde 1992 (Wert: 0,01) und 2007-2022 kartiert; die DBF Rhön wurde 1997 nicht untersucht

An den Bäumen der Luftgüteuntersuchung – und in den Aufnahmegerittern – wurden aktuell 15 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 auf 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 (14 Arten) deutlich weiter verstärkt hat. 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 auf 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 auf 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 zusammen mit dem Raum Biebesheim zu den wärmsten (Jahresmitteltemperatur 10,5 °C) und niederschlagsärmsten (Jahresniederschlags-summe 650 mm) der untersuchten Gebiete in Hessen (vgl. Anhang 2).

5.5.3 Wärmezeiger-Index (WZI), erhoben an Mauern

In dieser Arbeit sind zum vierten Mal für jede Dauerbeobachtungsfläche 30 vergleichbare Mauerabschnitte untersucht worden. Es liegt seitens des Vereins Deutscher Ingenieure keine mit der für die Baumflechten vergleichbare Auswertemethode für Klimawandelwirkungen vor.

Hier wird ein Wärmezeiger-Index, der die mittlere Häufigkeit von wärmeliebenden Flechtenarten darstellt, berechnet und in einer Zeitreihe dargestellt (Abb. 83). Ein Indexwert von 1 bedeutet, dass an den 30 Mauerabschnitten durchschnittlich eine wärmeliebende Flechtenart vorkommt.

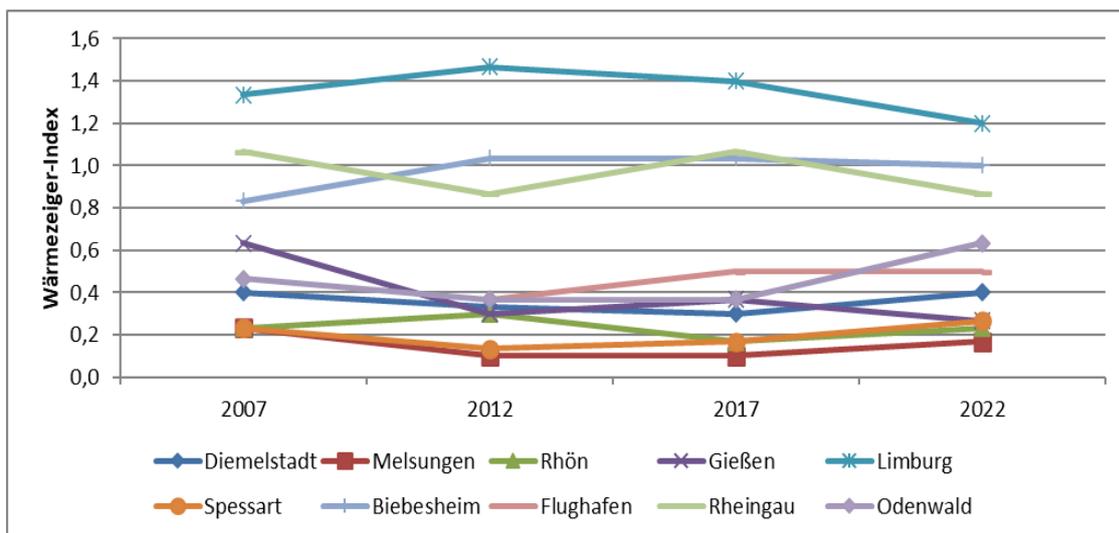


Abb. 83: Entwicklung des Wärmezeigerindex von 2007-2012 an jeweils 30 Mauerabschnitten; für die Untersuchungsfläche Flughafen liegen für 2007 keine Daten vor

Auf 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. Das Gebiet um den Flughafen zeigt in den vergangenen Jahren wie bei den Flechten auf Klimabäumen keinen Anstieg des Index in den vergangenen fünf Jahren.

Als häufigste Art unter den Wärmezeigern auf Mauern erwies sich wie schon in den letzten Jahren *Kuettlingeria teicholyta* (früher *Caloplaca teicholyta*) (Temperaturzeigerwert: 8; Abb. 85). Landesweit kommt die wärmezeigende Art an den Mauern aller Untersuchungsflächen vor, die meisten Funde gelangen jedoch im Süden Hessens, z. B. in Limburg (an 23 von 30 Mauern; mittlere Häufigkeit 0,77), Biebesheim (an 18 von 30 Mauern; mittlere Häufigkeit 0,60), Rheingau (an 18 von 30 Mauern; mittlere Häufigkeit 0,60), Odenwald (an 13 von 30 Mauern, mittlere Häufigkeit 0,43 und an der DBF Flughafen (an 11 von 30 Mauern, mittlere Häufigkeit 0,37).

