



Dauerbeobachtung von Flechten in Hessen 2012



Wärmeliebende Flechtenarten in Hessen: Ziegel-Schönfleck (links) und Gefleckte Punktflechte (rechts); Fotos: Kirschbaum

Dauerbeobachtung von Flechten in Hessen 2012

Auftraggeber



Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Dez. I 1 – Luftreinhaltung, Kataster, Planungen,
Abfall

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

Bearbeitung



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

Kartierung

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

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

Dr. Ute Windisch

Hüttenberg, den 15.12.2013

Glossar

DBF	Dauerbeobachtungsfläche; In Hessen sind sieben DBF eingerichtet, an denen in einem regelmäßigen Turnus Flechtenkartierungen durchgeführt werden.
Eutrophierungszeiger	Flechtenarten, die eine übermäßige Nährstoffversorgung tolerieren.
FDW	Flechten-Diversitätswert; wird ermittelt aus der Anzahl der Flechtenarten und ihrer Häufigkeit
FDW _{Eu}	Flechten-Diversitätswert der Eutrophierungszeiger; wird ermittelt aus der Anzahl der Eutrophierung tolerierenden Flechtenarten und ihrer Häufigkeit
FDW _{KWZ}	Flechten-Diversitätswert der Klimawandelzeiger; wird ermittelt aus der Anzahl der klimawandelzeigenden Flechtenarten und ihrer Häufigkeit
FDW _{Ref}	Flechten-Diversitätswert der Referenzarten; wird ermittelt aus der Anzahl der immissionsempfindlichen Flechtenarten und ihrer Häufigkeit
FDW _{WZ}	Flechten-Diversitätswert der Wärmezeiger; wird ermittelt aus der Anzahl der wärmeliebenden Flechtenarten und ihrer Häufigkeit
Flechte	Lebensgemeinschaft aus einem Pilz und einem Photosynthese betreibenden Partner (Alge oder Cyanobakterium)
„Klimabäume“	Freistehende Laubbäume, die hinsichtlich des Baumumfangs, der Baumart, etc. nicht standardisiert sind.
KWZ	Klimawandelzeiger; Flechtenarten, die als Klimawandelzeiger geeignet sind; Einstufung nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 20
LGI	Luftgüteindex; Ergebnis der Luftgütekartierung; erlaubt Aussagen zur Luftgüte und zum Einfluss eutrophierender Verbindungen
Referenzarten	Flechtenarten, die aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber Luftschadstoffen als Indikatoren der Luftgüte dienen.
UF	Untersuchungsfläche; aufgrund der Fragestellung zusätzlich zu den DBF eingerichtete Flächen (Flughafen, Rheingau, Odenwald)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
„VDI-Bäume“	standardisierte Trägerbäume nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13
WZ	Wärmezeiger; Flechtenarten mit einer Temperaturzahl von 7-9

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	13
2	Einleitung und Projektziele	15
3	Klimawandel	16
	3.1 Folgen des Klimawandels.....	16
	3.2 Auswirkungen des Klimawandels auf die Biodiversität.....	17
	3.3 Biomonitoring des Klimawandels mit Flechten	18
4	Methoden	20
	4.1 Datenbestand Dauerbeobachtung von Flechten in Hessen.....	20
	4.2 Messnetz	21
	4.3 Dokumentation der Standort- und Flechtendaten	23
	4.4 Klima- und Depositionsdaten	24
	4.5 Luftgüteuntersuchung	28
	4.5.1 Flechtenkartierung nach VDI 3957 Blatt 13	28
	4.5.2 Folienvverfahren nach VDI 3957 Blatt 8.....	33
	4.6 Klimawandel-Biomonitoring	35
	4.6.1 Erfassung der Flechten auf „Klimabäumen“	35
	4.6.2 Erfassung der Flechten auf Mauern	36
	4.7 Klima-Biomonitoring-relevante Flechten-Indizes.....	37
	4.7.1 Auswertung der Wärmezeiger (WZ).....	38
	4.7.2 Auswertung der Klimawandelzeiger (KWZ)	40
5	Ergebnisse und Diskussion	44
	5.1 Untersuchte Trägerbäume und Mauern	44
	5.2 Arten	47
	5.3 Luftgüteuntersuchung	47
	5.3.1 Flechtenkartierung nach VDI 3957 Blatt 13	47
	5.3.2 Folienvverfahren nach VDI 3957 Blatt 8.....	65
	5.4 Biomonitoring des Klimawandels	71
	5.4.1 Häufigkeit der Wärmezeiger (WZ)	71
	5.4.2 Häufigkeit der Klimawandelzeiger (KWZ).....	76
	5.4.3 Zusammenhänge zwischen Flechten- und Klimadaten	82
	5.4.4 Empfehlungen für das Klimawandel-Biomonitoring mit Flechten in Hessen ...	86
6	Literatur	90
	Anhang	94

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Lage der Flechten-Dauerbeobachtungsflächen (gelb) und der zusätzlichen Untersuchungsflächen (orange) in Hessen.....	21
Abb. 2: Messnetz einer Dauerbeobachtungsfläche (Beispiel der DBF „Spessart“)	22
Abb. 3: Feldrechner Fieldbook.....	23
Abb. 4: Luftbildausschnitt mit kartierten Bäumen und Mauern an der DBF Melsungen. (Darstellung auf Grundlage von Daten des HLUG, ergänzt).....	24
Abb. 5: Lage der Flechten-Untersuchungsflächen in räumlichem Bezug zu Messstationen des Deutschen Wetterdienstes	25
Abb. 6: Zuordnung von Klimadaten zu einer DBF am Beispiel der DBF Gießen und der Jahressumme des Niederschlags 2001-2010 als 10-Jahresmittel (Datenquelle: DWD, verändert)	26
Abb. 7: Kontinentalitätskarte von Hessen (DEUTSCHER WETTERDIENST) und Darstellung der Lage der Untersuchungsflächen.....	27
Abb. 8: Flechtenaufnahmegitter am Baum (nach VDI 3957 Blatt 13, Anhang A).....	30
Abb. 9: Bewertungsmatrix zur Ermittlung des Luftgüteindex anhand der Kombination der Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger und der übrigen Arten (Datenerhebung nach VDI-Richtlinie 3579 Blatt 13, Anhang A)	32
Abb. 10: Erläuterung der Bewertungsmatrix nach VDI-Richtlinie 3579 Blatt 13.....	32
Abb. 11: Beispiel einer verkleinerten, gescannten Folie (Flechtenerfassung an einem Baum der DBF Gießen).....	34
Abb. 12: Ansicht der Benutzeroberfläche von ‚LiMo-Analyse‘ während der Flächenauswertung.....	34
Abb. 13: Untersuchung einer Natursteinmauer auf Flechten.....	36
Abb. 14: Schema der Selektion von Klimawandelzeigern nach Zeigerwerten.....	41
Abb. 15: Baumartenspektrum der Luftgüteuntersuchung 2012	44
Abb. 16: Entwicklung des Anteils häufig untersuchter Baumarten der Luftgüteuntersuchung....	45
Abb. 17: Spektrum der untersuchten Baumaterialien der Mauern.....	47
Abb. 18: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2012 an der DBF Diemelstadt..	48
Abb. 19: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2012 an der DBF Diemelstadt	49
Abb. 20: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2012 an der DBF Melsungen ...	50
Abb. 21: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2012 an der DBF Melsungen.....	51
Abb. 22: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2012 an der DBF Rhön	52

Abb. 23: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2012 an der DBF Rhön.....	53
Abb. 24: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2012 an der DBF Gießen	54
Abb. 25: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2012 an der DBF Gießen	55
Abb. 26: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2012 an der DBF Limburg	56
Abb. 27: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2012 an der DBF Limburg.....	57
Abb. 28: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2012 an der DBF Spessart.....	58
Abb. 29: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2012 an der DBF Spessart	59
Abb. 30: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2012 an der DBF Flughafen (1997, 2002: keine Daten).....	60
Abb. 31: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2012 an der Untersuchungsfläche Flughafen	61
Abb. 32: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2012 an der DBF Biebesheim ..	62
Abb. 33: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2012 an der DBF Biebesheim.....	63
Abb. 34: Zeitlicher Verlauf der Flechten-Diversitätswerte (FDW) der Referenzarten und Eutrophierungszeiger für alle DBF (ohne Rhön und Flughafen, da diese nicht durchgehend untersucht worden waren)	64
Abb. 35: Flechten-Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger im Jahr 2012	65
Abb. 36: Entwicklung des Deckungsgrades von <i>Phaeophyscia orbicularis</i> aus Folienaufnahmen von jeweils drei ausgewählten Bäumen pro Dauerbeobachtungsfläche	66
Abb. 37: Entwicklung des Deckungsgrades von <i>Xanthoria parietina</i> aus Folienaufnahmen von jeweils drei ausgewählten Bäumen	67
Abb. 38: Wand-Gelbflechte (<i>Xanthoria parietina</i>), ein Anzeiger für Eutrophierung.....	68
Abb. 39: Entwicklung des Deckungsgrades von <i>Hypogymnia physodes</i> aus Folienaufnahmen von jeweils drei ausgewählten Bäumen	69
Abb. 40: Entwicklung des Deckungsgrades von <i>Parmelia sulcata</i> aus Folienaufnahmen von jeweils drei ausgewählten Bäumen	69
Abb. 41 Furchen-Schüsselflechte (<i>Parmelia sulcata</i>), eine euryöke Referenzart	70
Abb. 42: Mittlere Häufigkeit der Wärmezeiger (FDW _{wz}) in 2012 aus der Kartierung im Messgitter standardisierter Trägerbäume („VDI-Bäume“) für alle DBF.....	71
Abb. 43: Entwicklung der mittleren Häufigkeit der Wärmezeiger (FDW _{wz}) von 1992-2012 im Messgitter standardisierter Trägerbäume; die Untersuchungsfläche Flughafen wurde 1992 (Wert: 0,01), 2007 und 2012 kartiert; die DBF Rhön wurde 1997 nicht untersucht	72
Abb. 44: Entwicklung der mittleren Häufigkeit der Wärmezeiger von 2007-2012 an jeweils 20 nicht standardisierten Trägerbäumen; für die Untersuchungsfläche Flughafen liegen nur für 2012 Daten vor	73

Abb. 45: Entwicklung der mittleren Häufigkeit der Wärmezeiger von 2007-2012 an jeweils 30 Mauerabschnitten; für die Untersuchungsfläche Flughafen liegen nur für 2012 Daten vor	74
Abb. 46: Mittlere Häufigkeit der Wärmezeigerarten in 2012 aus der Kartierung von Mauern für alle DBF	75
Abb. 47: Ziegel-Schönfleck (<i>Caloplaca teicholyta</i>), ein Wärmezeiger auf Mauern (Foto: Kirschbaum).....	75
Abb. 48: Entwicklung der mittleren Häufigkeit der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}) von 1992-2012 im Messgitter standardisierter Trägerbäume; die Untersuchungsfläche Flughafen wurde 1992 (Wert: 0,01), 2007 und 2012 kartiert; die DBF Rhön wurde 1997 nicht untersucht	77
Abb. 49: Karte der mittleren Häufigkeit der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}) aus der Kartierung im Messgitter standardisierter Trägerbäume („VDI-Bäume“)	78
Abb. 50: Mittlere Häufigkeit der Klimawandelzeigerarten (FDW_{KWZ}) in 2012 aus der Kartierung im Messgitter standardisierter Trägerbäume („VDI-Bäume“) für alle DBF	79
Abb. 51: Gefleckte Punktflechte (<i>Punctelia subrudecta</i>), ein Klimawandelzeiger in Hessen (Foto: Kirschbaum)	79
Abb. 52: Caperatflechte (<i>Flavoparmelia caperata</i>), ein Klimawandelzeiger in Hessen (Foto: Kirschbaum).....	80
Abb. 53: Mittlere Häufigkeit der Klimawandelzeiger in 2012 aus der Kartierung nicht standardisierter Trägerbäume („Klimabäume“) für alle DBF.....	81
Abb. 54: Entwicklung des Klimawandelindex (KWI) von 2007-2012 an jeweils 20 nicht standardisierten Trägerbäumen; für die Untersuchungsfläche Flughafen liegen nur für 2012 Daten vor	82
Abb. 55: Zusammenhang zwischen Flechtendaten und Klima- bzw. N-Depositionsdaten (Maßkorrelationskoeffizient r)	85
Abb. 56: Vergleich der zeitliche Entwicklung der vorgeschlagenen Indikatoren; links: Teilindikator a) FDW_{WZ} , rechts: Teilindikator b) FDW_{KWZ}	87

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Monitoringprogramm der Flechten-Dauerbeobachtung	20
Tab. 2: Anzahl untersuchter Flächen der Luftgütekartierung zwischen 1992 und 2012, inklusive Flughafen.....	23
Tab. 3: Zur statistischen Analyse herangezogene Klimadaten (Datenquelle: DWD).....	26
Tab. 4: Baumartengruppe nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13, mit zulässigem Baumumfang	29
Tab. 5: Liste der Eutrophierungszeiger nach VDI-RICHTLINIE 3957 Blatt 13, Stand: 2005.....	31
Tab. 6: Wärmezeigerarten, die auf Rinde und Gestein siedeln.....	38
Tab. 7: Liste der Klimawandelzeiger nach (VDI 3957 Blatt 20 Stand: 2013).....	42
Tab. 8: Baumartenspektrum der Klimabäume in 2012	46
Tab. 9: Auswahl von Trägerbäumen zur Darstellung der Ergebnisse des Folienverfahrens	66

1 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht informiert über die Fortführung der Flechten-Dauerbeobachtung in Hessen. Das Biomonitoring-Programm des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie besteht seit nunmehr 20 Jahren. Seit dem Jahr 1992 werden im fünfjährigen Turnus ausgewählte Trägerbäume von sieben Dauerbeobachtungsflächen (seit 2007 drei weitere Gebiete) auf ihren Flechtenbewuchs überprüft. Die Daten erlauben Rückschlüsse über die Umweltqualität. Standen zu Beginn der Untersuchungen die Wirkungen von sauren Luftverunreinigungen im Vordergrund, so haben sich die Anforderungen an die Aussagen der Flechtenkartierung bis heute kontinuierlich geändert. Neben der Dokumentation der Luftgüte können Aussagen zu den Wirkungen eutrophierender Luftschadstoffe und klimatischer Veränderungen getroffen werden.

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

Als Ergebnis der Luftgütekartierung wurde für jede Untersuchungsfläche eine Karte erstellt und die zeitliche Entwicklung der Luftgüte erläutert. An allen Dauerbeobachtungsflächen (außer Gießen) hat sich die lufthygienische Situation in den letzten fünf Jahren verbessert. Damit setzt sich ein Trend fort, der seit 1992 anhält. Da der Luftgüteindex, neben eutrophierenden, insbesondere auch die Wirkungen saurer Luftverunreinigungen widerspiegelt, ist die positive Entwicklung nachvollziehbar, denn die Konzentrationen der säurebildenden Immissionen sind in Hessen weiter rückläufig. Parallel zu diesem günstigen Trend verläuft landesweit ein Wandel im Flechtenartenspektrum, der die genannte positive Entwicklung in Zukunft umkehren könnte: Arten, die durch einen übermäßigen Nährstoffeintrag gefördert werden, nehmen kontinuierlich zu. Im landesweiten Mittel sind Eutrophierungszeiger seit 2007 häufiger anzutreffen als die übrigen Flechtenarten. In den letzten fünf Jahren hat sich die Begünstigung der Eutrophierungszeiger noch weiter verstärkt. Die Ergebnisse des Folienverfahrens unterstützen die Aussagen der Kartierung und liefern weitere Daten zur Flächendeckung der Arten.

Das Klimawandel-Biomonitoring umfasste die Kartierung von Flechten an Bäumen und Mauern; die Artenzahl der gesamten Untersuchung beläuft sich auf 223 Flechtenarten und 29 Spezies der flechtenbewohnenden Pilze. Die Daten wurden nach zwei Varianten ausgewertet: Es wurden Diversitätswerte von wärmeliebenden Flechtenarten den Diversitätswerten von klimawandelzeigenden Flechtenarten gegenübergestellt. Bei den Korrelationsberechnungen der Flechtendaten mit Klimaparametern zeigt sich unter anderem, dass deutliche Zusammenhänge zwischen langjährigen Mitteltemperaturen des DWD und der Häufigkeit von Wärmezeigern bestehen. Die Daten von Bäumen und Mauern wurden vergleichend bewertet.

Zum jetzigen Zeitpunkt ist insbesondere die Auswertung der langfristigen Daten aus der Luftgütekartierung Hessens aussagekräftig: Von 1992 bis 2002 wurden in den kartierten Messgitterflächen nur selten Wärme- oder Klimawandelzeiger gefunden. Im Untersuchungsjahr 2007 zeigte sich ein leichter, aber noch nicht eindeutiger Anstieg dieser Arten. Erst in der aktuellen Arbeit von 2012 wurden deutlich mehr Wärmezeiger und Klimawandelzeiger erfasst. Dabei ist ein räumliches Muster zu erkennen. Während in den nordhessischen Untersuchungsflächen Diemeltadt und Melsungen Wärme- und Klimawandelzeiger bis heute noch mit geringer Häufigkeit in den Messgitterflächen anzutreffen sind, ist in der südlichen Landeshälfte innerhalb von fünf Jahren ein Wandel eingetreten. Die Häufigkeit der Klimawandelzeiger hat sich dort an allen untersuchten Flächen erhöht. Besonders interessant ist hier das Gebiet um den Flughafen, das schon 2007 deutlich mehr dieser Zeigerarten trug und sich bis 2012 noch weiter gesteigert hat. Der Flughafen gehört mit Biebesheim zu den wärmsten und niederschlagsärmsten der untersuchten Gebiete in Hessen. Die vorliegenden Befunde legen sichtbare Wirkungen des Klimawandels auf Flechten im Sinne der Verschiebung des Artenspektrums nahe.

Es wurde eine Empfehlung für die nächste Erfassung gegeben und ein Vorschlag zur Verwendung der Flechten als landesweite Umweltindikatoren unterbreitet.

2 Einleitung und Projektziele

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

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

Die Fortführung der „Flechten-Dauerbeobachtung 2012“ wird in der vorliegenden Arbeit präsentiert. Folgende Ziele sollten erreicht werden:

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

3 Klimawandel

3.1 Folgen des Klimawandels

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

- Anstieg der durchschnittlichen Temperaturen:
Von 1880-2012 stieg die globale Mitteltemperatur in Bodennähe um 0,85 °C an, mit weiter steigender Tendenz. In Europa schreitet die Erwärmung rascher voran als auf anderen Kontinenten. Dabei wird seit 1950 ein Anstieg der Zahl der warmen Tage und Nächte verzeichnet, während die Anzahl der kalten Tage und Nächte sinkt.
- 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, vor allem im Winterhalbjahr (Oktober bis März). Es wird erwartet, dass in Zentraleuropa mit dem erhöhten Niederschlagsaufkommen die Luftfeuchtigkeit ansteigt. Global betrachtet ist der Anstieg des durchschnittlichen atmosphärischen Wasserdampfgehaltes über dem Land und den Ozeanen als auch in der oberen Troposphäre seit den 1980er Jahren belegt. Für das Sommerhalbjahr werden in Zentraleuropa nur kleine Änderungen der Niederschlagsmenge erwartet.
- Anstieg des Meeresspiegels durch das globale Abschmelzen der Schnee- und Eismassen und die Ausdehnung des Wassers.

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

Für das Landesgebiet von Hessen wird der beobachtete Klimawandel in einer Informationsbrochure des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie folgendermaßen zusammengefasst (HLUG 2013a):

„In Hessen hat die mittlere Jahrestemperatur seit Anfang des 20. Jahrhunderts um 0,8 °C zugenommen, am stärksten 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. Der Niederschlag zeigt sehr große Schwankungen von Jahr zu Jahr und auch auf längeren Zeitskalen. Im Jahresmittel hat der

Niederschlag in Hessen seit dem Anfang des 20. Jahrhunderts zugenommen. Diese Zunahme fand vor allem in den Wintermonaten statt. In den Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst nahm der Niederschlag nur minimal zu, und im Sommer ist die Niederschlagsmenge fast konstant geblieben. Betrachtet man lediglich den Zeitraum seit ca. 1960, so zeigt sich im Sommer ein Niederschlagsrückgang, der jedoch darauf zurückzuführen ist, dass die Dekaden in der Mitte des letzten Jahrhunderts besonders feucht waren. Für Extremereignisse wie Starkniederschlag, starke Winterstürme oder sommerliche Dürreperioden lässt sich derzeit zwar noch kein gesicherter statistischer Trend nachweisen, grundlegende physikalische Überlegungen legen jedoch nahe, dass der Klimawandel zu einer Zunahme solcher Ereignisse führen sollte.“

3.2 Auswirkungen des Klimawandels auf die Biodiversität

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

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

Bei einer Temperaturerhöhung um 1 °C wird eine Verschiebung der Vegetationszonen um etwa 200-300 km polarwärts beziehungsweise um bis zu 200 Höhenmeter angenommen (IPCC - 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, EEA 2004, WALTHER ET AL. 2005, GEBHARDT ET AL. 2010).

3.3 Biomonitoring des Klimawandels mit Flechten

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

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

Das Biomonitoring mit Flechten hat eine lange Tradition. In zahllosen Arbeiten wurden sie erfolgreich als Indikatoren für die Wirkungen von Luftverunreinigungen eingesetzt. Ein langjähriges Monitoringprogramm existiert in Hessen (KIRSCHBAUM UND HANEWALD 1998B). Anfang dieses Jahrhunderts beschäftigten sich die ersten Studien mit den Effekten des Klimawandels auf Flechten (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. 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 (SÖCHTING 2004), Niedersachsen (DE BRUYN ET AL. 2009), Nordrhein-Westfalen (SCHMITZ ET AL. 2014) und Bayern (VORBECK ET AL. 2009, WINDISCH ET AL. 2011). 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 ET AL. 2010).

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

Obwohl bekannt ist, dass Flechten für die Bioindikation von Klimawirkungen geeignet sind, existieren noch keine standardisierten Methoden und langfristigen Konzepte für Untersuchungsprogramme. Um diese Lücke zu schließen, entwickelt der VDI-Arbeitskreis „Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Umweltveränderungen (Bioindikation)“ derzeit eine Richtlinie zur Ermittlung der Wirkung von lokalen Klimaänderungen (VDI 3957 Blatt 20 Stand: 2013). Es soll insbesondere erarbeitet werden, wie die langfristige Entwicklung von Klimawirkungen auf Flechten dargestellt werden kann.

4 Methoden

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

In der vorliegenden Arbeit sollen zusätzlich die Wirkungen des Klimawandels auf Flechtenbiota untersucht werden. Daher müssen neue Wege beschritten werden, weil möglicherweise sich neu ausbreitende Arten auf der kleinen standardisierten Erfassungsfläche des Messgitters mit der bisherigen Methode nicht erfasst werden können. Zielführend ist hier vielmehr eine Methode, bei der auf großen Flächen auf möglichst vielen Bäumen und Mauern nach klimaanzeigenden Flechtenarten gesucht wird. Daher werden insgesamt drei Substrate untersucht, die im Folgenden näher beschrieben werden sollen. Da die verschiedenen Aufnahmeflächen innerhalb der Messfläche unter vergleichbaren Klima- und Immissionsbedingungen stehen, eröffnet sich auch der methodische Vergleich der Substrate.

4.1 Datenbestand Dauerbeobachtung von Flechten in Hessen

Nach der ersten landesweit flächendeckenden Kartierung von 1992 wurden Flechten-Dauerbeobachtungsflächen (DBF) festgelegt und bis 2012 wiederholt untersucht (Tabelle 1).

Tab. 1: Monitoringprogramm der Flechten-Dauerbeobachtung

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

Ort	Typ	Gauß-Krüger-Koordinaten	Höhe (m ü. NN)	Flechtenerfassung im Untersuchungsjahr				
				1992	1997	2002	2007	2012
Diemelstadt	DBF	34990/57020	250-350	Lu	Lu, Fo	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl
Melsungen	DBF	35410/56560	150-350	Lu	Lu, Fo	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl
Rhön	DBF	35670/56000	500-800	Lu	-	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl
Gießen	DBF	34810/56000	150-250	Lu	Lu, Fo	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl
Limburg	DBF	34450/55840	200-300	Lu	Lu, Fo	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl
Spessart	DBF	35390/55700	220-400	Lu	Lu, Fo	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl
Biebesheim	DBF	34630/55200	80-100	Lu	Lu, Fo	Lu, Fo	Lu, Fo, Kl	Lu, Fo, Kl
Flughafen	UF	34690/55440	100-120	Lu	-	-	Lu, Kl	Lu, Kl
Rheingau	UF	34145/55466	100	-	-	-	Kl	Kl
Odenwald	UF	35058/55019	520	-	-	-	Kl	Kl

Dabei sind es sechs DBF, die seit 1992 lückenlos kartiert wurden. Die DBF „Rhön“ wurde 2002 in das Programm des HLUG aufgenommen. In den Jahren 2007 und 2012 wurde die Untersuchung einer Fläche am Frankfurter Flughafen von „Gemeinnützige Umwelthaus GmbH, Kelsterbach“ beauftragt, die Ergebnisse fließen in den vorliegenden Bericht ein. Die Untersuchungsflächen „Rheingau“, „Odenwald“ und „Flughafen“ wurden seit 2007 zusätzlich, jedoch in einem geringeren Umfang als die DBF, im Rahmen des Klimawandel-Biomonitorings untersucht. Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen wurden von KIRSCHBAUM veröffentlicht (KIRSCHBAUM & WINDISCH 1995, KIRSCHBAUM & HANEWALD 1998A, 1998B, 2001, KIRSCHBAUM 2009, KIRSCHBAUM ET AL. 2010).

4.2 Messnetz

Die sieben Dauerbeobachtungsflächen (DBF) des HLUG sind im ländlichen Raum positioniert (Abb. 1).

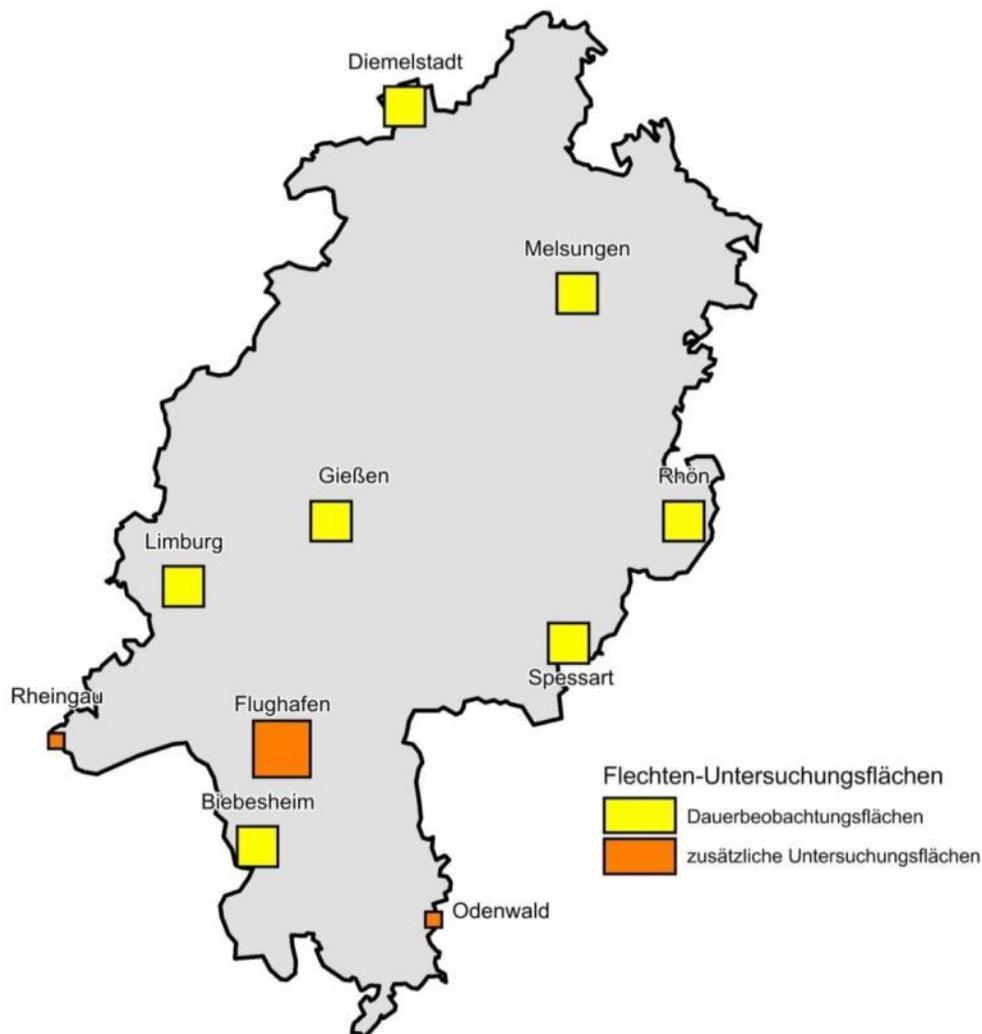


Abb. 1: Lage der Flechten-Dauerbeobachtungsflächen (gelb) und der zusätzlichen Untersuchungsflächen (orange) in Hessen

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

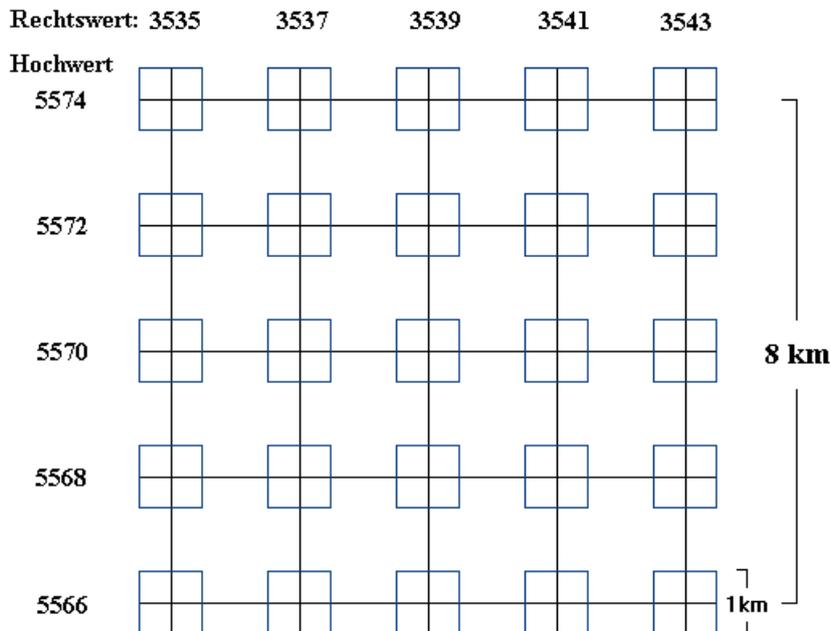


Abb. 2: Messnetz einer Dauerbeobachtungsfläche (Beispiel der DBF „Spessart“)

Die Anzahl der insgesamt untersuchten Messflächen für die Luftgütekartierung ist nicht konstant (Tab. 2). Durch das Hinzukommen der Untersuchungsfläche am Flughafen in 2007 erhöhte sie sich beispielsweise. Gelegentlich kam es vor, dass Messflächen, die früher wegen Mangels an geeigneten Bäumen nicht als Messflächen in Betracht kamen, durch Heranwachsen junger Bäume neu eingerichtet werden konnten. Ebenso fielen Messflächen aus, weil die Bäume gerodet oder nicht mehr geeignet waren. Als Folge ist eine gewisse Fluktuation der Anzahl von Messflächen in den DBF zu verzeichnen.

Die Flechtendaten wurden im Gelände in einen Aufnahmebogen eingetragen und anschließend in eine MS Access-Datenbank überführt. Die Aufnahmebögen finden sich im Anhang 1-3.

Tab. 2: Anzahl untersuchter Flächen der Luftgütekartierung zwischen 1992 und 2012, inklusive Flughafen

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

4.3 Dokumentation der Standort- und Flechtendaten

Zur Erfassung der Objektstandorte im Gelände wird ein geländetauglicher Rechner „Fieldbook“ mit integriertem GPS verwendet (Abb. 3). Es wurde mit der Software Arcpad 10.0 gearbeitet. Die Lage der Objekte (Bäume, Mauern) konnte dadurch direkt in ein hinterlegtes Luftbild mit GPS-Anzeige eingetragen werden (Abb. 4). Außerdem wurden in diesem Zuge auch sämtliche Standortdaten digital erfasst. Die Daten liegen im shape-Dateiformat vor.

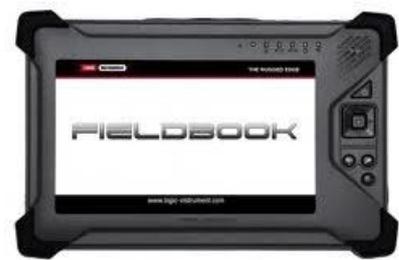


Abb. 3: Feldrechner Fieldbook

So ist sichergestellt, dass bei einer Wiederholungsuntersuchung dieselben Bäume und Mauern untersucht werden können. Die zur Luftgüteuntersuchung kartierten Bäume werden zusätzlich mit einem Edelstahlnagel markiert, der in der Mitte der Messgitter-Oberkante in 1,5 m Höhe dauerhaft eingeschlagen wird.



Abb. 4: Luftbildausschnitt mit kartierten Bäumen und Mauern an der DBF Melsungen.
(Darstellung auf Grundlage von Daten des HLUG, ergänzt)

4.4 Klima- und Depositionsdaten

Zur Interpretation der Flechtendaten für ein Klimawandel-Biomonitoring wurden langjährige Klimadaten herangezogen. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) stellt solche Daten zur Verfügung. Die Lage der Messstationen des DWD und deren Entfernung zu den Flechten-Dauerbeobachtungsflächen zeigt die folgende Abbildung (Abb. 5). Bei drei Flächen (Rhön, Limburg, Flughafen) liegt die DWD-Station unmittelbar im Untersuchungsgebiet, bei sechs Flächen (Diemelstadt, Gießen, Spessart, Rheingau, Biebesheim, Odenwald) innerhalb eines Umkreises von 10 km. Nur bei einer DBF (Melsungen) ist die DWD-Station weiter als 10 km entfernt.

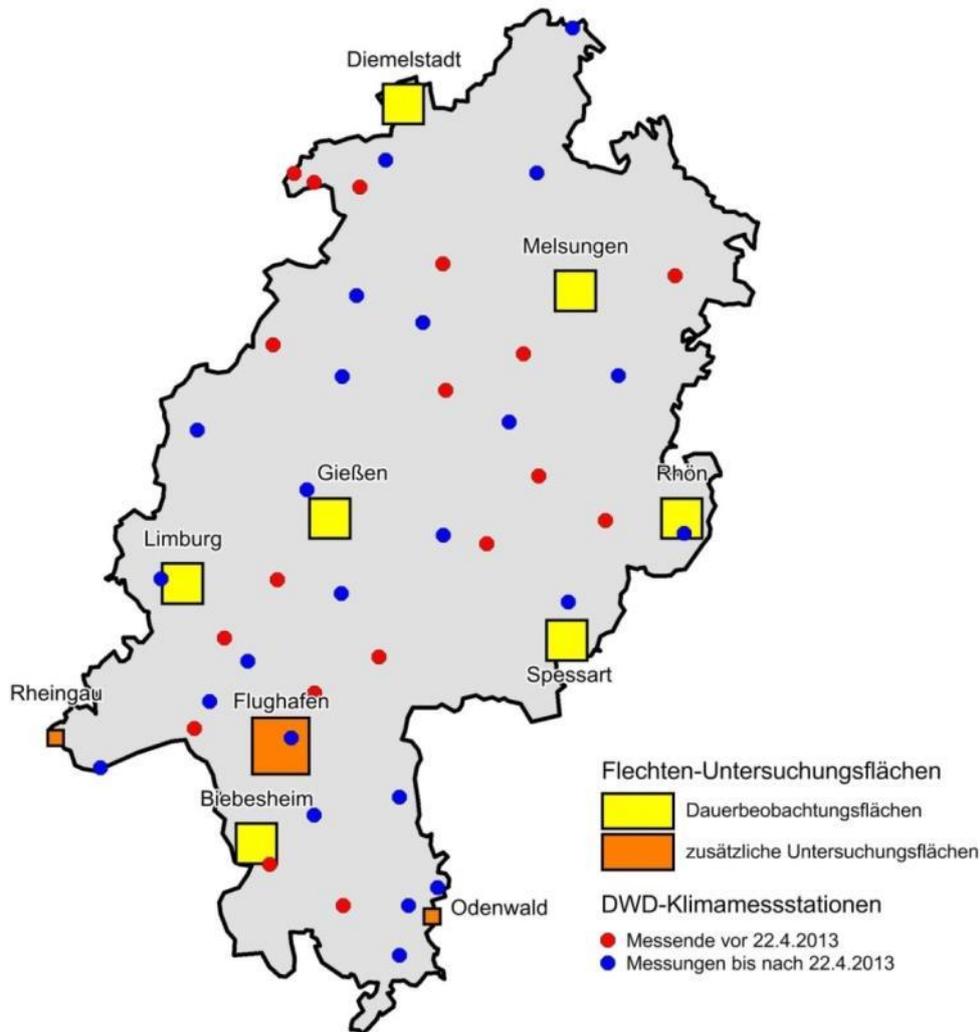


Abb. 5: Lage der Flechten-Untersuchungsflächen in räumlichem Bezug zu Messstationen des Deutschen Wetterdienstes (rote Punkte: Stationen sind nicht mehr in Betrieb)

Sollen nun die Daten aus den Messflächen der DBF mit Klimadaten in Zusammenhang gebracht werden, werden flächige Daten benötigt. Solche Karten erstellt der DWD, indem aus den Messdaten an den Wetterstationen zunächst der Zusammenhang zwischen der betrachteten Größe (z. B. Temperatur) und der topographischen Höhe berechnet wird. Durch Interpolation wird damit ein flächendeckendes Rasterfeld der klimatologischen Werte mit einer Auflösung von 1 km erstellt (Datenquelle: DWD).

Für jede Dauerbeobachtungsfläche wurde die Klasse mit dem größten Flächenanteil bestimmt (Abb. 6) und der Mittelwert der Klasse notiert. Es wurden Klimadaten zu Temperatur, Niederschlag und Kontinentalität in die statistische Auswertung aufgenommen (Tab. 3).

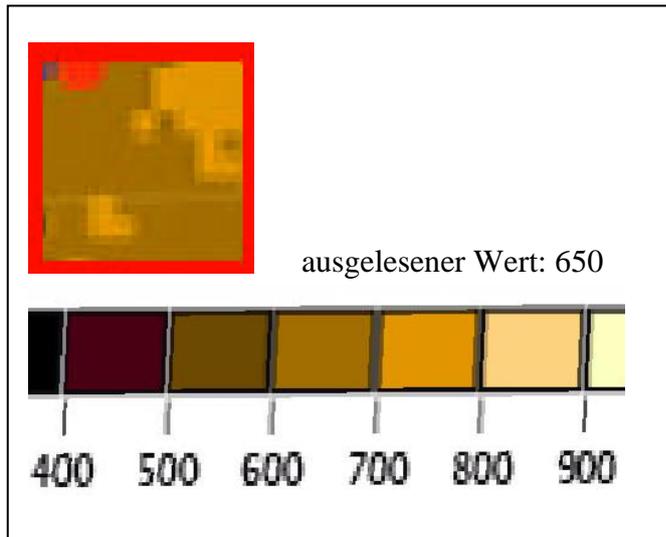


Abb. 6: Zuordnung von Klimadaten zu einer DBF am Beispiel der DBF Gießen und der Jahressumme des Niederschlags 2001-2010 als 10-Jahresmittel (Datenquelle: DWD, verändert)

Tab. 3: Zur statistischen Analyse herangezogene Klimadaten (Datenquelle: DWD)

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

Nach Angaben des Deutschen Wetterdienstes beschreibt die Kontinentalität den Grad des Einflusses großer Landmassen auf das Klima bzw. den Grad der maritimen Einflüsse. Maritimes Klima in mittleren Breiten ist geprägt durch eine relativ geringe Schwankung der Extremwerte der Lufttemperatur im Jahresverlauf. Kontinentales Klima dagegen zeichnet sich durch starke

jahreszeitliche Temperaturunterschiede aus. Typisch sind relativ trockene, heiße Sommer und sehr kalte Winter. Zur Berechnung der Kontinentalität verwendet der DWD die mittleren Jahreschwankungen der Temperatur im Referenzzeitraum 1961-1990. In Hessen steigen die Kontinentalitätswerte von Nordwesten nach Südosten hin an (Abb. 7). Die nordwestlichste Untersuchungsfläche Diemelstadt und die westlichste Fläche Rheingau weisen die geringsten Kontinentalitätswerte auf, während der Flughafen und das südlich davon gelegene Biebesheim ein kontinentaleres Klima haben.

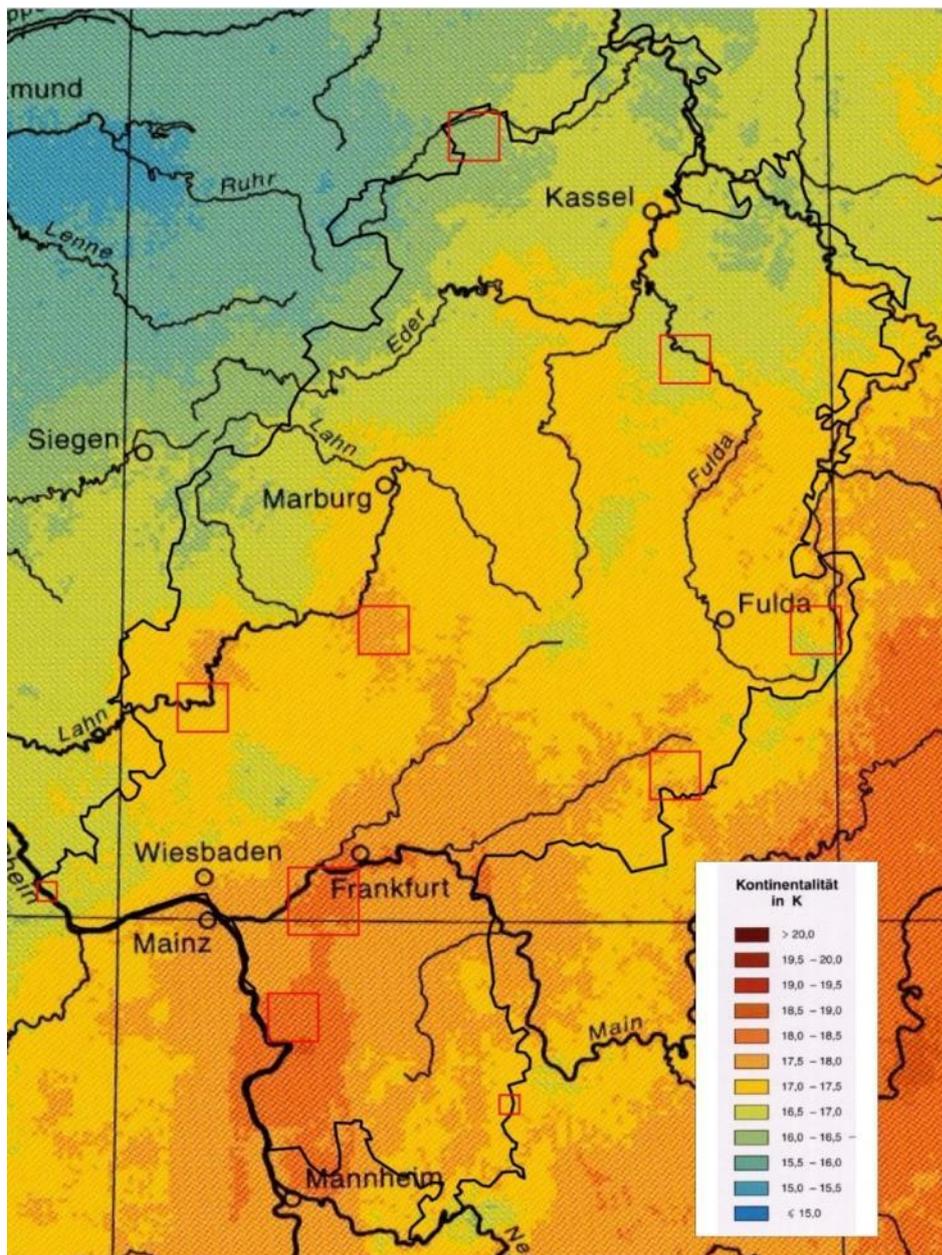


Abb. 7: Kontinentalitätskarte von Hessen (DEUTSCHER WETTERDIENST) und Darstellung der Lage der Untersuchungsflächen

Die Ergebnisse der Flechtenkartierung erlauben den Rückschluss auf die Wirkungen eutrophierender Luftschadstoffe. Zu den eutrophierenden Luftschadstoffen gehören die pflanzenverfügbaren, reaktiven Stickstoffverbindungen (z. B. Ammoniak, Ammonium, Nitrat), aber auch Phosphorverbindungen. Die Nährstoffe können gasförmig vorliegen oder an Stäube gebunden sein.