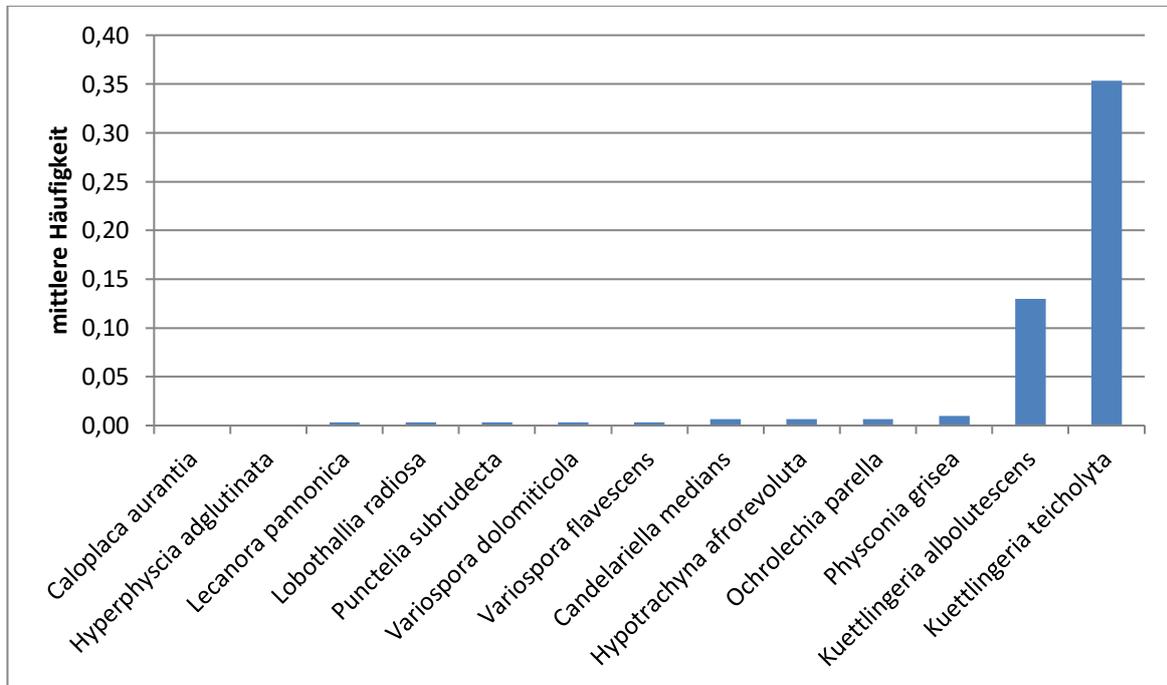


Abb. 84: Mittlere Häufigkeit der wärmezeigenden Flechtenarten in 2022 aus der Kartierung von Mauern für alle Dauerbeobachtungsflächen

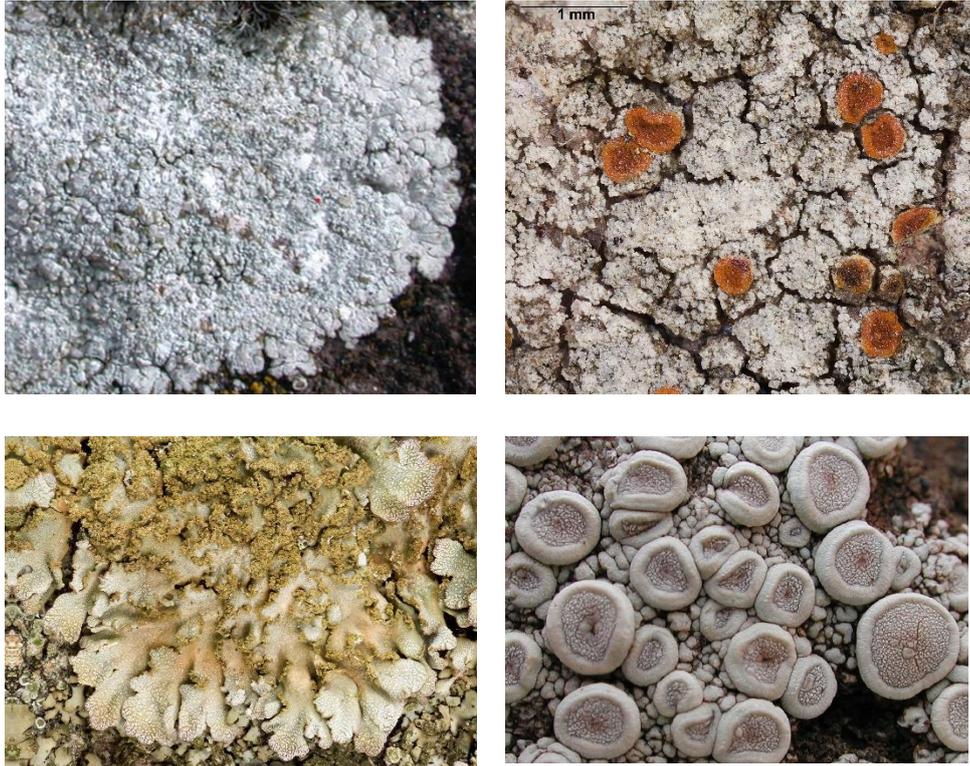


Abb. 85: Wärmezeiger auf Mauern in Hessen (**oben links**: Ziegel-Schönfleck (*Kuettlingeria teicholyta*) (Foto: Eichler/Cezanne), **oben rechts**: Bunter Schönfleck (*Kuettlingeria albolutescens*), **unten links**: Graue Raureifflechte (*Physconia grisea*), **unten rechts**: Stein-Cremeflechte (*Ochrolechia parella*). (übrige Fotos: Kirschbaum))

5.6 Empfehlungen für das Biomonitoring mit Flechten in Hessen

Das Biomonitoring der Luftgüte in Hessen blickt nunmehr auf eine Laufzeit von 30 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 kontinuierlich geändert. Neben der Dokumentation der Luftgüte können heute Aussagen zu den Wirkungen eutrophierender Luftschadstoffe und lokalklimatischer 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 weiterempfohlen.

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 fünfzehn 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 Auswertungsvariante „Klimawandelzeiger-Index“ (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, 2017 und 2022 vor. Diese Zeitreihe sollte weitergeführt werden.

Die zweite Variante der „Flechten-Diversitätswert der Klimawandelzeiger“ (FDW_{KWZ}) basiert auf der Flechtenkartierung im Flechtenaufnahmegitter. Es liegen für Hessen Daten seit Beginn des Projektes in 1992, also für die letzten 30 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 Aufnahmegitter fußt. Das hessische Flechten-Dauerbeobachtungsprojekt läuft kontinuierlich seit 1990 unter Beibehaltung der Flechten-Aufnahmefläche, die durch die Flächengröße und Positionierung des Gitters 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. Die Mauerflechten wurden seit 2007 nunmehr seit 15 Jahren erfasst. 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 Wiederholungs-Untersuchungen im Abstand von fünf Jahren empfohlen.

Um wissenschaftlich fundierte Umweltbeobachtungsprogramme wie das vorliegende dauerhaft fortsetzen zu können, bedarf es Spezialisten. Seit einigen Jahren kommunizieren Biologen und Naturschutzverbände eine „Erosion der Artenkenner“ für Pflanzen sowie diverse Tiergruppen (Frobel und Schlumprecht 2016). Die Flechten sind davon besonders betroffen, da unter den Artenspezialisten der Anteil der Flechtenkundigen vergleichsweise gering ist. Eine zielführende Nachwuchsförderung sichert auch zukünftig die Dokumentation von Umweltzuständen durch Flechten.