Die Luftschadstoffmessungen des HLUG erfassen Stickstoffoxide (die nicht unmittelbar düngend wirken) und Feinstaub. Diese Werte alleine sind somit kaum geeignet, Eutrophierungswirkungen auf Flechten zu erklären.

Daher wurden Daten des Umweltbundesamtes zur Deposition reaktiven Stickstoffs (BUILTJES ET AL. 2011) ausgewertet. Die Daten sind in einer Karte der Gesamtdeposition (trockene, nasse und feuchte Deposition) dargestellt. Für jede Flechten-DBF wurde anhand der Koordinaten im Zentrum der Fläche und unter Auswahl der Landnutzungsklasse „Wiesen und Weiden“ ein N-Depositionswert ausgelesen. Die Werte liegen zwischen $11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Rheingau) und $19 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Diemelstadt, Rhön).

Eine Zusammenstellung der Klima- und Depositionsdaten findet sich in Anhang 4.

4.5 Luftgüteuntersuchung

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

4.5.1 Flechtenkartierung nach VDI 3957 Blatt 13

4.5.1.1 Auswahl der Trägerbäume

In jeder Messfläche werden 6-10 geeignete Bäume auf ihren Flechtenbewuchs untersucht. Sinkt die Zahl der in den vorigen Kartierungen noch verfügbaren Bäume (z. B. wegen Überalterung, Fällungen, Windwurf), so ist für Ersatz zu sorgen. Finden sich keine geeigneten Bäume, ist die Messfläche zu verwerfen (nicht kartierbar). Gelegentlich kam es vor, dass Messflächen, die früher wegen Mangels an geeigneten Bäumen nicht als Messflächen in Betracht kamen, durch Heranwachsen junger Bäume neu eingerichtet werden konnten. Als Folge ist eine gewisse Schwankung der Anzahl von Messflächen pro DBF zu verzeichnen (vgl. Kap. 4.2)

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

Tab. 4: Baumartengruppe nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13, mit zulässigem Baumumfang

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

4.5.1.2 Erfassung der Flechten

Zur Erfassung der Flechten wird das Gitter mit 10 Gitterfeldern (je 10 x 10 cm) an der am stärksten bewachsenen Stammseite angelegt (VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13, Anhang A). Es werden alle Flechtenarten aufgenommen. Für jede vorgefundene Art wird notiert, in wie vielen der 10 Felder des Gitters die Art vorkommt (Frequenz). Ist eine Identifikation der Flechten vor Ort nicht sicher möglich, werden unter Schonung des Bestandes Proben genommen und im Labor bestimmt. Als Bestimmungsliteratur dient das Werk von WIRTH (WIRTH ET AL. 2013) und diverse gattungsspezifische Flechtenwerke. Deutsche Flechtennamen wurden dem Buch von WIRTH & KIRSCHBAUM (WIRTH & KIRSCHBAUM 2014) entnommen.

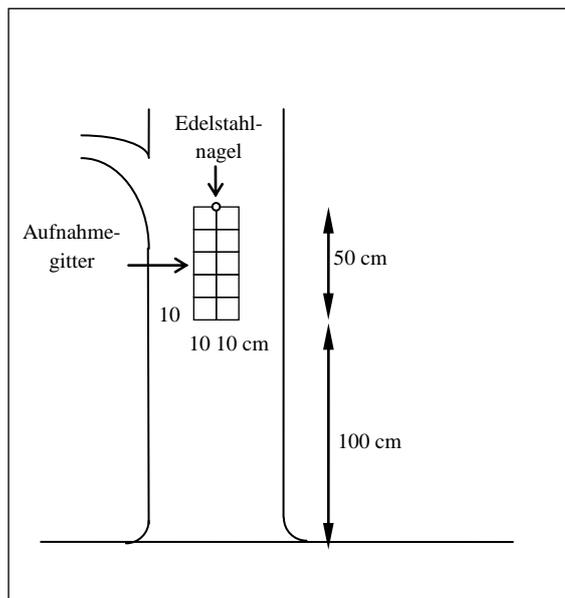


Abb. 8: Flechtenaufnahmegitter am Baum (nach VDI 3957 Blatt 13, Anhang A)

4.5.1.3 Berechnung der Luftgüteindizes (LGI)

Die Berechnung der Luftgüteindizes erfolgt nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 (VDI 3957 Blatt 13, 2005). Aus der Anzahl der im Aufnahmegitter vorhandenen Arten und deren Häufigkeit wurden zunächst Flechten-Diversitätswerte (FDW) errechnet. Die FDW wurden für die Eutrophierung anzeigenden Arten (Eutrophierungszeiger) und für die übrigen Arten (Referenzarten) getrennt berechnet. Eutrophierungszeiger sind die in Tab. 5 genannten Arten. Die Einschätzung der Arten als Eutrophierungszeiger basiert auf den Zeigerwerten für Pflanzen nach WIRTH (1991). In einer neunstufigen Skala werden dabei die Ansprüche der Arten gegenüber wichtigen ökologischen Faktoren wie Temperatur, Feuchte, Nährstoffangebot und pH-Wert ausgedrückt.

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

Tab. 5: Liste der Eutrophierungszeiger nach VDI-RICHTLINIE 3957 Blatt 13, Stand: 2005

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

4.5.1.4 Bewertung der Luftgüteindizes (LGI)

Für die ermittelten Flechten-Diversitätswerte können in der Bewertungsmatrix (Abb. 9) die entsprechenden Luftgüteindizes (LGI), zum Beispiel „4.2“, ausgelesen werden. Für jede Messfläche wurde ein LGI ermittelt. Der Luftgüteindex repräsentiert die Belastung durch saure und eutrophierende Luftverunreinigungen. Der Index setzt sich aus zwei Ziffern zusammen, die durch einen Punkt getrennt sind. Die erste Ziffer des Indexes entspricht der Luftgüte und ist mit einer Farbe gekoppelt, die zweite Ziffer symbolisiert das Vorkommen von Eutrophierungszeigern (Abb. 10). Dabei wird die Luftgüte verbal mit „sehr hoch - hoch - mäßig - gering - sehr gering“ bewertet und mit der entsprechenden Farbe in der Luftgütekarte gekennzeichnet.

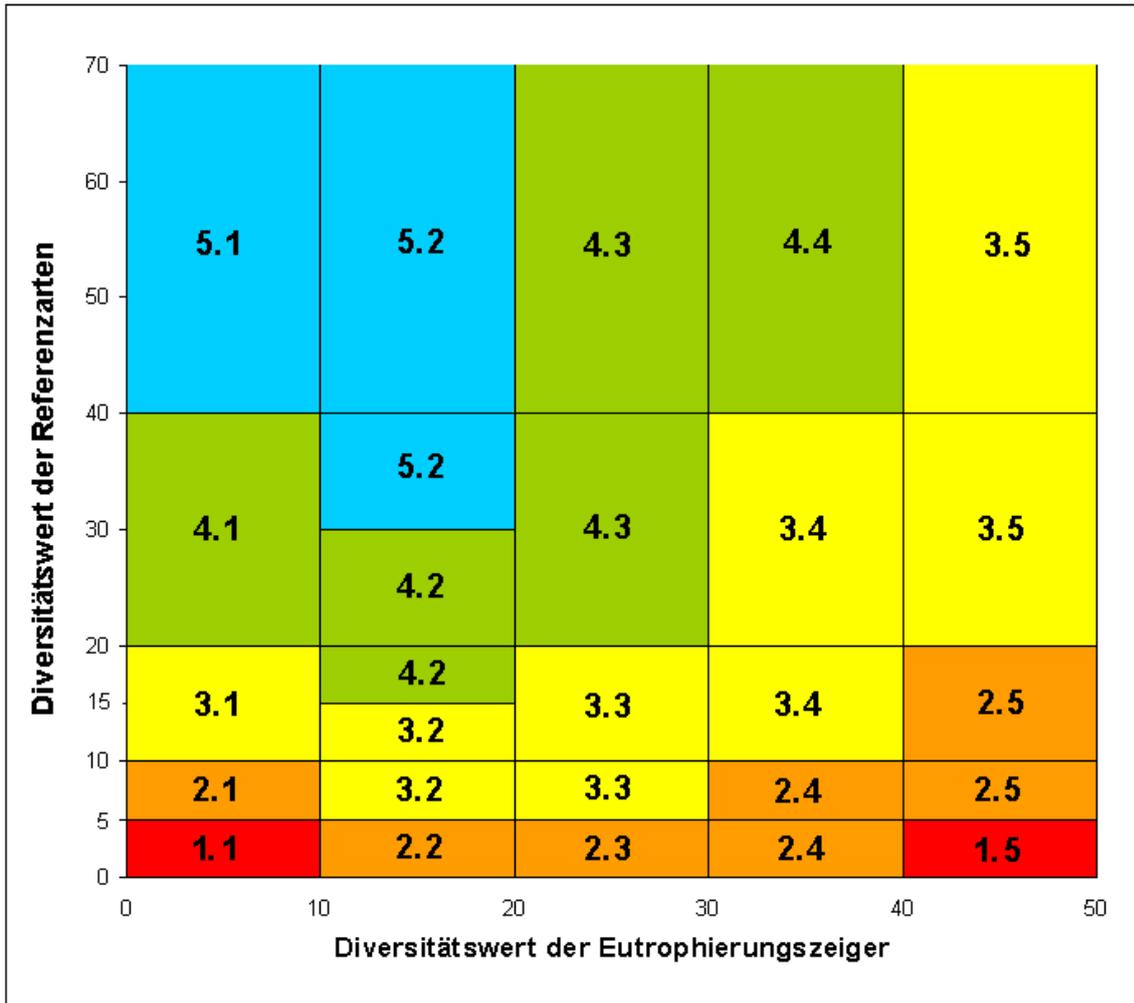


Abb. 9: Bewertungsmatrix zur Ermittlung des Luftgüteindex anhand der Kombination der Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger und der übrigen Arten (Datenerhebung nach VDI-Richtlinie 3579 Blatt 13, Anhang A)

Bewertung der Luftgüte ohne Berücksichtigung eutrophierender Luftschadstoffe			Bewertung eutrophierender Luftschadstoffe	
5	sehr gute Luftgüte	5	sehr starker Einfluss eutrophierender Verbindungen	
4	hohe Luftgüte	4	starker Einfluss eutrophierender Verbindungen	
3	mittlere Luftgüte	3	mittlerer Einfluss eutrophierender Verbindungen	
2	geringe Luftgüte	2	geringer Einfluss eutrophierender Verbindungen	
1	sehr geringe Luftgüte	1	sehr geringer Einfluss eutrophierender Verbindungen	
<p>Folgende Beispiele erläutern die verbale Beschreibung des Luftgüteindex:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Luftgüteindex 1.1: Sehr geringe Luftgüte bei sehr geringem Einfluss eutrophierender Verbindungen • Luftgüteindex 1.5: Sehr geringe Luftgüte bei sehr starkem Einfluss eutrophierender Verbindungen • Luftgüteindex 5.1: Sehr hohe Luftgüte bei sehr geringem Einfluss eutrophierender Verbindungen. 				

Abb. 10: Erläuterung der Bewertungsmatrix nach VDI-Richtlinie 3579 Blatt 13

4.5.2 Folienverfahren nach VDI 3957 Blatt 8

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

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

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

Zur Vorbereitung der digitalen Auswertung werden die Folien gescannt (Abb. 11) und als Vorbereitung auf die folgende Analyse nachbearbeitet. Die Flächenberechnung der gezeichneten Flechtenthalli erfolgt mittels der Software ‚LiMo-Analyse‘ (Abb. 12). Das Programm wurde für diese Anwendung im Rahmen eines Studienprojektes neu entwickelt und steht seit Ende 2013 auf den Seiten der Technischen Hochschule Mittelhessen unter dem Link [„http://go.thm.de/LiMo-Analyse“](http://go.thm.de/LiMo-Analyse) zum Download bereit. Nähere Informationen zur Benutzung geben Handbuch und Publikation (WINDISCH UND MENZEL 2013).

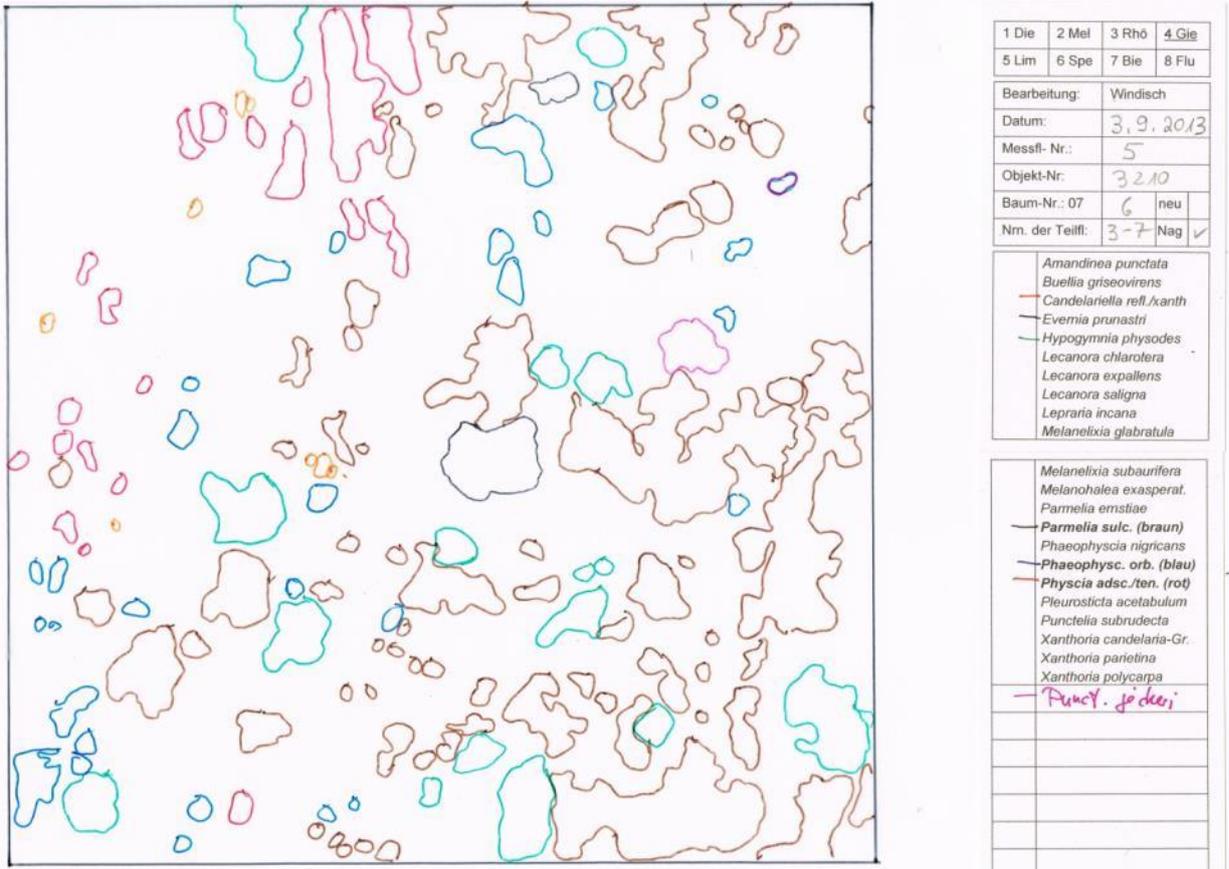


Abb. 11: Beispiel einer verkleinerten, gescannten Folie (Flechteenerfassung an einem Baum der DBF Gießen)

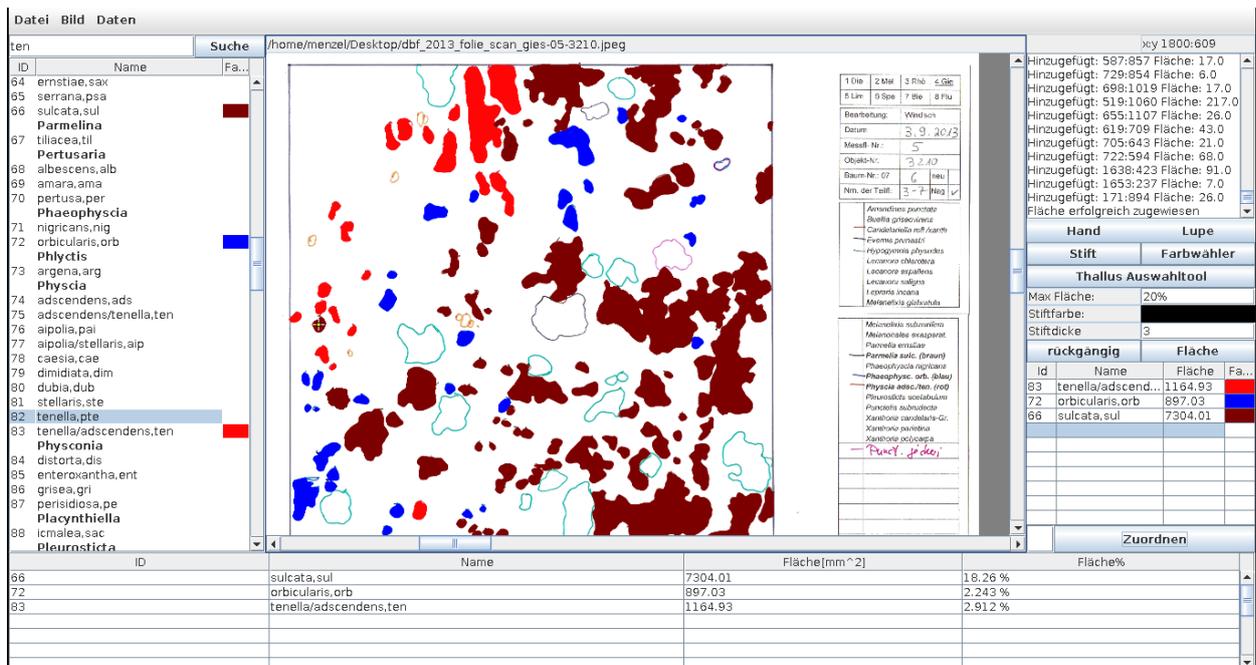


Abb. 12: Ansicht der Benutzeroberfläche von ‚LiMo-Analyse‘ während der Flächenauswertung

4.6 Klimawandel-Biomonitoring

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

Zur methodischen Vorbereitung der ersten Erhebung zum Klimawandel-Biomonitoring 2007 konnte auf die langfristig erhobenen Daten der Luftgütekartierung bis 2002 zurückgegriffen werden. Die Zahl und Häufigkeit der Klimawandelzeiger war in Hessen ausgesprochen gering, wenn auch erste Arbeiten, vornehmlich aus den Meeresanrainern Niederlande und Dänemark, von der Ausbreitung atlantischer Flechtenarten berichteten (vgl. Kap. 3.3). Es erschien als nicht zielführend, eine mögliche Ausbreitung von Klimawandelzeigern mit einer kleinen standardisierten Messfläche von 0,1 m² pro Aufnahmefläche (z. B. an einem Baum), wie sie das Messgitter der immissionsbezogenen Kartierung standardisierter Trägerbäume darstellt, zu dokumentieren. Folgerichtig wurde in der Arbeit zusätzlich ein breiteres Spektrum an Substraten untersucht. Dabei sollten sowohl Epiphyten als auch Gesteinsflechten in die Untersuchung mit einbezogen werden. Zum anderen soll durch eine ausreichende Zahl und Größe der Erfassungsflächen sichergestellt werden, dass klimawandelrelevante Arten – falls vorhanden – auch nachgewiesen werden können.

Zusätzlich zu den Dauerbeobachtungsflächen der Luftgütekartierung werden seit 2007 erstmalig die Untersuchungsflächen „Flughafen“, „Rheingau“ und „Odenwald“ für das Klimawandel-Biomonitoring untersucht. Diese Untersuchungen finden auf einer Fläche von etwa 1 km² statt. Sie werden an den bisher untersuchten Dauerbeobachtungsflächen und den zusätzlichen Untersuchungsflächen durchgeführt.

4.6.1 Erfassung der Flechten auf „Klimabäumen“

Auf jeder Untersuchungsfläche wurden 20 Bäume erfasst. Im Gegensatz zur Luftgütekartierung wird hierbei nicht nach streng standardisierten Vorgaben hinsichtlich der Trägerbaumeigenschaften vorgegangen, um die Chance zu erhöhen, die bisher erst vereinzelt eingewanderten Wärmezeiger zu erfassen. Es werden verschiedene, vor Ort vorhandene, Baumarten in die Untersuchung mit einbezogen, vorzugsweise auch mit unterschiedlichen Borken-pH-Werten. Hinsichtlich des Alters der Bäume, der Neigung und sonstiger äußerer Einflussfaktoren ist Vielfalt erwünscht. Der Durchmesser der Baumstämme in einer Höhe von 1,5 m über dem Boden sollte mindestens 10 cm betragen.