6 Literaturverzeichnis

- Aptroot, A. (2009): Lichens as an Indicator of Climate and Global Change. In: *Climate Change, Observed Impacts on Planet Earth*, S. 401–408.
- Aptroot, A.; Sparrius, L. (2009): Europese verspreiding en internationale betekenis van Nederlandse korstmossen. In: *Buxbaumiella* (83), S. 1–12.
- 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.
- Bahn, M.; Körner, C. (2003): Recent increases in summit flora caused by warming in the Alps. *Alpine biodiversity in Europe* 167, S. 437–441.
- Bairlein, F.; Hüppop, O. (2004): Migratory Fuelling and Global Climate Change. In: *Advances in Ecological Research* 35, S. 33–47.
- Barkman, J. J. (1958): Phytosociology and Ecology of Cryptogamic Epiphytes. Allgemeiner Teil. Assen, Netherlands: Van Gorcum & Comp. N.V.
- 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), S. 165–172.
- Biecker, S. (1986): Flechtenkartierung im Raum Wetzlar. unveröffentlichte Abschlussarbeit. Justus-Liebig-Universität Gießen.
- 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.
- Bruyn, U. de; 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.
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (2005): Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Status-Bericht der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene (384), S. 1–172.
- Cezanne, R.; Eichler, M.; Kirschbaum, U.; Windisch, U. (2008): Flechten als Anzeiger des Klimawandels. In: *Sauteria* 15, S. 159–174.
- Cezanne, R.; Eichler, M.; Teuber, D. (2023): Rote Liste der Flechten, flechtenbewohnenden und flechtenähnlichen Pilze Hessens. 2. Fassung. Wiesbaden: HLNUG. Online verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/shop/publikationen/naturschutz/rote-listen/HLNUG_RL_Flechten_web_230714.pdf, zuletzt geprüft am 23.07.2024.

Cezanne, R.; Teuber, D.; Eichler, M.; Brackel, W. von; Dornes, A. P.; Schultz, S. (2024): Ergänzungen zur Liste der Flechten und flechtenbewohnenden Pilze Hessens – 7. Folge. In: *Botanik und Naturschutz in Hessen* 36, S. 69–101. Online verfügbar unter https://bvn.de/bnh/#heft_36, zuletzt geprüft am 06.08.2024.

Dämmgen, U.; Erisman, J. W. (2002): Transmission und Deposition von Ammoniak und Ammonium. Hg. v. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. Darmstadt (KTBL-Schrift, 406).

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 2: Precipitation, potential sea salt, soil and fly ash constituents. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* (73), S. 330–339.

Ditas, F.; Rose, D.; Jacobi, S. (2021): Entwicklung der Stickstoffdioxidkonzentration in Hessen im Jahr 2020. Abschätzung der Auswirkungen der reduzierten Mobilität während der COVID-19-Pandemie mit Hilfe von statistischer Modellierung. Hg. v. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/sonstige_berichte/NO2_CoronaEffekt_2021.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.2024.

DWD - Deutscher Wetterdienst (Hg.) (2024): Zeitreihen und Trends. Temperaturanomalie in Hessen von 1881-2023. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html>, zuletzt geprüft am 17.07.2024.

Endlicher, W. (2012): Einführung in die Stadtökologie. Von der Stadtgeographie zur Stadtökologie. Stuttgart: UTB.

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), S. 164–167.

Franzen-Reuter, I. (2004): Untersuchungen zu den Auswirkungen atmosphärischer Stickstoffeinträge auf epiphytische Flechten und Moose im Hinblick auf die Bioindikation. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.

Frobel, K.; Schlumprecht, H. (2016): Erosion der Artenkenner. Ergebnisse einer Befragung und notwendige Reaktionen. In: *Naturschutz und Landschaftsplanung* 48 (4), S. 105–113.

Gebhardt, H. (1996): Ecological and economic consequences of introduction of exotic wildlife (birds and mammals) in Germany. In: *Wildlife Biology* 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: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 22, S. 7–19.

Hansen, H. (1986): Flechtenkartierung im Raum Gießen. unveröffentlichte Abschlussarbeit. Justus-Liebig-Universität Gießen.

Hauck, M. (2010): 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. Online verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/beobachteter_klimawandel.pdf, zuletzt geprüft am 17.07.2024.

HLNUG - Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2022): Lufthygienischer Jahresbericht 2021. Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/shop/publikationen/luft/Schriften_Luft_760.pdf, zuletzt geprüft am 17.07.2024.

HLNUG - Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2023): Lufthygienischer Jahresbericht 2022. Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/jahresberichte/2022/Lufthygienischer_Jahresbericht_2022.pdf, zuletzt geprüft am 17.07.2024.

HLNUG - Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (Hg.) (2024): Witterungsbericht für Hessen. Online verfügbar unter <https://klimaportal.hlnug.de/witterungsbericht>, zuletzt geprüft am 17.07.2024.

HLUG - Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2015): Lufthygienischer Jahresbericht 2014. Teil 1: Kontinuierliche Messungen. Wiesbaden. Online verfügbar unter <https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/jahresberichte/2014/LJB2014-1b.pdf>, zuletzt geprüft am 17.07.2024.

Insarov, G. (2002): A method for detecting large-scale environmental change with lichens. In: P.L. Scheidegger C. Nimis und P.A Wolseley (Hg.): *Monitoring with Lichens - Monitoring Lichens*. Dordrecht: Kluwer, S. 399–403.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Online verfügbar unter http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm, zuletzt geprüft am 24.07.2024.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2023): *Sechster Sachstandsbericht*. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/grundlagen-des-klimawandels/weltklimarat-ipcc/sechster-sachstandsbericht-des-weltklimarates-ipcc#undefined>, zuletzt geprüft am 24.07.2024.

Jäger, E. J. (1995): Klimabedingte Arealveränderungen von anthropochoren Pflanzen und Elementen der natürlichen Vegetation. In: *Angewandte Landschaftsökologie* 4, S. 51–57.