Es wird jeweils der gesamte Baumstamm, von ca. 50-200 cm nach Flechten abgesucht. Das Vorkommen aller Arten pro Baum wird notiert. Auch diese Maßnahme soll die Wahrscheinlichkeit erhöhen, dass die noch seltenen Wärmezeiger gefunden werden. Es war zulässig, einige der „VDI-Bäume“ (vgl. Kapitel 4.5.1) auch als Klimabäume zu untersuchen. Zusätzlich wurden weitere Klimabäume erfasst.

4.6.2 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. 13: Untersuchung einer Natursteinmauer auf Flechten

4.7 Klimawandel-Biomonitoring-relevante Flechten-Indizes

Zur Interpretation der Daten zum Flechtenvorkommen hinsichtlich des Klimawandel-Biomonitorings werden in der vorliegenden Arbeit verschiedene Varianten der Auswertung eingesetzt. Alle basieren auf den Kenntnissen der Flechtenökologie. Für Flechten liegen, ebenso wie für Gefäßpflanzen und andere Gruppen, sogenannte Ökologische Zeigerwerte vor.

Ökologische Zeigerwerte für Flechten wurden im Jahre 1991 erstmalig veröffentlicht, eine Aktualisierung und Erweiterung auf 516 Arten erfolgte 2010 (WIRTH 1991, 2010). Hier wurde erstmals ein klimaökologischer Zeigerwert („Kontinentalitätszahl“) eingeführt, der gerade bei den wechselfeuchten Flechten besonders bedeutsam ist.

Die Zeigerwerte für Temperatur, Feuchte und Kontinentalität stehen im Fokus der vorliegenden Fragestellung. Aufgrund zu erwartender Wechselwirkungen werden ergänzend Eutrophierungs- und Reaktionszeigerwerte ausgewertet.

Die **Temperaturzahl (T)** beschreibt das Vorkommen der Flechten im Wärmegefälle von den hohen Gebirgslagen bis in die wärmsten Tieflagen Mitteleuropas.

Die **Feuchtezahl (F)** wird für Flechten anders definiert als für Gefäßpflanzen, weil Flechten als wechselfeuchte (poikilohydre) Organismen hinsichtlich ihres Wasserhaushaltes weitgehend von den atmosphärischen Feuchtebedingungen abhängig sind. So beschreibt die Feuchtezahl das Vorkommen der Flechten von trockensten Bereichen bis hin zu niederschlagsreichen Gebieten (über 1.400 mm), an denen Flechten nur kurzfristig austrocknen.

Die **Kontinentalitätszahl (K)** deckt das Kontinentalitätsgefälle von der Atlantikküste bis ins Innere Eurasiens, besonders in Hinblick auf die Temperaturschwankungen, ab.

Die **Eutrophierungszahl (N, Düngungstoleranz)** ersetzt die frühere „Nährstoffzahl“ und gewichtet das Maß der übermäßigen Nährstoffanreicherung von außen. Als Nährstoffquellen kommen düngende Stäube oder organische und anorganische Stickstoffverbindungen (aus Düngung landwirtschaftlicher Nutzflächen oder Tierexkrementen) in Frage.

Die **Reaktionszahl (R)** gibt Aufschluss über die pH-Verhältnisse der Flechtenhabitats. Als extrem sauer werden Standorte mit einem pH-Wert unter 3,4 aufgefasst, als basisch werden Standorte mit einem pH-Wert über 7 bezeichnet.

4.7.1 Auswertung der Wärmezeiger (WZ)

In dieser Auswertungsvariante wird ausschließlich die Temperaturzahl herangezogen. Alle Arten, die nach WIRTH (WIRTH 2010) eine Temperaturzahl zwischen 7 und 9 haben, werden als Wärmezeiger (WZ) bezeichnet. Aus der Gesamtheit der 516 Arten, für die Temperaturzeigerwerte vorliegen, resultieren 58 Wärmezeigerarten, die auf Rinde und Gestein vorkommen können (Tab. 6).

Tab. 6: Wärmezeigerarten, die auf Rinde und Gestein siedeln (R: Rinde, G: Gestein, E: Erdboden)

Flechtenart	Temperaturzahl	bevorzugtes Substrat
<i>Arthonia cinnabarina</i>	7	R
<i>Bagliettoa marmorea</i>	9	G
<i>Buellia ocellata</i>	7	G
<i>Caloplaca albolutescens</i>	9	G
<i>Caloplaca aurantia</i>	9	G
<i>Caloplaca dalmatica</i>	8	G
<i>Caloplaca demissa</i>	7	G
<i>Caloplaca flavescens</i>	7	G
<i>Caloplaca granulosa</i>	9	G
<i>Caloplaca lactea</i>	8	G
<i>Caloplaca teicholyta</i>	8	G
<i>Candelariella medians</i>	9	G
<i>Candelariella plumbea</i>	9	G
<i>Candelariella viae-lacteae</i>	9	R
<i>Catillaria lenticularis</i>	7	G
<i>Catillaria minuta</i>	7	G
<i>Diploicia canescens</i>	7	GR
<i>Dirina stenhammarii</i>	8	G
<i>Enterographa hutchinsiae</i>	7	G
<i>Flavoparmelia caperata</i>	7	RG
<i>Flavoparmelia soredians</i>	9	ER
<i>Flavopunctelia flaventior</i>	8	R
<i>Hyperphyscia adglutinata</i>	9	R
<i>Hypotrachyna afrorevoluta</i>	7	RG
<i>Hypotrachyna laevigata</i>	9	RG
<i>Hypotrachyna revoluta</i>	7	G
<i>Lecanographa amylacea</i>	7	R
<i>Lecanora pannonica</i>	8	G
<i>Lecanora rouxii</i>	8	G

<i>Lobothallia radiosa</i>	7	G
<i>Melanohalea elegantula</i>	7	R
<i>Melanohalea laciniatula</i>	7	R
<i>Ochrolechia parella</i>	7	G
<i>Opegrapha ochrocheila</i>	7	R
<i>Opegrapha vermicellifera</i>	8	R
<i>Oxneria huculica</i>	8	RG
<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	R
<i>Physconia grisea</i>	7	R
<i>Placocarpus schaeereri</i>	9	G
<i>Porina leptalea</i>	7	R
<i>Protoparmelia hypotremella</i>	7	R
<i>Psora testacea</i>	9	G
<i>Punctelia borreri</i>	8	R
<i>Punctelia jeckeri</i>	7	R
<i>Punctelia subrudecta</i>	7	R
<i>Pyrenula nitida</i>	7	R
<i>Pyrenula nitidella</i>	7	R
<i>Rinodina lecanorina</i>	8	G
<i>Sarcopyrenia gibba</i>	9	G
<i>Schismatomma decolorans</i>	7	R
<i>Toninia toniniana</i>	9	G
<i>Xanthomendoza fallax</i>	8	RG

Die Daten der Wärmezeigerfunde wurden wie folgt zu einem Ergebnis zusammengefasst:

- Auf Grundlage der Flechtenfrequenzen aus dem Messgitter standardisierter Trägerbäume („**VDI-Bäume**“) wurde ein Flechten-Diversitätswert der Wärmezeiger (FDW_{WZ}) ermittelt. Die Berechnung erfolgt analog der Ermittlung von Flechten-Diversitätswerten für Eutrophierungszeiger und Referenzarten aus Luftgüteuntersuchungen (vgl. Kapitel 4.5.1.3). Die Summe der Frequenzen (Häufigkeit im Messgitter) von Wärmezeigern wird durch die Anzahl der untersuchten Bäume geteilt. Zum Beispiel bedeutet ein Wert von 0,5, dass statistisch gesehen an der Hälfte der kartierten Bäume in einem Messgitter mit zehn Feldern (d. h. pro Baum kann jede Art maximal 10 Datensätze erzeugen) ein Wärmezeiger erfasst wurde. Diese Methode hat den Vorteil, dass Daten aus früheren Erhebungen verwendet werden können (früher wurde nur im Messgitter kartiert).
- Mittels der qualitativ erhobenen Flechtendaten von Trägerbäumen („**Klimabäume**“) für die untersuchten Bäume einer DBF wurde die mittlere Anzahl der Wärmezeiger errechnet. Zum Beispiel sagt ein Wert von 1 aus, dass im Mittel an jedem Baum eine Wärmezeigerart gefunden wurde.
- Mit den Flechtendaten von **Mauern** wurde in derselben Weise wie bei den Klimabäumen verfahren.

4.7.2 Auswertung der Klimawandelzeiger (KWZ)

Der Arbeitskreis der Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) zum Thema „Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Umweltveränderungen (Bioindikation)“ entwickelt derzeit eine neue Vorgehensweise zum Klimawandel-Biomonitoring mit Flechten (VDI 3957 Blatt 20 Stand: 2013). Die Methode wird in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen.

Basierend auf den Zeigerwerten nach WIRTH (2010) und KIRSCHBAUM & WIRTH (2010) werden Flechtenarten selektiert, die hier als „Klimawandelzeiger“ bezeichnet werden sollen. Dabei wird im ersten Schritt der Selektion für jede Flechtenart der „Klimawert“ (KW) nach KIRSCHBAUM & WIRTH berechnet. Der KW ist ein Kombinationswert aus dem Kontinentalitätszeigerwert (K) und dem Temperaturzeigerwert (T).

Somit integriert der Klimawert die ökologischen Aussagen beider Werte mit stärkerer Gewichtung der Wirkungen großräumiger Temperaturschwankungen.

$$KW = \frac{(10 - K + T)}{2}$$

Zugunsten einer breiten Datenbasis werden indifferente Zeigerwerte (x) durch die Zahl 5 ersetzt. Die Klimawerte der Flechten einer Messfläche gehen in die Identifizierung von Klimawandelzeigern, wie im folgenden Kapitel erläutert, ein.

Dann werden jene Arten ausgewählt, die einen Klimawert $KW \geq 6,5$ haben. Nach KIRSCHBAUM & WIRTH (2010) haben Arten mit $KW > 6,5$ ihren Verbreitungsschwerpunkt in subatlantisch-submediterranen Regionen mit mildfeuchten Wintern. Durch diese Eingrenzung werden nur Arten berücksichtigt, die bisher in Deutschland in ihrer Verbreitung klimatisch begrenzt oder nicht bekannt waren. Im zweiten Schritt werden Arten mit einer hohen Eutrophierungstoleranz (Eutrophierungszahl (N-Zahl) > 6) aufgrund möglicher Interferenzen ausgeschlossen. Im dritten Schritt werden Arten mit einem $KW = 6,5$ geprüft. Es werden nur solche Spezies mit aufgenommen, die eine Feuchtezahl (F) von mindestens 7 haben, um den hygrischen Einfluss des Klimawandels zu berücksichtigen.

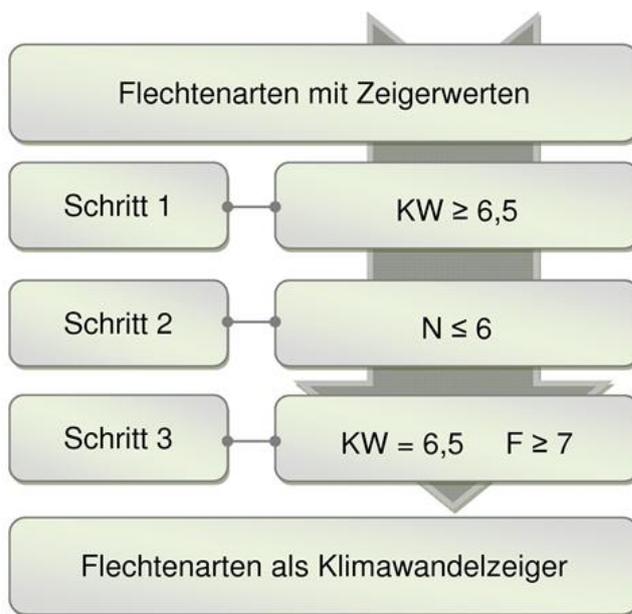


Abb. 14: Schema der Selektion von Klimawandelzeigern nach Zeigerwerten

Darüber hinaus wurden im Richtlinienentwurf Arten ergänzt, für die kein Zeigerwert nach WIRTH existiert, die aber nach der Niederländischen Checkliste der Flechten und APTROOT & SPARRIUS (APTROOT & SPARRIUS 2009) als gemäßigt-mediterran oder subatlantisch-submediterran-gemäßigt verbreitet gelten.

Nach dieser Vorgehensweise wurden 45 Arten als Klimawandelzeiger in die VDI-Richtlinie aufgenommen (Tab. 7).

Tab. 7: Liste der Klimawandelzeiger nach (VDI 3957 Blatt 20 Stand: 2013)

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

* Arten, für die WIRTH (WIRTH 2010) keinen Zeigerwert veröffentlicht hat, die aber nach APTROOT (APTROOT & SPARRIUS 2009) als gemäßigt-mediterran oder subatlantisch-submediterrän-gemäßigt gelten

Die erfassten Artenfunde wurden wie folgt zu einem Ergebnis zusammengefasst:

- Mit den Daten der Flechtenfrequenzen aus dem Messgitter standardisierter Trägerbäume („**VDI-Bäume**“) wurde ein Flechten-Diversitätswert der Klimawandelzeiger (**FDW_{KWZ}**) ermittelt. Die Berechnung erfolgt analog der Ermittlung von Flechten-Diversitätswerten für Eutrophierungszeiger und Referenzarten aus Luftgüteuntersuchungen (vgl. Kapitel 4.5.1.3). Die Summe der Frequenzen (Häufigkeit im Messgitter) von Klimawandelzeigern wird durch die Anzahl der untersuchten Bäume geteilt. Zum Beispiel bedeutet ein Wert von 0,5, dass statistisch gesehen an der Hälfte der kartierten Bäume in einem Messgitter mit zehn Feldern (d. h. pro Baum kann jede Art maximal 10 Datensätze erzeugen) ein Klimawandelzeiger erfasst wurde. Diese Methode hat den Vorteil, dass Daten aus früheren Erhebungen verwendet werden können (früher wurde nur im Messgitter kartiert).
- Für qualitativ erhobenen Flechtendaten von Trägerbäumen („**Klimabäume**“) wurde ein Klimawandelzeigerindex (**KWI**) errechnet. Alle Bäume einer DBF gingen in die Berechnung ein. Der KWI einer Dauerbeobachtungsfläche berechnet sich aus dem Mittelwert der Anzahl der Klimawandelzeiger auf allen untersuchten Bäumen. Zum Beispiel sagt ein Wert von 1 aus, dass im Mittel an jedem Baum eine Art der Klimawandelzeiger gefunden wurde.
- Daten aus Erhebungen der **Mauern** können nach dieser Auswertungsvariante nicht ausgewertet werden, weil auf der Liste der Klimawandelzeiger nur epiphytische Flechten aufgeführt sind. (Diese Daten werden nach Wärmezeigern ausgewertet, wie im vorangehenden Kapitel beschrieben ist.)

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Untersuchte Trägerbäume und Mauern

Im aktuellen Untersuchungszeitraum wurden 1.368 Trägerbäume für die Luftgüteuntersuchung („VDI-Bäume“) kartiert. Für das Klimawandel-Biomonitoring wurden 200 weitere Bäume („Klimabäume“) und 300 Mauerabschnitte auf ihren Flechtenbewuchs geprüft.

Für die Luftgütekartierung nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 wurden im Wesentlichen Baumarten mit unter natürlichen Verhältnissen subneutralen Baumrinden (vgl. Tab. 4) verwendet. Es ergibt sich folgendes Spektrum (Abb. 15).

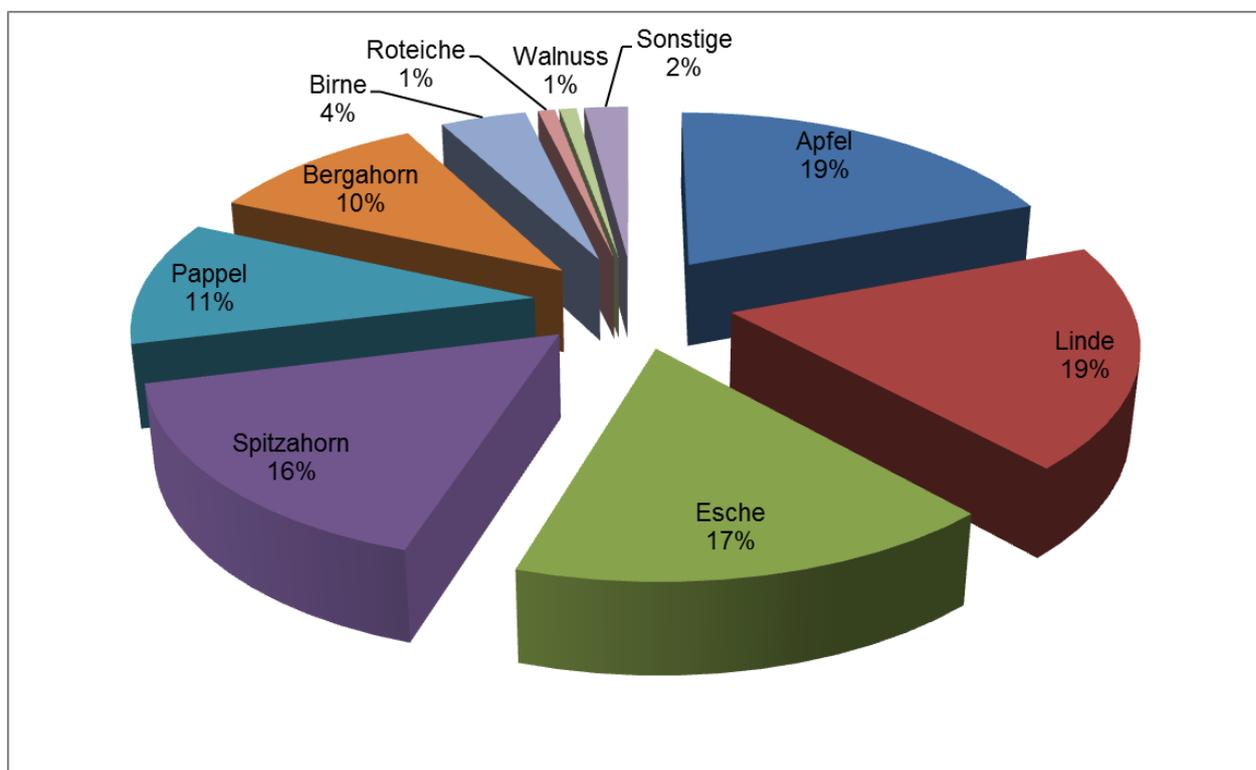


Abb. 15: Baumartenspektrum der Luftgüteuntersuchung 2012

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. 16). Stellten Apfelbaum und Pappel zu Beginn der Untersuchungsreihe noch 86 % der Trägerbäume, so sind es aktuell nur noch 30 %. Rodungen überalterter Bestände und fehlende Nachpflanzungen führten insbesondere bei Pappeln und hochstämmigen Obstbäumen zu Bestandseinbußen.

Günstiger stellte 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 kartiert.

Die in 2002 bzw. 2007 neu hinzugekommenen Dauerbeobachtungsflächen Rhön und Flughafen tragen ebenfalls zu Verschiebungen im Baumartenspektrum bei. Aktuell ist in der Rhön die Esche als Trägerbaum am häufigsten (58 %), am Flughafen ist es mit 35 % der Spitzahorn. Alle hier dargestellten Trägerbaumarten sind nach VDI-Richtlinie zur gemeinsamen Auswertung ihrer Flechtenbestände geeignet (VDI 3957 Blatt 13, 2005).

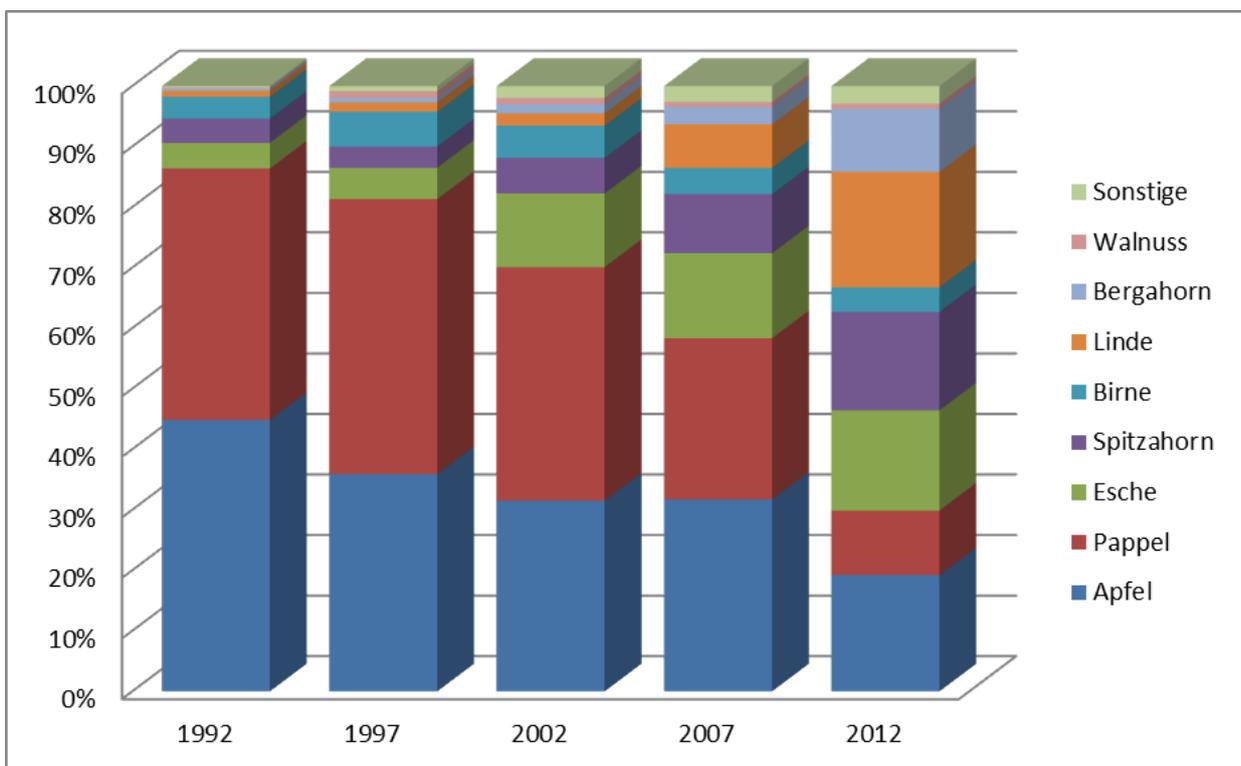


Abb. 16: Entwicklung des Anteils häufig untersuchter Baumarten der Luftgüteuntersuchung

Beim Klimawandel-Biomonitoring wurde bei der Baumartenwahl Wert auf Vielfalt gelegt, was sich im Baumartenspektrum bemerkbar macht (Tab. 8). Auf die Baumarten Apfel und Pappel wurde weitgehend verzichtet. Dahingegen wurden in geringem Umfang Baumarten, die im Rahmen der VDI-Erfassung aufgrund ihres natürlicherweise sauren Borken-pH-Wertes nicht zulässig wären, verstärkt mit einbezogen. Dazu gehören z. B. verschiedene Eichenarten oder Hänge-Birken.