Kirschbaum, U. (2009): Flechtendauerbeobachtungsflächen Hessen 2007. Wiesbaden: Unveröffentlichter Bericht im Auftrag des HLUG.

Kirschbaum, U. (2016): Umweltbewertung mit Hilfe von Flechtenkartierungen in Wetzlar und Gießen. Vergleich zwischen den Erhebungen 1970, 1980, 1995, 2010 und 2015. Hg. v. HLNUG. Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/nachhaltigkeit/Bioindikation-Flechten/2016_Flechtenkartierungen_Giessen_und_Wetzlar.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.2024.

Kirschbaum, U.; Hanewald, K. (1998): Immissionsbezogene Flechtenkartierungen in hessischen Dauerbeobachtungsflächen. In: *Angewandte Botanik* 72, S. 212–227.

Kirschbaum, U.; Windisch, U. (1995): Beurteilung der lufthygienischen Situation Hessens mittels epiphytischer Flechten. Wiesbaden: Hessische Landesanstalt für Umwelt.

Kirschbaum, U.; Windisch, U.; Hanewald, K. (2010): Immissionsbezogene Flechtenkartierungen in Hessen von 1992 bis 2007. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 70 (4), S. 135–140.

Kirschbaum, U.; Wirth, V. (2010): Flechten erkennen - Umwelt bewerten. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie.

Kowarik, I. (2003): Biologische Invasionen - Neophyten und Neozoen in Mitteleuropa. Stuttgart: Ulmer.

LfU - Bayerisches Landesamt für Umwelt (2004): Ammoniak und Ammonium. Infobroschüre. Online verfügbar unter https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_6_ammoniak_ammonium.pdf.

LUBW-Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Ammoniak in der Umwelt. Messprogramme und Messergebnisse 2003-2007. 1. Auflage. Karlsruhe.

Rösemann, C.; Haenel, H.-D.; Dämmgen, U.; Döring, U.; Wulf S.; Eurich-Menden, B. et al. (2021): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 - 2019. Report on methods and data (RMD). Hg. v. Thünen-Institut für Agrarklimaschutz. Braunschweig.

Sänger, K. (1972): Flechtenwachstum und pH-Wert von Baumrinden. unveröffentlichte Abschlussarbeit. Justus-Liebig-Universität, Gießen.

Schmitz, U.; Stapper, N. J.; Stevens, M.; Wirooks, L.; Leisten, A. (2014): Klimafolgenmonitoring Landeshauptstadt Düsseldorf 2013. Untersuchungen der Auswirkungen des Klimawandels auf ausgewählte Gruppen der Tier- und Pflanzenwelt. Unveröffentlichtes 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. In: *Immissionsschutz* (3), S. 128–136.

UBA - Umweltbundesamt (2004): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs in Österreich. 2.1. Bd. 107, 02/2004. Wien.

UBA - Umweltbundesamt (2013): Landwirtschaftliche Emissionen. Teilbericht zum F&E-Vorhaben „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung - PAREST“ (Texte 39/2013).

UBA - Umweltbundesamt (2018): Überschreitung der Belastungsgrenzen für Eutrophierung. Online-Information zum Thema Eutrophierung in Land-Ökosystemen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/land-oekosysteme/ueberschreitung-der-belastungsgrenzen-fuer-0#textpart-1>, zuletzt geprüft am 17.07.2024.

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), S. 477–485.

van Dobben, H. F.; Bakker, A. J. de (1996): Re-mapping epiphytic lichen biodiversity in the Netherlands: effect of decreasing SO₂ and increasing NH₃. In: *Acta Botanica Neerlandica* 45 (1), S. 55–71.

van Herk, C. M. (1999): Mapping of ammonia pollution with epiphytic lichens in the Netherlands. In: *Lichenologist* 31 (1), S. 9–20.

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 13 (2023): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen mit Flechten (Bioindikation). Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für Luftgüte. Berlin: Beuth-Verlag.

VDI 3957 Blatt 17 (2008): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen (Bioindikation). Aktives Monitoring der Schwermetallbelastung mit Torfmoosen (Sphagnum-bag-technique). Berlin: Beuth-Verlag.

VDI 3957 Blatt 2 (2020): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Biomonitoring). Verfahren der standardisierten Graskultur. Berlin: Beuth-Verlag.

- VDI 3957 Blatt 20 (2017): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Umweltveränderungen (Biomonitoring). Kartierung von Flechten zur Ermittlung der Wirkung von lokalen Klimaveränderungen. Berlin: Beuth-Verlag.
- VDI 3957 Blatt 3 (2024): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation). Verfahren der standardisierten Exposition von Grünkohl. Berlin: Beuth-Verlag.
- VDI 3957 Blatt 8 (2015): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen (Biomonitoring). Flächenbestimmung epiphytischer Flechten und Moose zum Nachweis von Umweltveränderungen. Berlin: Beuth-Verlag (.).
- 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. Unveröff. Gutachten. Amt für Umwelt- und Verbraucherschutz der Stadt Aschaffenburg.
- 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.; Cezanne, R.; Eichler, M. (2014): Dauerbeobachtung von Flechten in Hessen 2012. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Online verfügbar unter http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/nachhaltigkeit/14-05-07_Abschlussbericht_DBF_2012_endversion.pdf.
- Windisch, U.; Eichler, M.; Cezanne, R. (2018): Dauerbeobachtung von Flechten in Hessen (Deutschland). Projekt-Abschlussbericht. Hg. v. HLNUG - Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/nachhaltigkeit/Bioindikation-Flechten/2017_Dauerbeobachtung_Flechten.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.2024.
- Windisch, U.; Menzel, M. (2013): Software zur Flächenberechnung von Epiphytenbeständen. In: *Herzogia* 2 (26), S. 423–427.
- Windisch, U.; Vorbeck, A. (2006): Nachweis von Klimaänderungen mit Flechten. Methodenentwicklung für das Land Hessen. Wiesbaden: Unveröff. Gutachten im Auftrag des HLUG.
- Windisch, U.; Vorbeck, A.; Eichler, M.; Cezanne, R. (2011): Untersuchung der Wirkung des Klimawandels auf biotische Systeme mittels Flechtenkartierung in Bayern. aktualisierte Version vom Januar 2012: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.).
- Wirth, V. (2010): Ökologische Zeigerwerte von Flechten - erweiterte und aktualisierte Fassung. In: *Herzogia* 23 (2), S. 229–248.