Tab. 8: Baumartenspektrum der Klimabäume in 2012

Baumart	Anteil in %
Linde	34,3
Spitzahorn	11,2
Eiche	8,4
Bergahorn	8,4
Esche	6,2
Birke	5,1
Roskastanie	4,5
Kirsche	4,5
Apfel	3,9
Robinie	3,4
Walnuss	1,1
Birne	1,1
Feldahorn	1,1
Roteiche	1,1
Weißdorn	1,1
Weide	1,1
Pappel	0,6
Mehlbeere	0,6

Bei der Kartierung der Mauern wurden diverse Baumaterialien angetroffen und auf ihren Flechtenbewuchs untersucht (Abb. 17). Natürliche Materialien wie Sandstein und sonstige Natursteine stellen mit 52 % etwa die Hälfte der Untergründe.

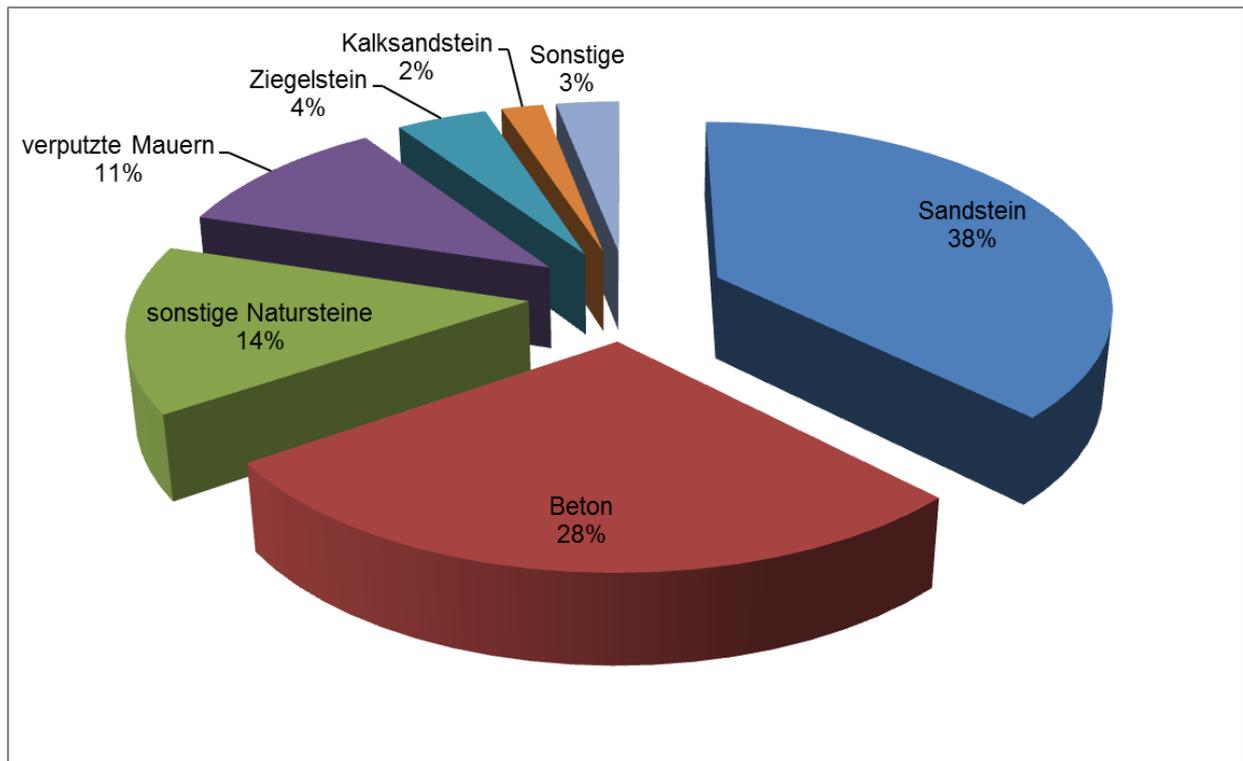


Abb. 17: Spektrum der Baumaterialien der untersuchten Mauern

5.2 Arten

An den 1.868 untersuchten Objekten (Bäumen oder Mauern) wurden insgesamt 252 Taxa gefunden, davon waren 223 Flechten. Zusätzlich wurden auf Flechten parasitierende Pilze mit erfasst: Es wurden 29 verschiedene flechtenbewohnende (lichenicole) Pilze gefunden. Eine vollständige Artenliste mit Angaben zur Häufigkeit ist dem Anhang 5 zu entnehmen.

5.3 Luftgüteuntersuchung

5.3.1 Flechtenkartierung nach VDI 3957 Blatt 13

Die durch die Flechten angezeigte Luftgüte wurde nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13, ermittelt (VDI 3957 Blatt 13, 2005). Die Berechnung des Luftgüteindex basiert auf Flechten-Diversitätswerten (FDW). Der FDW quantifiziert die Artenzahl und Häufigkeit der vorkommenden Flechtenarten. Er wird getrennt für Referenzarten und Eutrophierungszeiger ermittelt. Die zeitliche Entwicklung dieser Diversitätswerte gibt einen wichtigen Hinweis zur lufthygienischen Situation. Ein Anstieg der Diversität bei den Referenzarten ist als Verbesserung der Luftgüte zu werten, während ein Anstieg der Artenzahl und Häufigkeit eutrophierungstoleranter Flechtenarten zunehmende Auswirkungen luftgetragener Nährstoffverbindungen anzeigt.

5.3.1.1 Entwicklung der Luftgüteindizes (1992-2012)

Die Luftgüteindizes ergeben sich aus der Häufigkeit (Diversität) der Referenzarten und der Eutrophierungszeiger. Es bietet sich an, die Entwicklung dieser beiden Gruppen im zeitlichen Verlauf zu verfolgen.

Diemelstadt

In der Dauerbeobachtungsfläche (DBF) Diemelstadt, die zu Beginn der Erhebungen in 1992 als mittel belastet eingestuft worden war, bleibt die Flechtendiversität der Referenzarten über Jahre hinweg relativ konstant auf einem mittleren Niveau (Abb. 18). Erst 2012 steigen Häufigkeit und Artenzahl im Raum Diemelstadt deutlich an. Die Eutrophierungszeiger starteten 1992 mit niedrigen Flechten-Diversitätswerten. Diese stiegen jedoch im Laufe der Jahre weiter an und erhöhten sich in den letzten Jahren sprunghaft. Zwischen 2007 und 2012 wirkten sich eutrophierende Luftinhaltsstoffe deutlich auf die Diversität der Flechten aus. So werden eutrophierungstolerante Arten hier besonders gefördert.

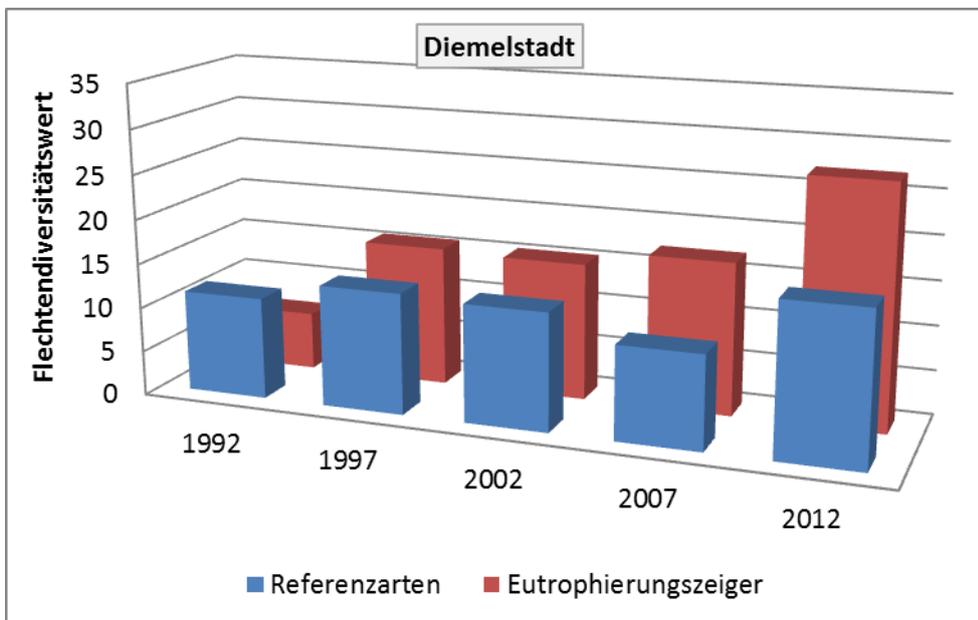
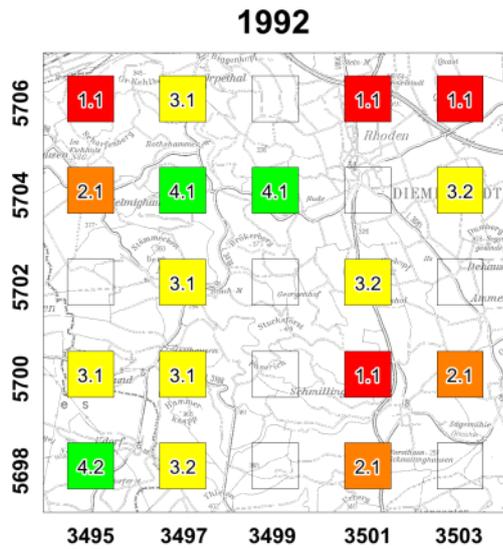


Abb. 18: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2012 an der DBF Diemelstadt

Trotz des Anstiegs der Eutrophierungszeiger, der sich negativ auf die Luftgütebewertung auswirken kann, zeigt die Karte der Messflächen (Abb. 19) einen insgesamt positiven Trend. Waren 2007 noch zwei Messflächen einer geringen Luftgüte (orange) zugeordnet, ist diese Luftgütekategorie in 2012 nicht mehr anzutreffen. Alle Messflächen sind gelb (mittlere Luftgüte) mit Ausnahme von zweien, die günstigere Werte (grün, hohe Luftgüte) erreichen. Ursache ist die Erholung der Bestände der Referenzarten, die eine verbesserte lufthygienische Situation im Raum Diemelstadt belegen.



Flechten-DBF Diemelstadt

Entwicklung der Luftgüteindizes von 1992 - 2012 nach VDI-Richtlinie 3957, Blatt 13

Bewertung der Luftgüte ohne Berücksichtigung eutrophierender Luftschadstoffe

- | | | |
|---------------------------------|----|-------------|
| 5. sehr hohe Luftgüte | .5 | sehr stark |
| 4. hohe Luftgüte | .4 | stark |
| 3. mittlere Luftgüte | .3 | mittel |
| 2. geringe Luftgüte | .2 | gering |
| 1. sehr geringe Luftgüte | .1 | sehr gering |

Kartengrundlage TK 100: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation

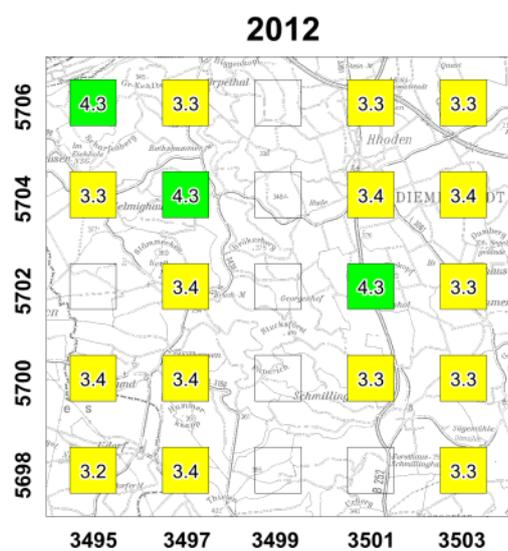
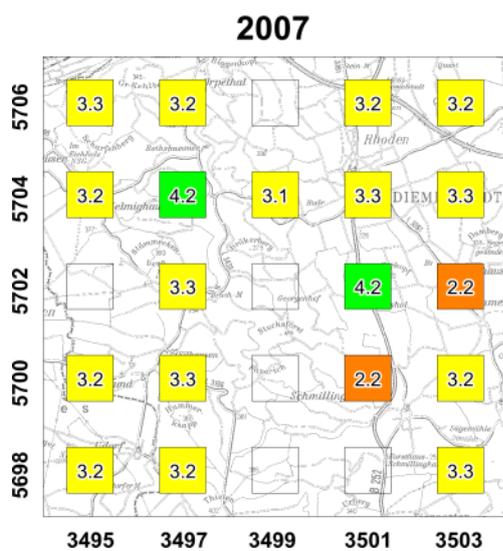
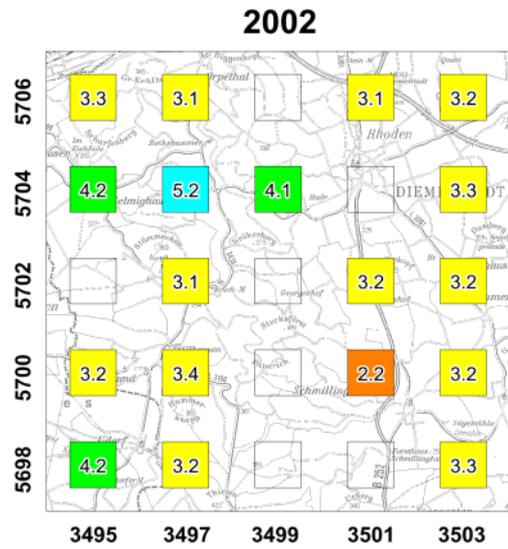
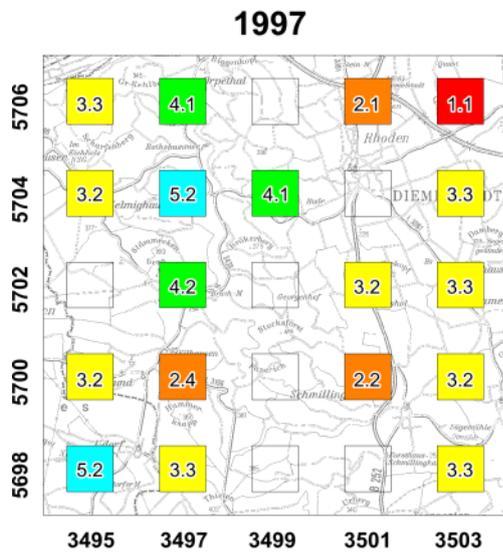


Abb. 19: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2012 an der DBF Diemelstadt

Melsungen

Der Raum Melsungen, als ursprünglich am stärksten belastete DBF eingestuft, beginnt 1992 mit der geringsten Flechtendiversität aller Dauerbeobachtungsflächen (Abb. 20). Dies trifft sowohl für die Referenzarten als auch für die Eutrophierungszeiger zu. Nach der Stilllegung der östlich gelegenen großen SO₂-Emittenten Sachsens und Thüringens Anfang der neunziger Jahre beginnt auch hier eine Erholung der Flechtenvegetation – wenn auch noch auf niedrigem Niveau. Hier haben bis 2002 die Referenzarten das Übergewicht; erst seit 2007 übertrifft die Artenzahl und Häufigkeit der Eutrophierungszeiger diejenige der Referenzarten.

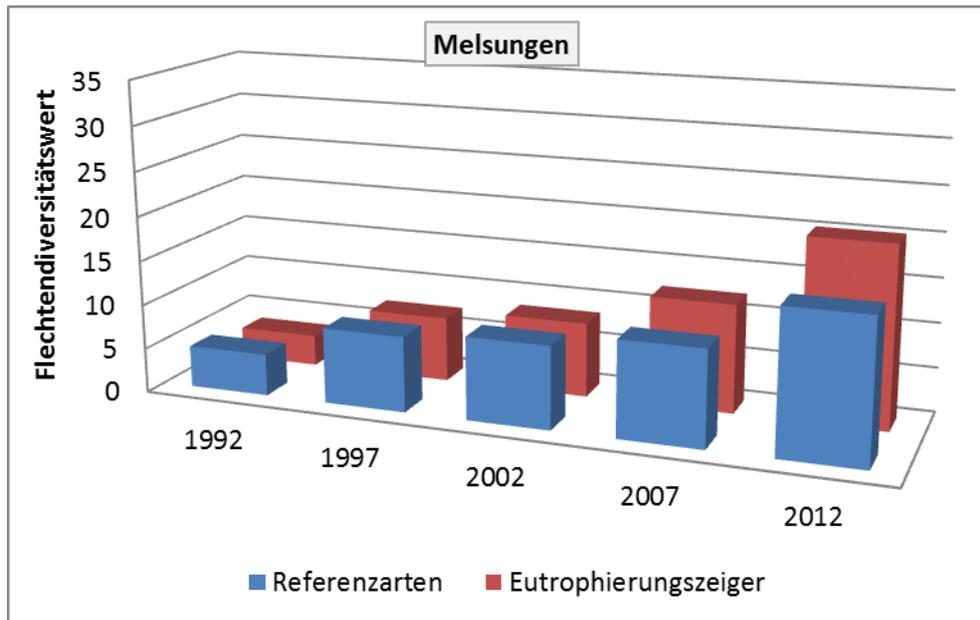
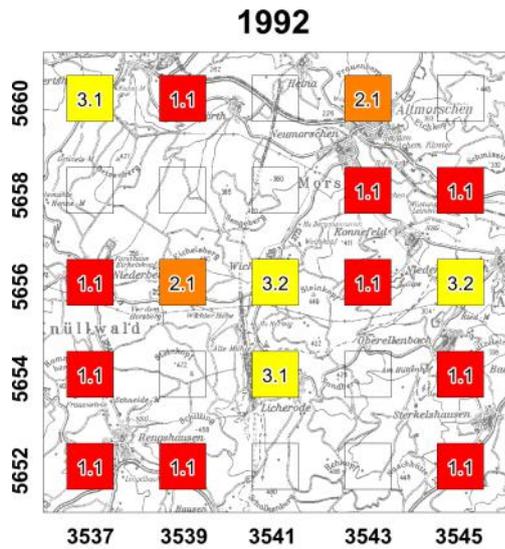


Abb. 20: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2012 an der DBF Melsungen

Die Übersichtskarte (Abb. 21) der Dauerbeobachtungsfläche belegt, dass in den vergangenen fünf Jahren an vielen Messflächen eine deutliche Verbesserung der Luftgüte eingetreten ist. So werden im Süden der DBF (Knüllwald) in 2012 erstmalig vier Messflächen grün dargestellt, was einer hohen Luftgüte entspricht.



Flechten-DBF Messungen

Entwicklung der Luftgüteindizes von 1992 - 2012 nach VDI-Richtlinie 3957, Blatt 13

Bewertung der Luftgüte ohne Berücksichtigung eutrophierender Luftschadstoffe

Luftgüte	Wirkung eutrophierender Luftschadstoffe
5. sehr hohe Luftgüte	.5 sehr stark
4. hohe Luftgüte	.4 stark
3. mittlere Luftgüte	.3 mittel
2. geringe Luftgüte	.2 gering
1. sehr geringe Luftgüte	.1 sehr gering

Kartengrundlage TK 100: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation

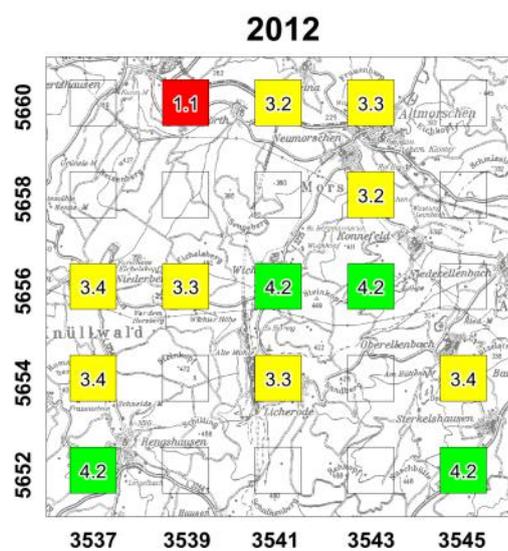
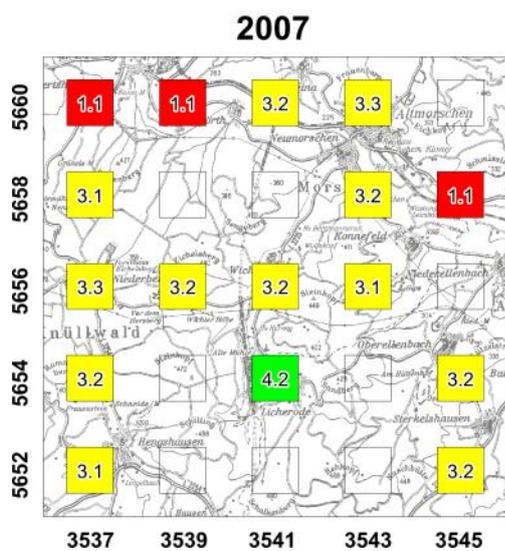
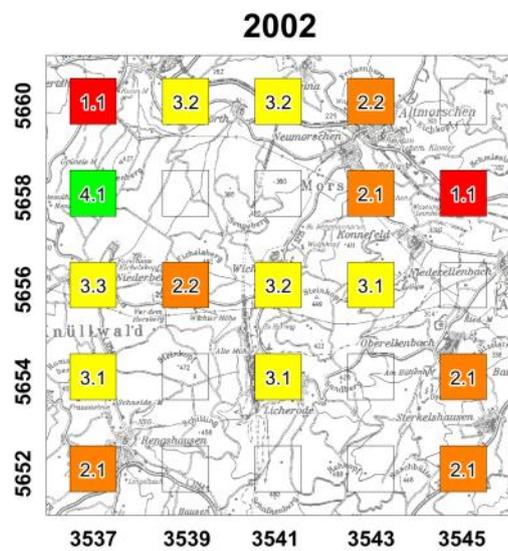
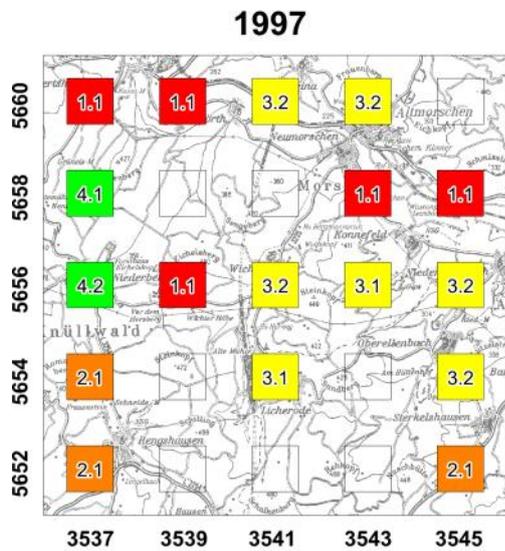


Abb. 21: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2012 an der DBF Messungen

Rhön

Die DBF Rhön wies 1992 von allen Dauerbeobachtungsflächen die höchste Flechtendiversität der Referenzarten auf (Abb. 22). Da sie 1997 nicht untersucht wurde, kann über diesen Zeitraum keine Aussage getroffen werden. In der Zeitspanne von 1992 bis 2002 ist ein deutlicher Rückgang der Referenzarten festzustellen. Seit 2002 stagniert die Diversität der Referenzarten. Bei den Eutrophierungszeigern hingegen ist ein steter Anstieg zu konstatieren.

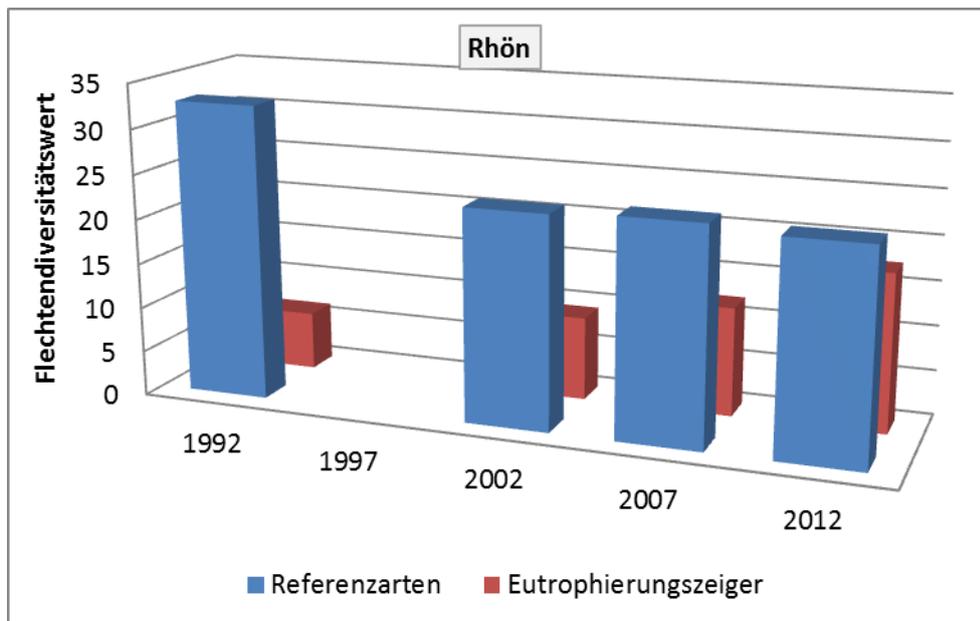
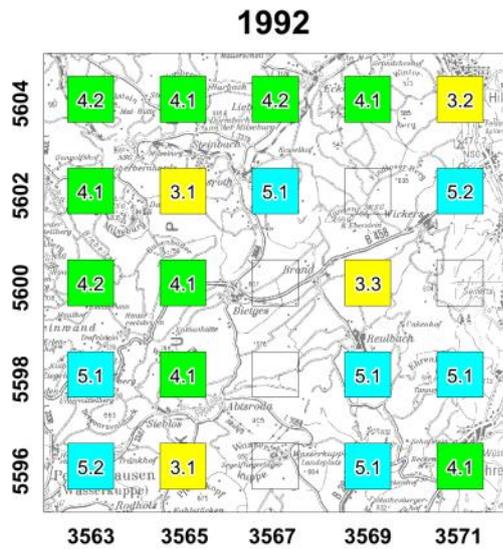


Abb. 22: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2012 an der DBF Rhön

Die Messflächenkarte (Abb. 23) der DBF Rhön zeigt, dass die ohnehin günstige lufthygienische Situation sich in den letzten fünf Jahren noch weiter verbessert hat. Statt sechs sind nur noch fünf Messflächen gelb (mittlere Luftgüte) und die Zahl der blau gekennzeichneten Messflächen hat sich von drei auf vier erhöht. Bei einem weiteren Anstieg der Eutrophierungszeiger ist allerdings in Zukunft auch an der DBF Rhön mit einer Umkehr dieses Trends zu rechnen.



Flechten-DBF Rhön

Entwicklung der Luftgüteindizes von 1992 - 2012 nach VDI-Richtlinie 3957, Blatt 13

Bewertung der Luftgüte ohne Berücksichtigung eutrophierender Luftschadstoffe Wirkung eutrophierender Luftschadstoffe

- | | | | |
|----|-----------------------|----|-------------|
| 5. | sehr hohe Luftgüte | .5 | sehr stark |
| 4. | hohe Luftgüte | .4 | stark |
| 3. | mittlere Luftgüte | .3 | mittel |
| 2. | geringe Luftgüte | .2 | gering |
| 1. | sehr geringe Luftgüte | .1 | sehr gering |

Kartengrundlage TK 100: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation

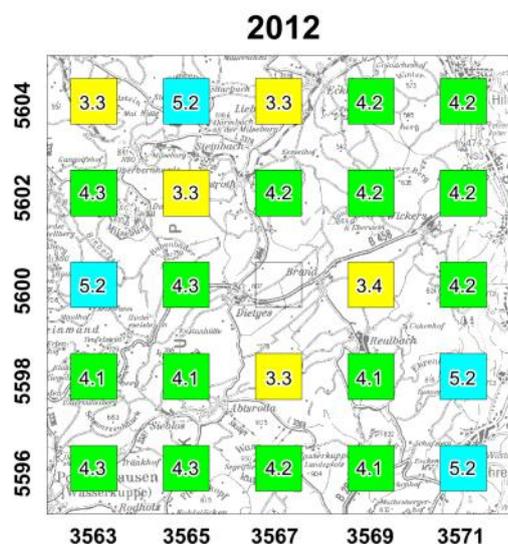
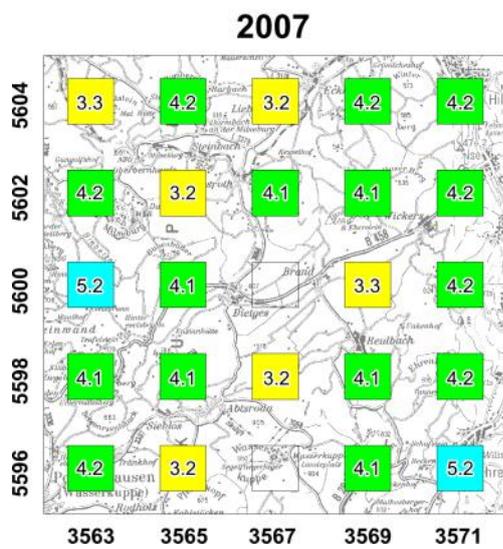
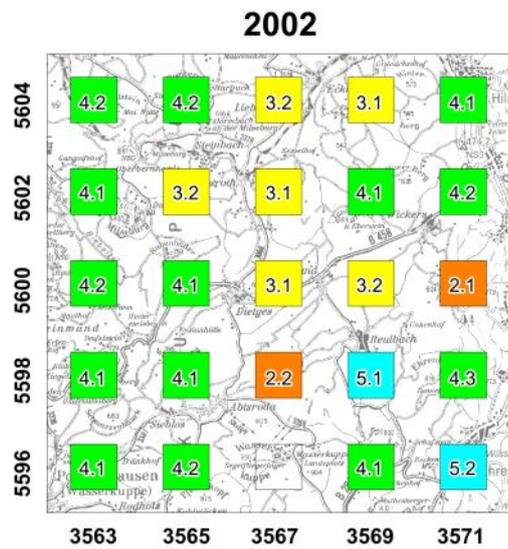
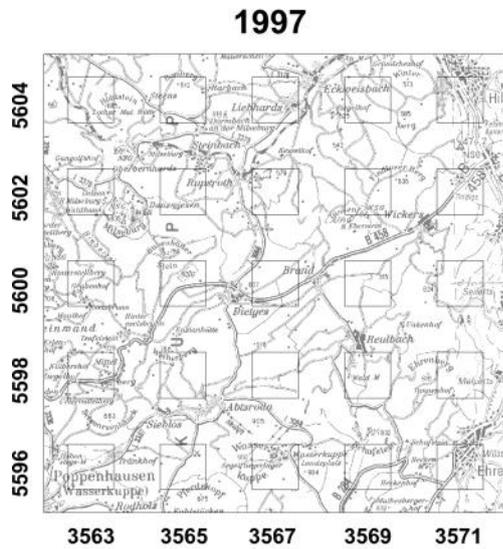


Abb. 23: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2012 an der DBF Rhön

Gießen

Die Dauerbeobachtungsfläche Gießen, 1992 als hoch belastet eingestuft, verhält sich in ihrer Flechtenentwicklung ähnlich wie Melsungen (Abb. 24). Von einem geringen Anfangsniveau ausgehend, nimmt sowohl die Zahl der Referenzarten als auch die der Eutrophierungszeiger zu. Im Gegensatz zu Melsungen tritt die Dominanz der Eutrophierungszeiger jedoch bereits 1997 zutage.

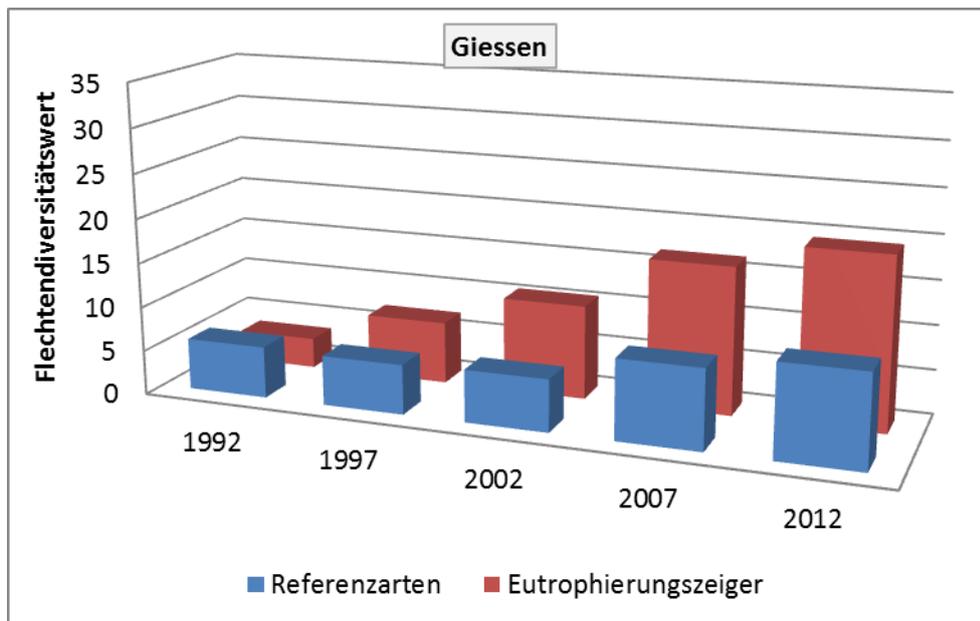
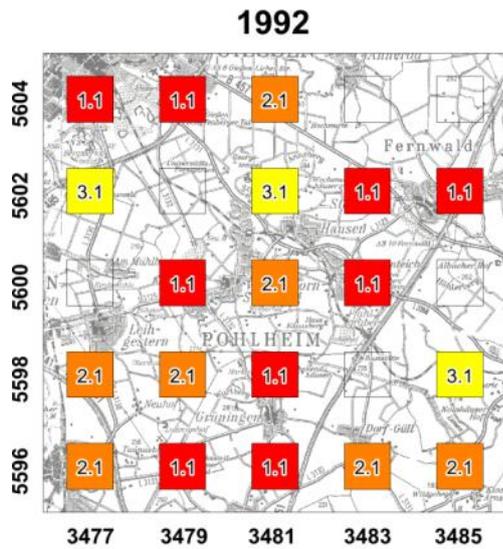


Abb. 24: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2012 an der DBF Gießen

Die Übersichtskarte (Abb. 25) der Dauerbeobachtungsfläche zeigt, dass die positive Entwicklung, die von 2002 bis 2007 eingetreten war, sich nicht fortgesetzt hat. Die Zahl der als orange (geringe Luftgüte) markierten Messflächen hat sich von drei auf vier vergrößert, so dass die Luftgüte sich insgesamt leicht verschlechtert hat. Die positive Entwicklung der Referenzarten ist durch eine überproportional starke Zunahme der Diversität der Eutrophierungszeiger hinsichtlich der Luftgüte abgewertet worden.



Flechten-DBF Giessen

Entwicklung der Luftgüteindizes von 1992 - 2012 nach VDI-Richtlinie 3957, Blatt 13

Bewertung der Luftgüte ohne Berücksichtigung eutrophierender Luftschadstoffe

Index	Luftgüte	Wirkung eutrophierender Luftschadstoffe
5	sehr hohe Luftgüte	.5 sehr stark
4	hohe Luftgüte	.4 stark
3	mittlere Luftgüte	.3 mittel
2	geringe Luftgüte	.2 gering
1	sehr geringe Luftgüte	.1 sehr gering

Kartengrundlage TK 100: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation

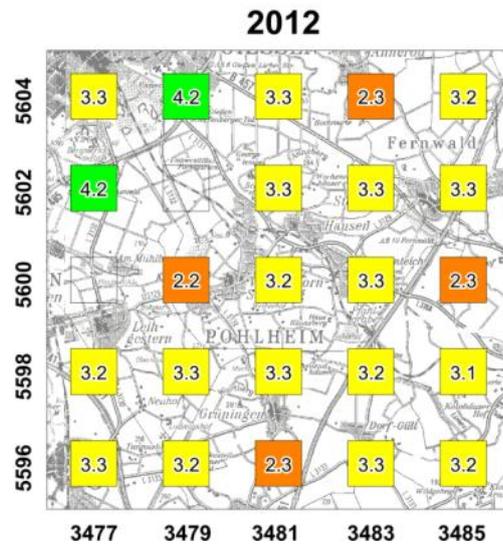
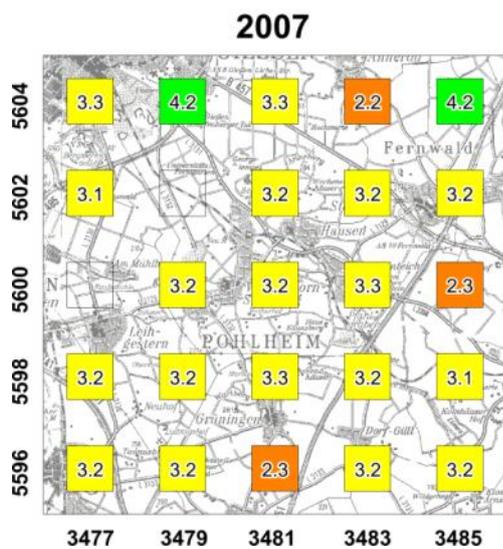
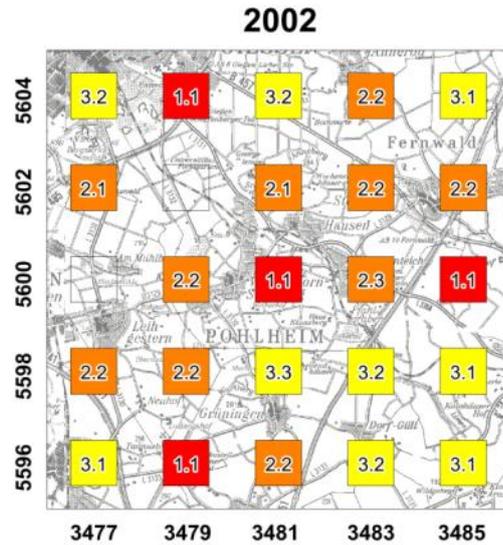
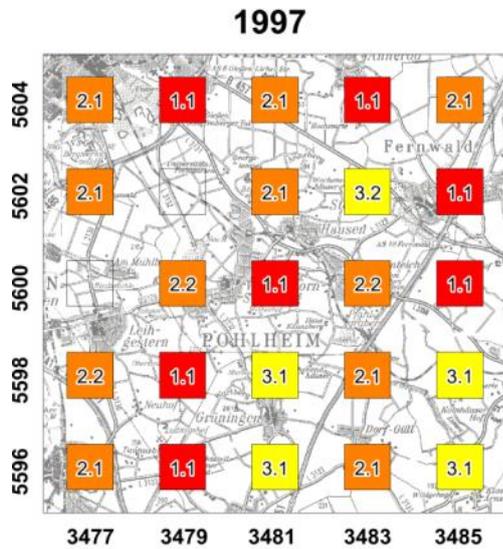


Abb. 25: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2012 an der DBF Giessen

Limburg

Die zu Anfang der Untersuchungen als vergleichsweise gering belastet eingestufte Dauerbeobachtungsfläche Limburg startete mit hohen Flechten-Diversitätswerten – insbesondere der Referenzarten (Abb. 26). Die Häufigkeit dieser Arten nimmt bis 2007 ab, erholt sich nach der Kartierung in 2012 aber wieder. Die Eutrophierungszeiger verzeichnen gleichzeitig einen steten Anstieg, der ungebrochen bis 2012 anhält. In den letzten beiden Untersuchungen 2007 und 2012 ist die Diversität der Eutrophierungszeiger erstmals höher als die der Referenzarten.

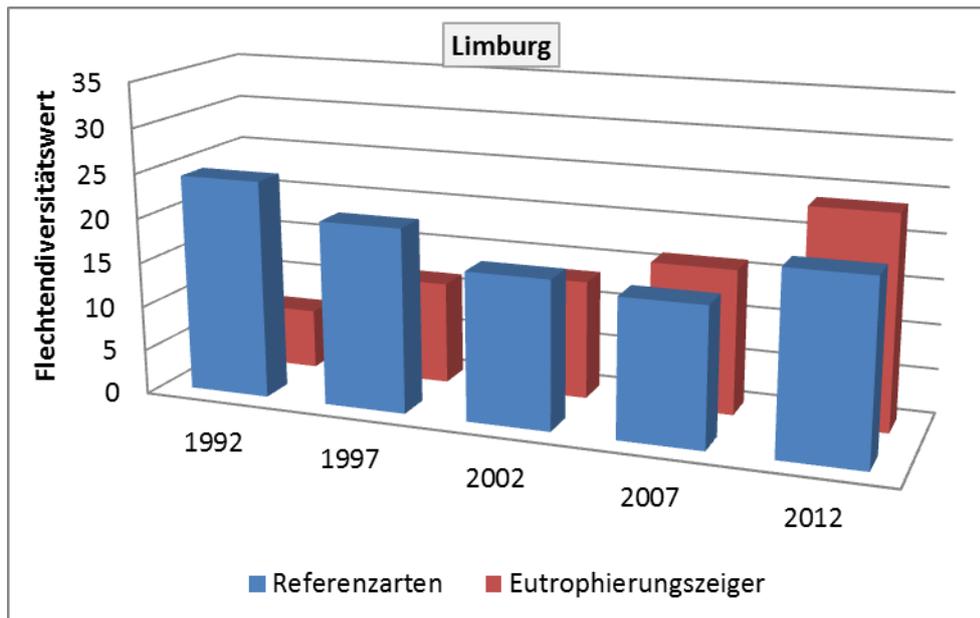
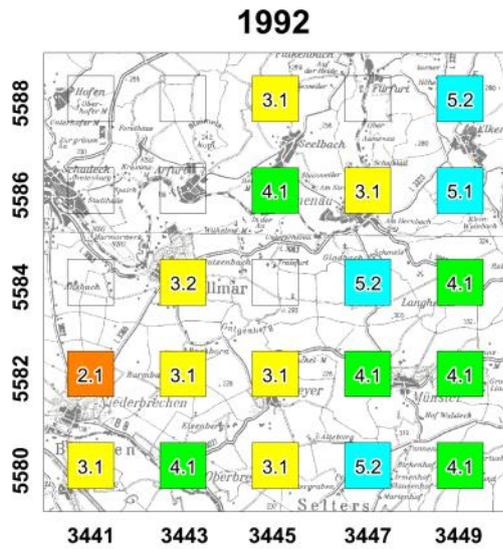


Abb. 26: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2012 an der DBF Limburg

Die Messflächenkarte (Abb. 27) der ursprünglich als gering gelasteten DBF Limburg zeigt im Verlauf des zwanzigjährigen Untersuchungszeitraumes eine relative Konstanz der Belastungssituation auf. Über den gesamten Untersuchungszeitraum ist keine Messfläche der Kategorie „Luftgüte sehr gering“ (Farbe Rot) zuzuordnen. In der Kategorie „Luftgüte gering“ (Farbe Orange) gibt es 2002 einen Anstieg auf vier Flächen, der aber 2007 und 2012 wieder auf zwei Messflächen zurückgeht. Lediglich die Zahl der blau gekennzeichneten Messflächen (sehr hohe Luftgüte) konnte seit 2007 nicht mehr erreicht werden.