Wirth, V.; Hauck, M.; Schultz, M. (2013): Die Flechten Deutschlands. 1. Auflage. 2 Bände: Eugen Ulmer Verlag.

Wirth, V.; Kirschbaum, U. (2024): Die Flechten Mitteleuropas. Bestimmung und Beschreibung der wichtigsten Arten. 3., erweiterte Auflage. Wiebelsheim: Quelle und Meyer Verlag (Quelle und Meyer Bestimmungsbücher).

7 Anhang

Anhang 1: Gesamt-Artenliste Flechten der Teilprojekte Dauerbeobachtungsflächen (DBF Hessen) und Flechtenkartierung Wetzlar und Gießen

Anhang 2: Klima- und Stickstoffdepositionsdaten der Untersuchungsflächen

Anhang 1: Gesamt-Artenliste Flechten der Teilprojekte Dauerbeobachtungsflächen (DBF Hessen) und Flechtenkartierung Wetzlar und Gießen

Nr.	Taxon	RL Hessen	auf Bäumen	auf Mauern
1	<i>Acarospora fuscata</i> (Schrad.) Arnold	*		x
2	<i>Acarospora moenium</i> (Vain.) Räsänen	*		x
3	<i>Acarospora nitrophila</i> H.Magn.	*		x
4	<i>Acarospora privigna</i> (Ach.) A.Schneid.	*		x
5	<i>Acarospora subfuscescens</i> (Nyl.) H.Magn.	*		x
6	<i>Acarospora umbilicata</i> Bagl.	*		x
7	<i>Agonimia tristicula</i> (Nyl.) Zahlbr.	*	x	x
8	<i>Agonimia opuntiella</i> (Buschardt & Poelt) Vězda	*		x
9	<i>Alyxoria varia</i> (Pers.) Ertz & Tehler	*	x	x
10	<i>Amandinea punctata</i> (Hoffm.) Coppins & Scheid.	*	x	x
11	<i>Anisomeridium polypori</i> (Ellis & Everh.) M.E.Barr	*	x	
12	<i>Arthonia didyma</i> Körb.	*	x	
13	<i>Arthonia radiata</i> (Pers.) Ach.	*	x	
14	<i>Athallia cerinella</i> (Nyl.) Arup, Frödén & Söchting	*	x	
15	<i>Athallia cerinella/cerinelloides</i>		x	
16	<i>Athallia holocarpa</i> (Hoffm.) Arup, Frödén & Söchting	*	x	x
17	<i>Athallia pyracea</i> (Ach.) Arup, Frödén & Söchting	*	x	
18	<i>Bacidia fuscoviridis</i> (Anzi) Lettau	*		x
19	<i>Bacidina modesta</i> (Vain.) S.Ekman	*	x	
20	<i>Bacidina neosquamulosa</i> (Aptroot & Herk) S.Ekman	*	x	
21	<i>Bacidina spec.</i>	*		x
22	<i>Bagliettoa parmigerella</i> , cf. (Zahlbr.) Vězda & Poelt		x	
23	<i>Biatora globulosa</i> Fr.	3	x	
24	<i>Bilimbia sabuletorum</i> (Schreb.) Arnold	*		x
25	<i>Blennothallia crispa</i> (Huds.) Otálora, P.M.Jørg. & Wedin	*		x
26	<i>Botryolepraria lesdainii</i> (Hue) Canals et al.	*		x
27	<i>Bryoria fuscescens</i> (Gyelnik) Brodo & D.Hawksw.	2	x	
28	<i>Buellia aethalea</i> (Ach.) Th. Fr.	*		x
29	<i>Buellia griseovirens</i> (Turner & Borrer ex Sm.) Almb.	*	x	
30	<i>Calogaya arnoldii</i> ssp. <i>oblitterata</i> (Pers.) Arup, Frödén & Söchting	R	x	
31	<i>Calogaya decipiens</i> (Arnold) Arup, Frödén & Söchting	*		x
32	<i>Calogaya pusilla</i> (A. Massal.) Arup, Frödén & Söchting	*		x
33	<i>Calogaya saxicola</i> (Hoffm.) Vondrák	*		x
34	<i>Caloplaca chlorina</i> (Flot.) H.Olivier	*	x	x
35	<i>Caloplaca obscurella</i> (J.Lahm ex Körb.) Th.Fr.	*	x	
36	<i>Candelaria concolor</i> (Dicks.) Stein	*	x	
37	<i>Candelaria pacifica</i> M.Westb. & Arup.	*	x	
38	<i>Candelariella aurella</i> (Hoffm.) Zahlbr.	*	x	x
39	<i>Candelariella coralliza</i> (Nyl.) H.Magn.	*		x
40	<i>Candelariella medians</i> (Nyl.) A.L.Sm.	*		x
41	<i>Candelariella reflexa</i> s.l. (Nyl.) Lettau	*	x	x
42	<i>Candelariella reflexa</i> s.str. (Nyl.) Lettau	D	x	