Die Messfläche in Weyer (R3445/H5582) hat entgegen der sonstigen Entwicklung in der DBF Limburg im Jahr 2012 deutlich schlechtere Werte erreicht (geringe Luftgüte, orange) als bei der letzten Untersuchung in 2007 (hohe Luftgüte, grün). Dies hat methodische Ursachen. Die in 2007 kartierten Apfel- und Birnbäume waren nicht mehr geeignet und mussten durch junge Spitzahorne und Eschen ersetzt werden. Letztere trugen überwiegend Eutrophierungszeiger, die möglicherweise durch die Pflanzung mit den jungen Bäumen dorthin verbracht worden waren.



Flechten-DBF Limburg

Entwicklung der Luftgüteindizes von 1992 - 2012 nach VDI-Richtlinie 3957, Blatt 13

Bewertung der Luftgüte ohne Berücksichtigung eutrophierender Luftschadstoffe Wirkung eutrophierender Luftschadstoffe

- | | | | |
|----|-----------------------|----|-------------|
| 5. | sehr hohe Luftgüte | .5 | sehr stark |
| 4. | hohe Luftgüte | .4 | stark |
| 3. | mittlere Luftgüte | .3 | mittel |
| 2. | geringe Luftgüte | .2 | gering |
| 1. | sehr geringe Luftgüte | .1 | sehr gering |

Kartengrundlage TK 100: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation

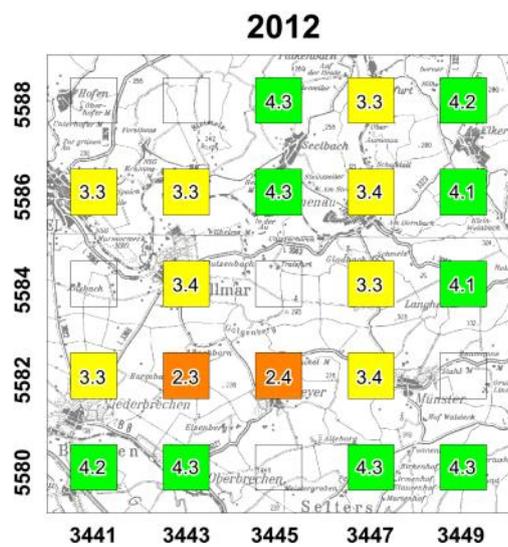
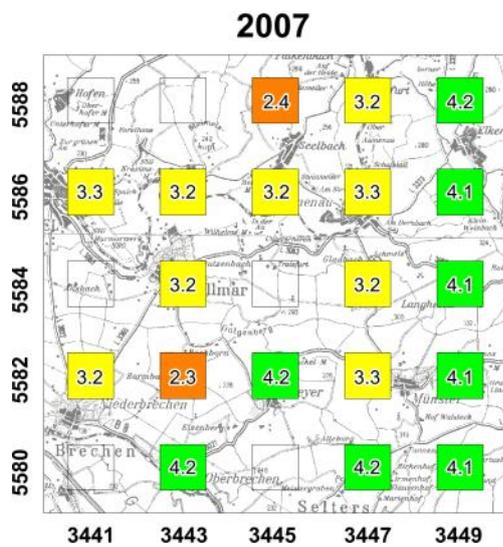
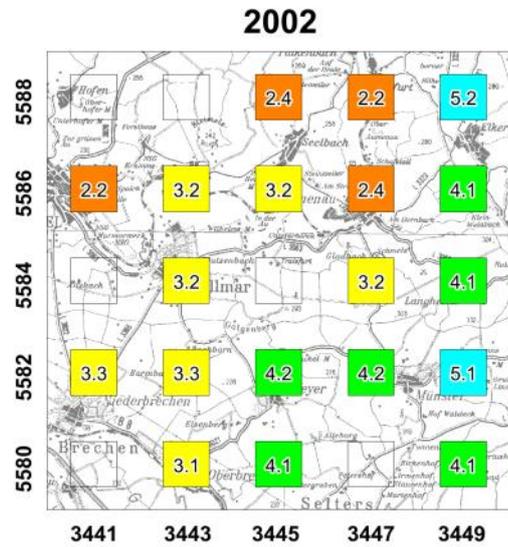
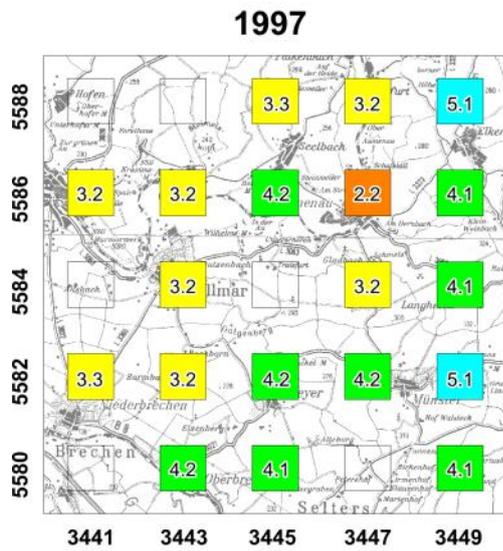


Abb. 27: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2012 an der DBF Limburg

Spessart

Die DBF Spessart – ursprünglich ebenfalls als gering belastet eingestuft – verhält sich hinsichtlich der Häufigkeitsentwicklung beider Flechtengruppen (Abb. 28) ähnlich wie Limburg. Einer vorübergehenden Abnahme der Referenzarten in 2002 und 2007 und anschließenden Erholung der Bestände steht eine Zunahme der Eutrophierungszeiger gegenüber. Allerdings ist hier bis heute noch keine Dominanz der Eutrophierungszeiger zu verzeichnen.

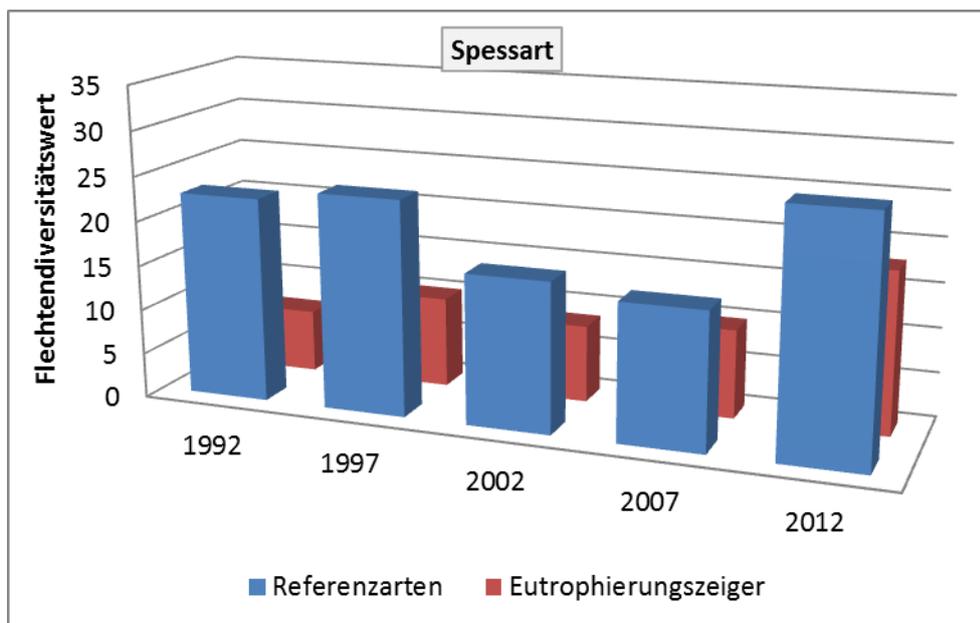
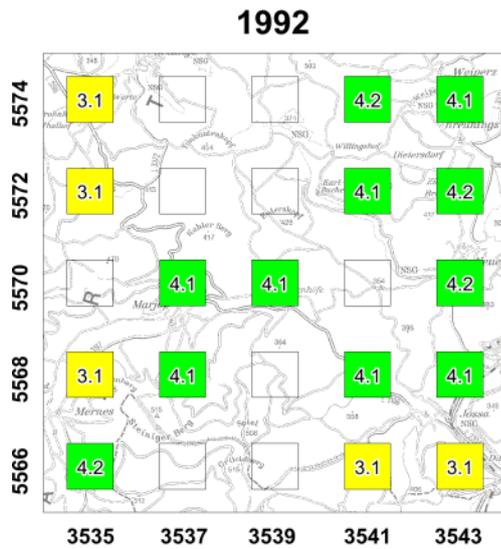


Abb. 28: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2012 an der DBF Spessart

Die Luftgütekarte der Messflächen (Abb. 29) zeigt eine Kehrtwende in den letzten fünf Jahren an. Von 1997 bis 2002 sanken die Luftgüteindizes immer weiter – allerdings bei insgesamt hohem Niveau der Werte. Aktuell stellt sich die Situation ausgesprochen gut dar. Nahezu alle Messflächen belegen eine hohe Luftgüte (grün), eine erreicht sogar mit „sehr hohe Luftgüte“ die beste Kategorie – ein Ergebnis des sprunghaften Anstiegs der Diversität der Referenzarten. Bei einem weiteren Anstieg der Eutrophierungszeiger ist allerdings in Zukunft – ähnlich wie bei der DBF Rhön – mit einer Umkehr des günstigen Trends zu rechnen.

Im Südosten der Dauerbeobachtungsfläche fand von 2007 bis 2012 an zwei Messflächen eine Erhöhung des Luftgüteindex um mehr als eine Güteklasse statt. An der Messfläche nordwestlich Altengronau (R3543/H5568) stieg die Luftgüte um zwei Stufen von „geringe Luftgüte“ (orange) auf „hohe Luftgüte“ (grün) an. Hier war die Bewertung 2007 methodisch bedingt möglicherweise zu niedrig ausgefallen. Der Verdacht, dass die Flächen, auf denen die Trägerbäume stehen, zeitweise beweidet wurden, bestätigte sich im Jahr 2012. Es wurden Ersatzbäume gewählt, die in 2012 eine hohe Luftgüte belegen. An der Messfläche südlich Jossa (R3541/H5566) wurden dieselben Bäume wie 2007 kartiert. In den fünf Jahren bis 2012 kamen im Messgitter der neun untersuchten Apfelbäume sieben Flechtenarten durch Neubesiedelung hinzu und erhöhten folglich den Luftgüteindex.



Flechten-DBF Spessart

Entwicklung der Luftgüteindizes von 1992 - 2012 nach VDI-Richtlinie 3957, Blatt 13

Bewertung der Luftgüte ohne Berücksichtigung eutrophierender Luftschadstoffe

Wirkung eutrophierender Luftschadstoffe

5.	sehr hohe Luftgüte	.5	sehr stark
4.	hohe Luftgüte	.4	stark
3.	mittlere Luftgüte	.3	mittel
2.	geringe Luftgüte	.2	gering
1.	sehr geringe Luftgüte	.1	sehr gering

Kartengrundlage TK 100: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation

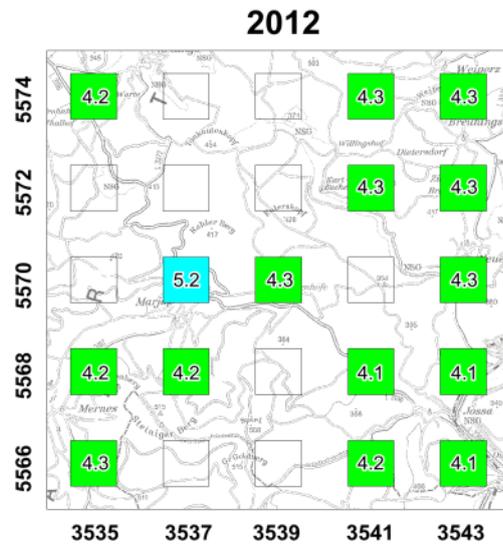
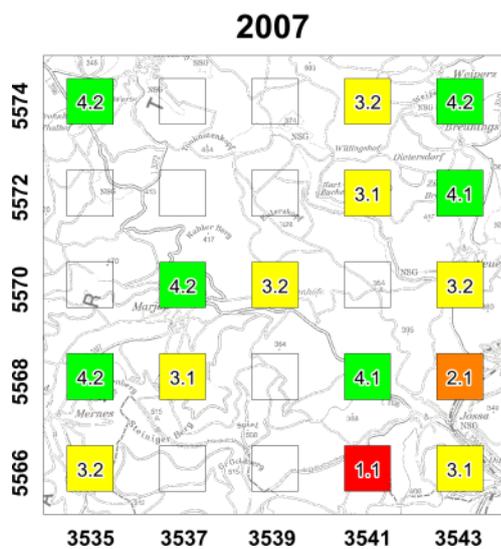
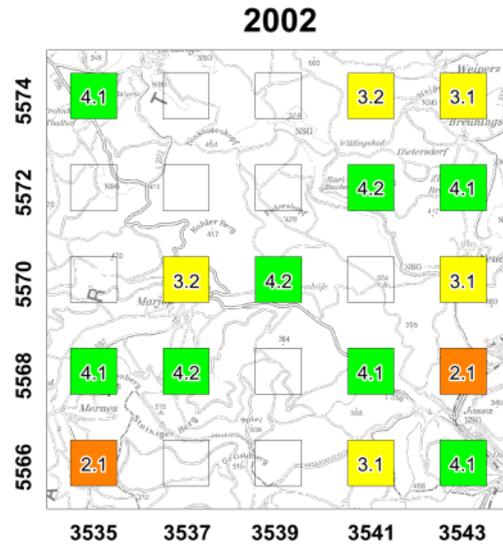
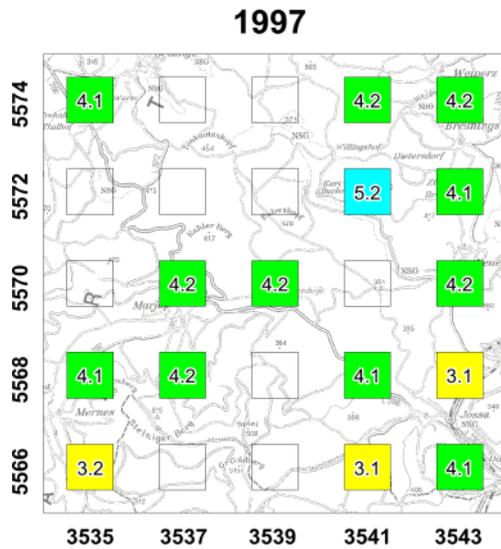


Abb. 29: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2012 an der DBF Spessart

Flughafen

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

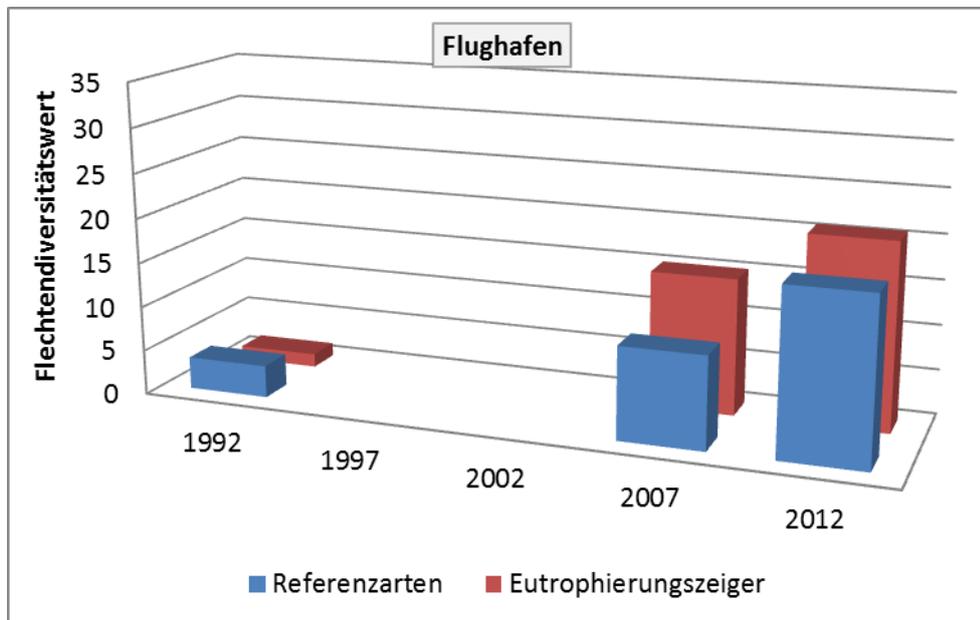
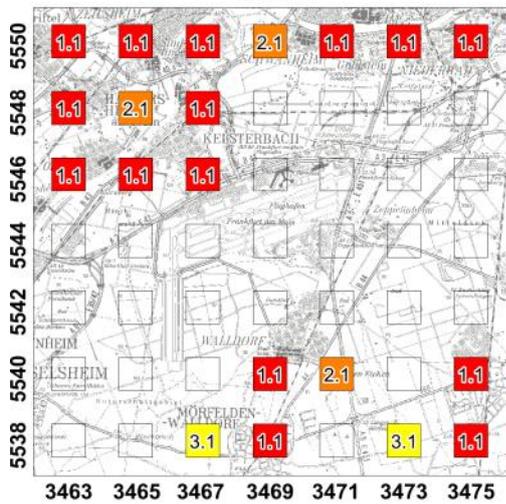


Abb. 30: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2012 an der DBF Flughafen (1997, 2002: keine Daten)

Die zeitliche Entwicklung der Luftgüte an den Messflächen im Umfeld des Frankfurter Flughafens zeigt Abb. 31. Die Zeitreihe ist lückenhaft, da 1997 und 2002 keine Kartierungen vorgenommen wurden. Dennoch lässt sich deutlich erkennen, dass sowohl von 1992 bis 2007, als auch in den letzten fünf Jahren jeweils eine deutliche Verbesserung stattgefunden hat. In der ersten Untersuchung im Jahr 1992 gehörten 75 % der damals untersuchten 20 Messstellen der schlechtesten Kategorie an (rot, sehr geringe Luftgüte). 15 % der Messstellen besaßen eine geringe Luftgüte und nur 10 % im Süden der Untersuchungsfläche hatten eine mittlere Luftgüte. Bis 2007 haben sich die Verhältnisse grundlegend gewandelt. Es ergab sich ein deutlich günstigeres Bild – eine Entwicklung, die sich bis heute fortgesetzt hat. So sind aktuell 50 % der untersuchten Flächen einer mittleren Luftgüte (gelb) zuzuordnen und 41,7 % erhalten nach der Flechtenkartierung sogar die Bewertung „hohe Luftgüte“ (grün). Eine „sehr hohe Luftgüte“ konnte bisher keine der untersuchten Flächen im Umland des Frankfurter Flughafens erreichen.

Die Lücken auf der Karte sind damit zu erklären, dass das Betriebsgelände und die Waldgebiete methodisch bedingt nicht kartiert werden konnten. Zu den detaillierten Ergebnissen der Untersuchung des Flughafengebietes liegt ein Bericht vor (WINDISCH ET AL. 2012).

1992



Untersuchungsfläche Flughafen

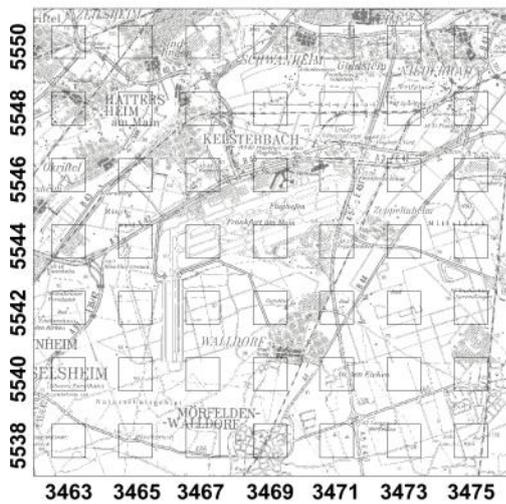
Entwicklung der Luftgüteindizes von 1992 - 2012 nach VDI-Richtlinie 3957, Blatt 13

Bewertung der Luftgüte ohne Berücksichtigung eutrophierender Luftschadstoffe Wirkung eutrophierender Luftschadstoffe

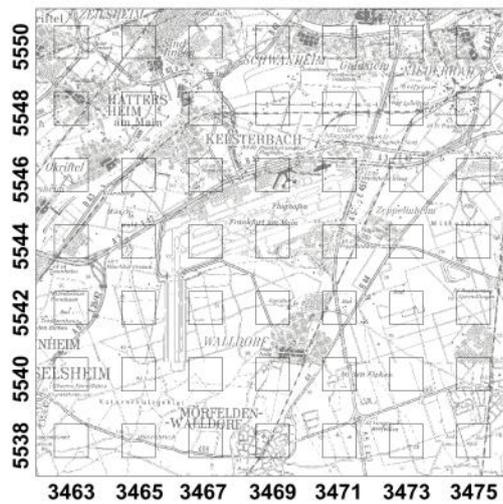
- | | | |
|--|----|-------------|
| 5 sehr hohe Luftgüte | .5 | sehr stark |
| 4 hohe Luftgüte | .4 | stark |
| 3 mittlere Luftgüte | .3 | mittel |
| 2 geringe Luftgüte | .2 | gering |
| 1 sehr geringe Luftgüte | .1 | sehr gering |

Kartengrundlage TK 100: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation

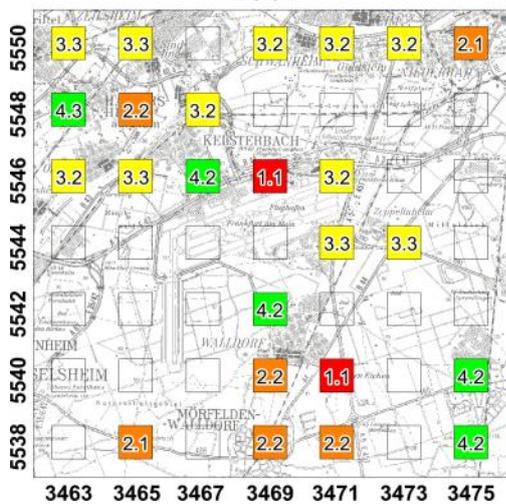
1997



2002



2007



2012

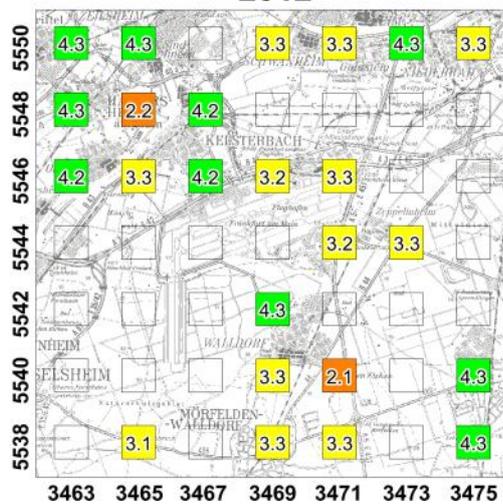


Abb. 31: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2012 an der Untersuchungsfläche Flughafen

Biebesheim

In der DBF **Biebesheim** verläuft die Entwicklung (Abb. 32) – beginnend mit einem sehr niedrigen Ausgangsniveau – ähnlich wie in den beiden anderen als ursprünglich hoch belasteten Dauerbeobachtungsflächen Melsungen und Gießen. Die Häufigkeit der Referenzarten nimmt zunächst zu; von 2002 bis 2007 ist hier allerdings ein leichter Rückgang zu verzeichnen. Bei der aktuellen Untersuchung in 2012 ist die Flechtendiversität der Referenzarten wieder angestiegen. Die Häufigkeit der Eutrophierungszeiger nimmt bis heute deutlich zu; gerade in den letzten fünf Jahren kann der Anstieg als rasant bezeichnet werden.