Nr.	Taxon	RL Hessen	auf Bäumen	auf Mauern
43	<i>Candelariella vitellina</i> (Hoffm.) Müll. Arg.	*	x	x
44	<i>Candelariella xanthostigma</i> (Pers. ex Ach.) Lettau	*	x	
45	<i>Carbonea vitellinaria</i> (Nyl.) Hertel	*		x
46	<i>Catillaria chalybeia</i> (Borrer) A.Massal.	*		x
47	<i>Catillaria fungoides</i> Etayo & van den Boom	*	x	
48	<i>Catillaria nigroclavata</i> (Nyl.) J.Steiner	*	x	
49	<i>Chaenotheca furfuracea</i> (L.) Tibell	*	x	
50	<i>Chaenotheca trichialis</i> (Ach.) Th.Fr.	*	x	
51	<i>Circinaria caesiocinerea</i> (Nyl. ex Malbr.) A.Nordin, S.Savić & Tibell	*		x
52	<i>Circinaria calcarea</i> (L.) A.Nordin, S.Savić & Tibell	*		x
53	<i>Circinaria contorta</i> (Hoffm.) A.Nordin, S.Savić & Tibell	*		x
54	<i>Circinaria contorta</i> s.l. (Hoffm.) A.Nordin, S.Savić & Tibell	*		x
55	<i>Circinaria hoffmanniana</i> (S.Ekman & Fröberg ex R.Sant) A.Nordin	*		x
56	<i>Cladonia coniocraea</i> (Flörke) Spreng.	*	x	
57	<i>Cladonia fimbriata</i> (L.) Fr.	*	x	x
58	<i>Cladonia pyxidata</i> agg.			x
59	<i>Coenogonium pineti</i> (Schrad.) Lücking & Lumbsch	*	x	
60	<i>Diploicia canescens</i> (Dicks.) A.Massal.	V	x	
61	<i>Diploschistes scruposus</i> (Schreb.) Norman	*		x
62	<i>Diplotomma alboatrum</i> (Hoffm.) Flot.	*		x
63	<i>Diplotomma chlorophaeum</i> (Hepp ex Leight.) Kr.P.Singh & S.R.Singh	*	x	x
64	<i>Endocarpon adsurgens</i> Vain.	D		x
65	<i>Endocarpon pusillum</i> Hedw.	3		x
66	<i>Evernia prunastri</i> (L.) Ach.	*	x	
67	<i>Flavoparmelia caperata</i> (L.) Hale	*	x	
68	<i>Flavoparmelia soledians</i> (Nyl.) Hale	*	x	
69	<i>Flavoplaca arcis</i> (Poelt & Vězda) Arup, Frödén & Sørchting	*		x
70	<i>Flavoplaca citrina</i> (Hoffm.) Arup, Frödén & Sørchting	*		x
71	<i>Flavoplaca flavocitrina</i> (Nyl.) Arup, Frödén & Sørchting	*	x	x
72	<i>Flavoplaca limonia</i> (Nimis & Poelt) Arup, Frödén & Sørchting	*		x
73	<i>Flavoplaca oasis</i> (A.Massal.) Arup, Frödén & Sørchting	*	x	x
74	<i>Flavopunctelia flaventior</i> (Stirt.) Hale	*	x	
75	<i>Gyalecta carneola</i> (Ach.) Hellb.	1	x	
76	<i>Gyalecta fagicola</i> (Hepp) Kremp.	V	x	
77	<i>Gyalolechia flavovirescens</i> (Wulfen) Sørchting, Frödén & Arup	V		x
78	<i>Halecania viridescens</i> Coppins & P.James	*	x	
79	<i>Hyperphyscia adglutinata</i> (Flörke) H.Mayrhofer & Poelt	*	x	
80	<i>Hypocenomyce scalaris</i> (Ach. ex Lilj.) M.Choisy	*	x	
81	<i>Hypogymnia physodes</i> (L.) Nyl.	*	x	
82	<i>Hypogymnia tubulosa</i> (Schaer.) Hav.	*	x	
83	<i>Hypotrachyna afrorevoluta</i> (Krog & Swinscow) Krog & Swinscow	*	x	x
84	<i>Hypotrachyna revoluta</i> (Flörke) Hale	V	x	
85	<i>Kuettlingeria albolutescens</i> (Nyl.) I.V.Frolov, Vondrák & Arup	*		x

Nr.	Taxon	RL Hessen	auf Bäumen	auf Mauern
86	Kuettlingeria soralifera (Vondrák & Hrouzek) I.V.Frolov, Vondrák & Arup	*		x
87	Kuettlingeria teicholyta (Ach.) Trevis.	*		x
88	Kuettlingeria xerica (Poelt & Vězda) I.V.Frolov, Vondrák & Arup	R		x
89	Lathagrium fuscovirens (With.) Otálora, P.M.Jørg. & Wedin	*		x
90	Lecania cyrtella (Ach.) Th.Fr.	*	x	
91	Lecania erysibe (Ach.) Mudd	*		x
92	Lecania inundata (Hepp ex Körb.) M.Mayrhofer	*		x
93	Lecania naegeli (Hepp) Diederich & van den Boom	*	x	
94	Lecania rabenhorstii (Hepp) Arnold	*		x
95	Lecania sylvestris (Arnold) Arnold	*		x
96	Lecania turicensis (Hepp) Müll. Arg.	D		x
97	Lecanora allophana (Ach.) Nyl.	V	x	
98	Lecanora argentata (Ach.) Malme	*	x	
99	Lecanora barkmaniana Aptroot & Herk	*	x	
100	Lecanora campestris (Schaer.) Hue	*		x
101	Lecanora carpinea (L.) Vain.	*	x	
102	Lecanora chlarotera Nyl.	*	x	
103	Lecanora compallens Herk & Aptroot	*	x	
104	Lecanora conizaeoides Nyl. ex Cromb.	*	x	
105	Lecanora dispersella auct., non Steiner			x
106	Lecanora expallens Ach.	*	x	
107	Lecanora intumescens (Rebent.) Rabenh.	V	x	
108	Lecanora orosthea (Ach.) Ach.	*		x
109	Lecanora pannonica Szatala	G		x
110	Lecanora polytropa (Ehrh. ex Hoffm.) Rabenh.	*		x
111	Lecanora pulicaris (Pers.) Ach.	*	x	
112	Lecanora rupicola ssp. rupicola (L.) Zahlbr.	*		x
113	Lecanora saligna (Schrad.) Zahlbr.	*	x	
114	Lecanora sinuosa Herk & Aptroot	R	x	
115	Lecanora subcarpinea Szatala	*	x	
116	Lecanora sulphurea (Hoffm.) Ach.	*		x
117	Lecanora symmicta (Ach.) Ach.	*	x	
118	Lecanora varia (Hoffm.) Ach.	V	x	
119	Lecidea fuscoatra (L.) Ach.	*		x
120	Lecidea grisella Flörke	*		x
121	Lecidella carpathica Körb.	*		x
122	Lecidella elaeochroma (Ach.) M.Choisy	*	x	x
123	Lecidella flavosorediata (Vězda) Hertel & Leuckert	V	x	
124	Lecidella scabra (Taylor) Hertel & Leuckert	*		x
125	Lecidella stigmatea (Ach.) Hertel & Leuckert	*		x
126	Lepra albescens var. albescens (Huds.) Hafellner	V	x	x
127	Lepra amara (Ach.) Hafellner	*	x	
128	Lepraria finkii (B.de Lesd.) R.C.Harris	*	x	

Nr.	Taxon	RL Hessen	auf Bäumen	auf Mauern
129	<i>Lepraria incana</i> agg. (L.) Ach.	*	x	x
130	<i>Lepraria membranacea</i> (Dicks.) Vain.	*		x
131	<i>Lepraria vouauxii</i> (Hue) R.C.Harris	*	x	x
132	<i>Leproplaca chrysodeta</i> (Vain. ex Räsänen) J.R.Laundon	*		x
133	<i>Lobothallia radiosa</i> (Hoffm.) Hafellner	*		x
134	<i>Melanelixia fuliginosa</i> (Lamy) O.Blanco et al.	*		x
135	<i>Melanelixia glabratula</i> (Lamy) Sandler & Arup	*	x	
136	<i>Melanelixia subargentifera</i> (Nyl.) O.Blanco et al.	3	x	
137	<i>Melanelixia subaurifera</i> (Nyl.) O.Blanco et al.	*	x	
138	<i>Melanohalea elegantula</i> (Zahlbr.) O.Blanco et al.	*	x	
139	<i>Melanohalea exasperata</i> (De Not.) O.Blanco et al.	*	x	
140	<i>Melanohalea exasperatula</i> (Nyl.) O.Blanco et al.	*	x	
141	<i>Melanohalea laciniatula</i> (Flagey ex Oliv.) O.Blanco et al.	V	x	
142	<i>Monerolechia badia</i> (Fr.) Kalb	*		x
143	<i>Nephromopsis chlorophylla</i> (Willd.) Divakar, A.Crespo & Lumbsch	V	x	
144	<i>Ochrolechia androgyna</i> (Hoffm.) Arnold	V	x	
145	<i>Ochrolechia arborea</i> (Kreyer) Almb.	G	x	
146	<i>Ochrolechia parella</i> (L.) A.Massal.	3		x
147	<i>Ochrolechia turneri</i> (Sm.) Hasselrot	G	x	
148	<i>Parmelia ernstiae</i> Feuerer & A.Thell	*	x	
149	<i>Parmelia saxatilis</i> s.l.	D	x	x
150	<i>Parmelia serrana</i> A.Crespo, M.C.Molina & D.Hawksw.	*	x	
151	<i>Parmelia submontana</i> Nádv. ex Hale	G	x	
152	<i>Parmelia sulcata</i> Taylor	*	x	x
153	<i>Parmelina pastillifera</i> (Harm.) Hale	G	x	
154	<i>Parmelina quercina</i> (Willd.) Hale	1	x	
155	<i>Parmelina tiliacea</i> (Hoffm.) Hale	*	x	
156	<i>Parmeliopsis ambigua</i> (Wulfen) Nyl.	*	x	
157	<i>Parmotrema perlatum</i> (Huds.) M.Choisy	*	x	
158	<i>Peridiothelia fuligincta</i> (Norman) D.Hawksw.	D	x	
159	<i>Pertusaria coccodes</i> (Ach.) Nyl.	V	x	
160	<i>Pertusaria flavida</i> (DC.) J.R.Laundon	G	x	
161	<i>Pertusaria pertusa</i> var. <i>pertusa</i> (L.) Tuck	V	x	
162	<i>Phaeophyscia endophoenicea</i> (Harm.) Moberg	*	x	
163	<i>Phaeophyscia nigricans</i> (Flörke) Moberg	*	x	x
164	<i>Phaeophyscia orbicularis</i> (Necker) Moberg	*	x	x
165	<i>Phlyctis argena</i> (Spreng.) Flot.	*	x	x
166	<i>Physcia adscendens</i> H.Olivier	*	x	x
167	<i>Physcia aipolia</i> (Ehrh. ex Humb.) Fűrnr.	*	x	
168	<i>Physcia caesia</i> (Hoffm.) Fűrnr.	*	x	x
169	<i>Physcia dimidiata</i> (Arnold) Nyl.	3	x	
170	<i>Physcia dubia</i> (Hoffm.) Lettau	*	x	x
171	<i>Physcia stellaris</i> (L.) Nyl.	*	x	
172	<i>Physcia tenella</i> (Scop.) DC.	*	x	x

Nr.	Taxon	RL Hessen	auf Bäumen	auf Mauern
173	<i>Physciella chloantha</i> (Ach.) Essl.	*	x	
174	<i>Physconia distorta</i> (With.) J.R.Laundon	V	x	
175	<i>Physconia enteroxantha</i> (Nyl.) Poelt	V	x	
176	<i>Physconia grisea</i> (Lam.) Poelt	*	x	x
177	<i>Physconia perisidiosa</i> (Ericksen) Moberg	V	x	
178	<i>Piccolia ochrophora</i> (Nyl.) Hafellner	*	x	
179	<i>Placopyrenium fuscillum</i> (Turner) Gueidan & Cl.Roux	*		x
180	<i>Placynthium nigrum</i> (Huds.) Gray	*		x
181	<i>Platismatia glauca</i> (L.) W.L.Culb. & C.F.Culb.	*	x	
182	<i>Pleurosticta acetabulum</i> (Neck.) Elix & Lumbsch	*	x	
183	<i>Polycauliona candelaria</i> -Gr.	*	x	
184	<i>Polycauliona polycarpa</i> (Hoffm.) Frödén, Arup & Sjøchting	*	x	x
185	<i>Polyzozia albescens</i> (Hoffm.) S.Y.Kondr., Lőkös & Farkas	*		x
186	<i>Polyzozia antiqua</i> J.R. Laundon	*		x
187	<i>Polyzozia crenulata</i> (Hook.) S.Y.Kondr., Lőkös & Farkas	*		x
188	<i>Polyzozia dispersa</i> (Hook.) S.Y.Kondr., Lőkös & Farkas	*	x	x
189	<i>Polyzozia hagenii</i> (Hook.) S.Y.Kondr., Lőkös & Farkas	*	x	x
190	<i>Polyzozia persimilis</i> (Th.Fr.) S.Y.Kondr., Lőkös & Farkas	*	x	
191	<i>Polyzozia semipallida</i> (H.Magn.) S.Y.Kondr., Lőkös & Farkas	*		x
192	<i>Porpidia soledizodes</i> (Lamy ex Nyl.) J.R.Laundon	*		x
193	<i>Porpidia tuberculosa</i> (Sm.) Hertel & Knoph	*	x	
194	<i>Protoblastenia rupestris</i> (Scop.) J.Steiner	*		x
195	<i>Protoparmeliopsis muralis</i> (Schreb.) M.Choisy	*	x	x
196	<i>Pseudevernia furfuracea</i> (L.) Zopf	*	x	
197	<i>Pseudosagedia aenea</i> (Wallr.) Hafellner & Kalb	*	x	
198	<i>Pseudoschismatomma rufescens</i> (Pers.) Ertz & Tehler	*	x	
199	<i>Punctelia borreri</i> (Sm.) Krog	*	x	
200	<i>Punctelia jeckeri</i> (Roum.) Kalb	*	x	
201	<i>Punctelia subrudecta</i> (Nyl.) Krog	*	x	x
202	<i>Pyrenodesmia variabilis</i> (Pers.) A.Massal.	*		x
203	<i>Ramalina farinacea</i> (L.) Ach.	*	x	
204	<i>Ramalina fastigiata</i> (Pers.) Ach.	2	x	
205	<i>Ramalina fraxinea</i> (L.) Ach.	2	x	
206	<i>Rhizocarpon distinctum</i> Th.Fr.	*		x
207	<i>Rhizocarpon geographicum</i> ssp. <i>geographicum</i> (L.) DC.	*		x
208	<i>Rhizocarpon lecanorinum</i> Anders	*		x
209	<i>Rhizocarpon reductum</i> Th.Fr.	*		x
210	<i>Rinodina exigua</i> (Ach.) Gray	2	x	
211	<i>Rinodina gennarii</i> Bagl.	*		x
212	<i>Rinodina oleae</i> Bagl.	*	x	x
213	<i>Rinodina pityrea</i> Ropin & H.Mayrhofer	*	x	x
214	<i>Rinodina pyrina</i> (Ach.) Arnold	V	x	
215	<i>Rufoplaca subpallida</i> (H.Magn.) Arup, Sjøchting & Frödén	*		x
216	<i>Rusavskia elegans</i> (Link) S.Y.Kondr. & Kärnefelt	*	x	x

Nr.	Taxon	RL Hessen	auf Bäumen	auf Mauern
217	<i>Sarcogyne regularis</i> Körb.	*		x
218	<i>Scoliciosporum umbrinum</i> (Ach.) Arnold	*		x
219	<i>Scythioria phlogina</i> (Ach.) Flagey	*	x	
220	<i>Scytinium turgidum</i> (Ach.) Otálora, P.M.Jørg. & Wedin	G		x
221	<i>Staurothele frustulenta</i> Vain.	*		x
222	<i>Strangospora pinicola</i> (A.Massal.) Körber	*	x	
223	<i>Tephromela atra</i> var. <i>atra</i> (Huds.) Hafellner	*		x
224	<i>Toniniopsis aromatica</i> (Sm.) Kistenich, Timdal, Bendiksby & S.Ekman	V		x
225	<i>Trapelia glebulosa/involuta</i> (Sm.) J.R.Laundon/(Taylor) Hertel	*		x
226	<i>Trapelia placodioides</i> Coppins & P.James	*		x
227	<i>Usnea dasopoga</i> (Ach.) Nyl.	3	x	
228	<i>Usnea hirta</i> (L.) Weber ex F.H.Wigg.	V	x	
229	<i>Varicellaria hemisphaerica</i> (Flörke) I.Schmitt & Lumbsch	V	x	
230	<i>Variospora dolomiticola</i> (Hue) Arup, Søchting & Frödén	*		x
231	<i>Variospora flavescens</i> (Huds.) Arup, Frödén & Søchting	*		x
232	<i>Verrucaria elaeina</i> Borrer	*		x
233	<i>Verrucaria macrostoma</i> Dufour ex DC.	*		x
234	<i>Verrucaria muralis</i> Ach.	*		x
235	<i>Verrucaria nigrescens</i> Pers.	*		x
236	<i>Verrucaria tectorum</i> (A.Massal.) Körb.	*		x
237	<i>Verrucaria viridula</i> (Schrad.) Ach.	*		x
238	<i>Xanthocarpia crenulatella</i> (Nyl.) Frödén, Arup & Søchting	*		x
239	<i>Xanthomendoza fulva</i> (Hoffm.) Søchting, Kärnefelt & S.Y.Kondr.	2	x	x
240	<i>Xanthomendoza huculica</i> (S.Y.Kondr.) Diederich	3	x	
241	<i>Xanthomendoza oregana</i> (Gyeln.) Søchting, Kärnefelt & S.Y.Kondr.	R	x	
242	<i>Xanthoparmelia conspersa</i> (Ehrh. ex Ach.) Hale	*		x
243	<i>Xanthoparmelia pulla</i> (Ach.) O.Blanco et al.	*		x
244	<i>Xanthoparmelia verruculifera</i> (Nyl.) O.Blanco et al.	*		x
245	<i>Xanthoria calcicola</i> Oxner	*		x
246	<i>Xanthoria parietina</i> (L.) Th.Fr.	*	x	x
247	<i>Xylopsora caradocensis</i> (Nyl.) Bendiksby & Timdal	*	x	

Anhang 2: Klimadaten der Untersuchungsflächen

	JT30	JT10	FT30	ST30	HT30	WT30	JN30	JN10	FN30	SN30	HN30	WN30	Konti
Diemelstadt	8,5	8,5	7,5	16,5	8,5	0,5	750	750	162,5	212,5	187,5	187,5	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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)