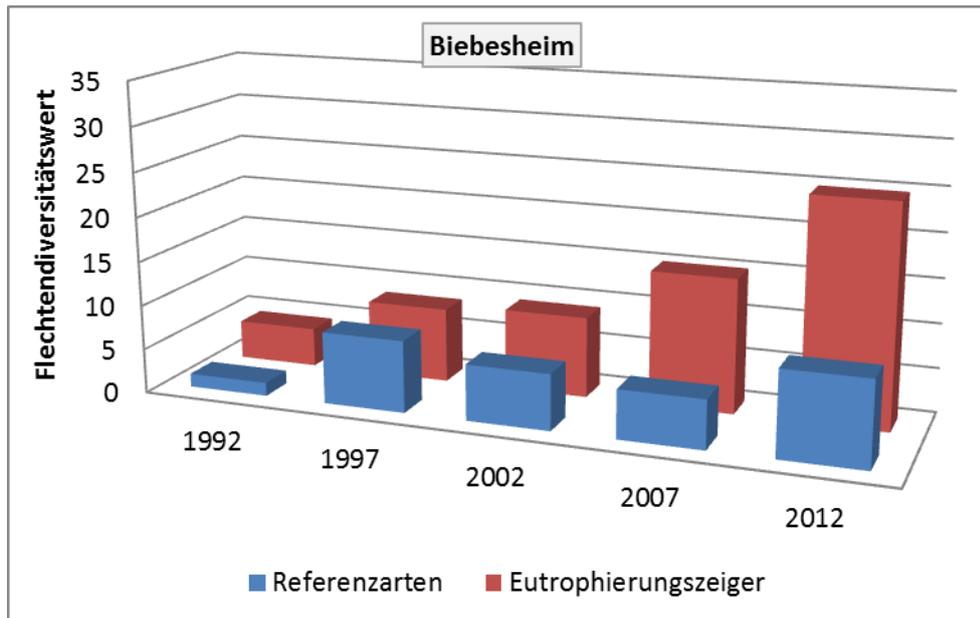
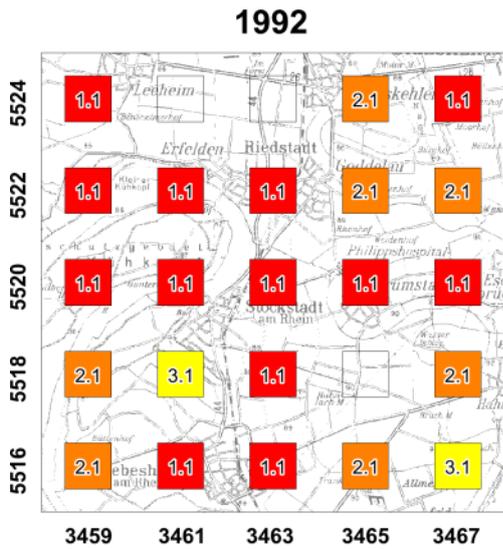


Abb. 32: Entwicklung der Flechten-Diversitätswerte von 1992-2012 an der DBF Biebesheim

Nach der Luftgütekarte der Messflächen (Abb. 33) 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 in den vergangenen fünf Jahren ist eine deutliche Erhöhung der Luftgüteindizes zu verzeichnen. In der aktuellen Kartierung musste keine der Messflächen mehr mit „sehr geringe Luftgüte“ (rot) bewertet werden. Auch die Zahl der orangenen Messflächen (geringe Luftgüte) ist deutlich zurückgegangen.



Flechten-DBF Biebesheim

Entwicklung der Luftgüteindizes von 1992 - 2012 nach VDI-Richtlinie 3957, Blatt 13

Bewertung der Luftgüte ohne Berücksichtigung eutrophierender Luftschadstoffe

Luftgüte	Wirkung eutrophierender Luftschadstoffe
5. sehr hohe Luftgüte	.5 sehr stark
4. hohe Luftgüte	.4 stark
3. mittlere Luftgüte	.3 mittel
2. geringe Luftgüte	.2 gering
1. sehr geringe Luftgüte	.1 sehr gering

Kartengrundlage TK 100: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation

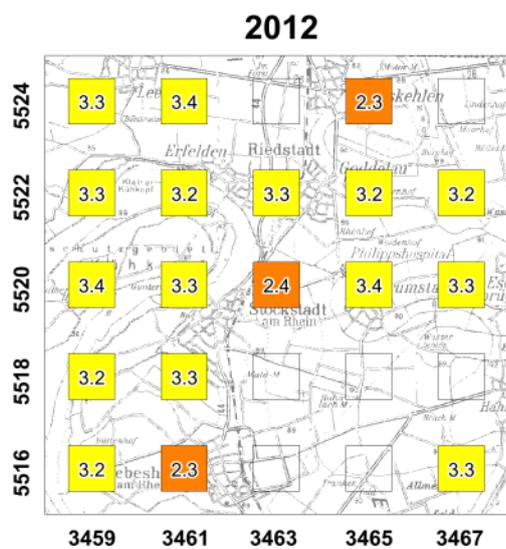
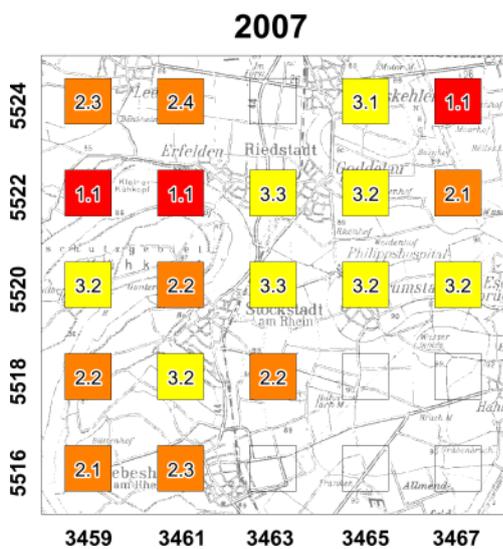
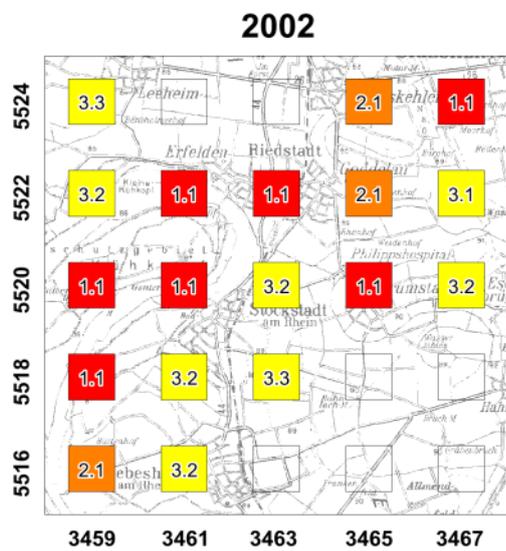
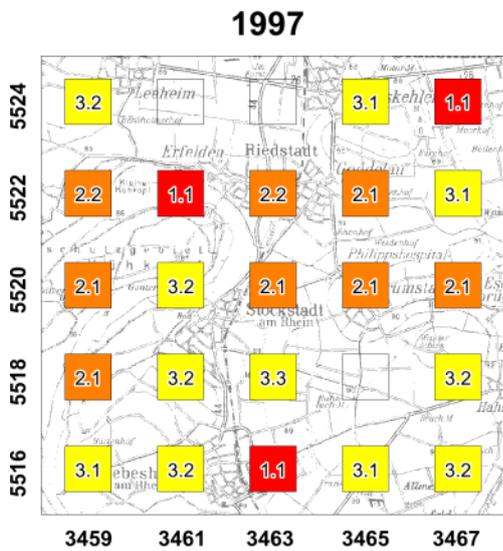


Abb. 33: Entwicklung der Luftgüte von 1992-2012 an der DBF Biebesheim

Fasst man die zeitliche Entwicklung der landesweiten Erhebung zusammen, so ist festzustellen, dass sich die durch die Flechten angezeigte lufthygienische Situation an allen Dauerbeobachtungsflächen (außer Gießen) in den letzten fünf Jahren verbessert hat. Damit wird ein Trend fortgesetzt, der seit 1992 anhält. Da der Luftgüteindex, neben eutrophierenden, insbesondere auch die Wirkungen der sauren Luftverunreinigungen widerspiegelt, ist die positive Entwicklung nachvollziehbar, denn die Konzentrationen der säurebildenden Immissionen sind in Hessen weiter rückläufig (HLUG 2013b).

Parallel zu dieser positiven Entwicklung verläuft landesweit ein Wandel im Flechtenartenspektrum, der die genannte positive Entwicklung in Zukunft umkehren könnte. Arten, die durch einen übermäßigen Nährstoffeintrag gefördert werden, nehmen kontinuierlich zu. Im landesweiten Mittel sind Eutrophierungszeiger seit 2007 häufiger anzutreffen als Referenzarten. In den letzten fünf Jahren hat sich die Begünstigung der Eutrophierungszeiger gegenüber den Referenzarten noch weiter verstärkt (Abb. 34). Betrag der Zuwachs der Flechten-Diversitätswerte für Eutrophierungszeiger von 2002 bis 2007 noch 25 %, so erhöhte er sich in den darauf folgenden fünf Jahren (2007-2012) um weitere 35 %.

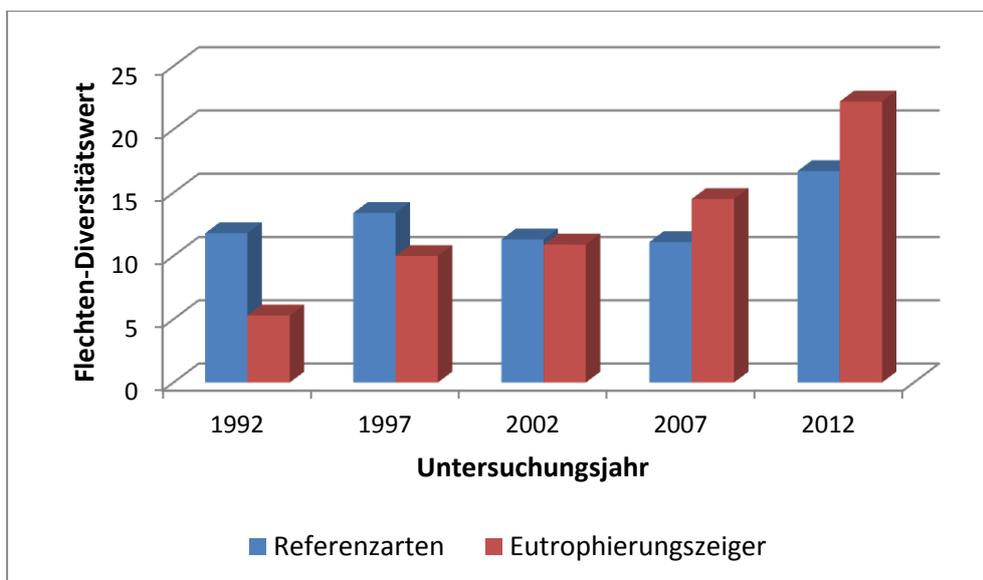


Abb. 34: Zeitlicher Verlauf der Flechten-Diversitätswerte (FDW) der Referenzarten und Eutrophierungszeiger für alle DBF (ohne Rhön und Flughafen, da diese nicht durchgehend untersucht worden waren)

Die Wirkungen der eutrophierenden Luftschadstoffe manifestieren sich in einer Verschiebung des Arteninventars und der Häufigkeit der Arten. Verschlechterte Entwicklungsbedingungen oder Schädigungen der gegen Hypertrophierung empfindlichen Flechtenarten führen zu deren Rückgang. Hinzu kommt, dass die durch düngende Verbindungen geförderten eutrophierungstoleranten Arten konkurrenzfähiger geworden sind und die Referenzarten verdrängen können.

Um Anhaltspunkte für die Ursachen des übermäßigen Nährstoffangebotes zu erhalten, wurden Daten des Umweltbundesamtes zur Deposition reaktiven Stickstoffs (BUILTJES ET AL. 2011) ausgewertet. Eine Korrelationsanalyse der Stickstoff-Depositionsdaten und der Flechtendiversität

der Eutrophierungszeiger ließ keinen Zusammenhang erkennen ($r = -0,22$). Die N-Depositionswerte liegen zwischen $11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Rheingau) und $19 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Diemelstadt, Rhön), die Einzelwerte sind dem Anhang 4 zu entnehmen. Diese Spanne ist zum einen wohl zu gering, um eine Differenzierung erwarten zu lassen. Zum anderen spielen weitere Faktoren eine Rolle. So wurde beispielsweise in der Rhön trotz der vergleichsweise hohen N-Deposition die geringste Häufigkeit von Eutrophierungszeigern kartiert (Abb. 35). Da die Rhön die Untersuchungsfläche mit den höchsten Niederschlägen ist, spielen hier möglicherweise Auswaschungsvorgänge eine Rolle. Auch die geringe Vorbelastung der DBF Rhön und Spessart könnte eine Rolle spielen. Die Baumstämme sind hier bereits dicht mit Flechten bewachsen und geben den sich ausbreitenden Eutrophierungszeigern wenig neue Besiedelungsfläche.

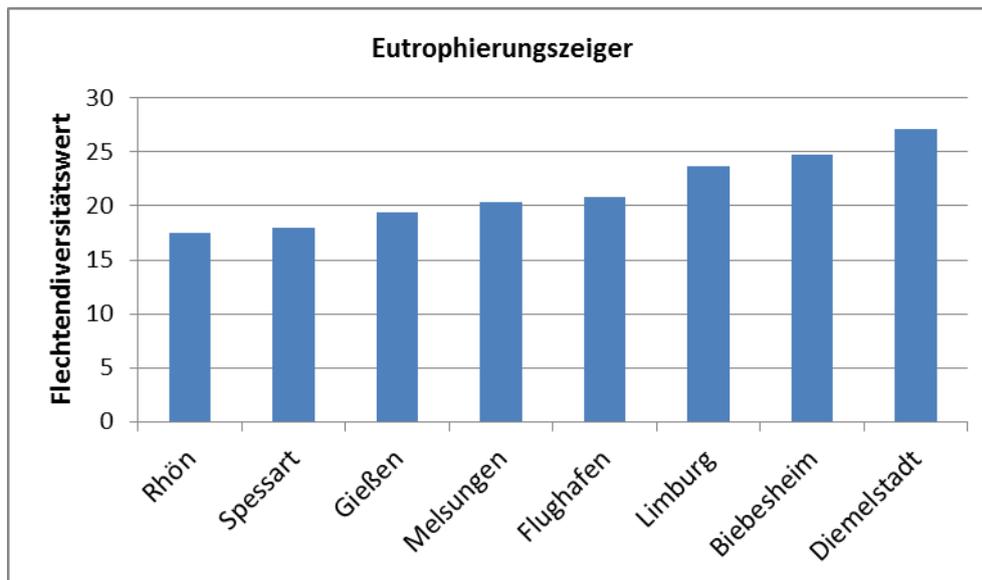


Abb. 35: Flechten-Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger im Jahr 2012

5.3.2 Folienverfahren nach VDI 3957 Blatt 8

An jeder Messfläche der untersuchten Gebiete wurde 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, musste auf einem Ersatzbaum eine neue Zeitreihe begonnen werden. Es sollen die Ergebnisse einer Auswahl von Bäumen (Tab. 9) beispielhaft dargestellt werden. An diesen Bäumen wurde in jedem Untersuchungsjahr eine Folie gezeichnet. Dargestellt wird die Entwicklung von vier häufigen Blattflechtenarten, die sich aufgrund ihrer ökologischen Ansprüche deutlich unterscheiden.

Auf den untersuchten Folien erreichte die Artengruppe *Physcia adscendens/tenella* in 2012 an allen Dauerbeobachtungsflächen die höchsten mittleren Deckungsprozente. Beide Arten sind aufgrund der Ähnlichkeit ihrer Initialstadien und ihres rasigen Wachstums bei der Folienaufnahme nicht zu trennen. Daher wurden für die folgende Betrachtung andere – ebenfalls häufige – Arten ausgewählt.

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

Nr.		Diemelst- tadt	Melsungen	Rhön	Gießen	Limburg	Spessart	Biebesheim
1	Baumnr. 2012	02-1438	11-1651	05-430	04-622	04-1089	13-948	06-315
	Baumart	Apfelbaum	Esche	Esche	Apfelbaum	Apfelbaum	Apfelbaum	Apfelbaum
	Umfang in cm	142	132	225	170	152	124	106
2	Baumnr. 2012	25-1550	12-1641	14-1348	17-3137	22-919	17-944	11-851
	Baumart	Pappel	Esche	Pappel	Pappel	Pappel	Birnbaum	Pappel
	Umfang in cm	278	153	178	200	250	172	320
3	Baumnr. 2012	06-1416	16-1584	19-1253	03-616	05-1086	20-1185	16-287
	Baumart	Esche	Spitzahorn	Spitzahorn	Esche	Spitzahorn	Esche	Pappel
	Umfang in cm	190	134	199	311	300	219	320

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

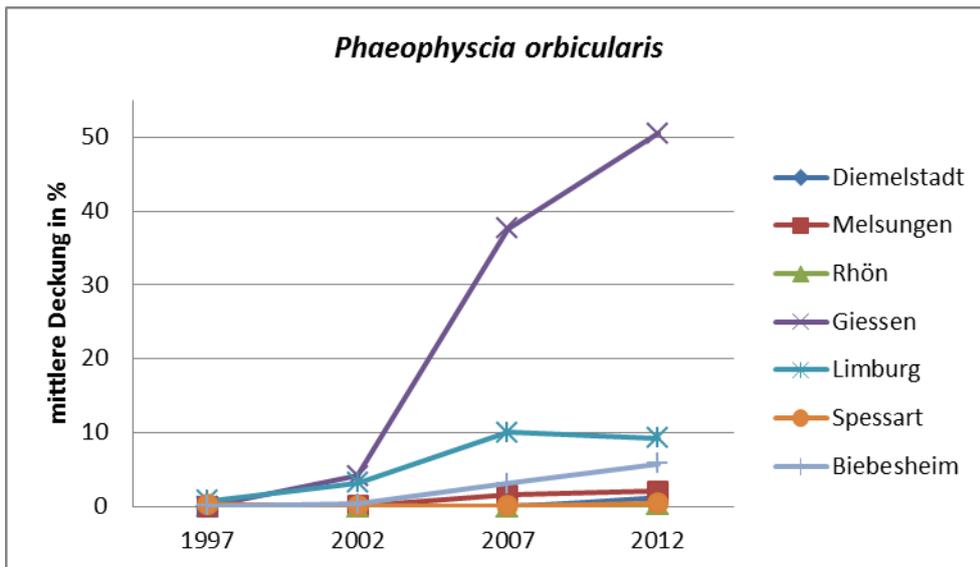


Abb. 36: Entwicklung des Deckungsgrades von *Phaeophyscia orbicularis* aus Folienaufnahmen von jeweils drei ausgewählten Bäumen pro Dauerbeobachtungsfläche

Auch die auffällige gelbe Blattflechte *Xanthoria parietina* gehört zu den Eutrophierungszeigern. In 1997 wurde sie ausschließlich an den Biebesheimer Bäumen in geringer Flächendeckung auf der Folie erfasst (Abb. 37). In Biebesheim waren die Bedingungen offensichtlich bereits im Jahr 2002 ausgesprochen günstig und die Art ist bis heute weiter gediehen, so dass sie sich bis heute etabliert hat. Auch an den anderen Dauerbeobachtungsflächen ist ein deutlicher Anstieg der Flächendeckung zu erkennen. Beobachtungen in der freien Landschaft in weiten Teilen Hessens, z. B. auch im Raum Gießen, zeigen, dass die Art sich stark ausgebreitet hat. Sie ist durch ihre kräftig gelbe Färbung (Abb. 38) und ihr Vorkommen im Kronenbereich von Sträuchern und Bäumen sehr auffällig („Vergilbung“).

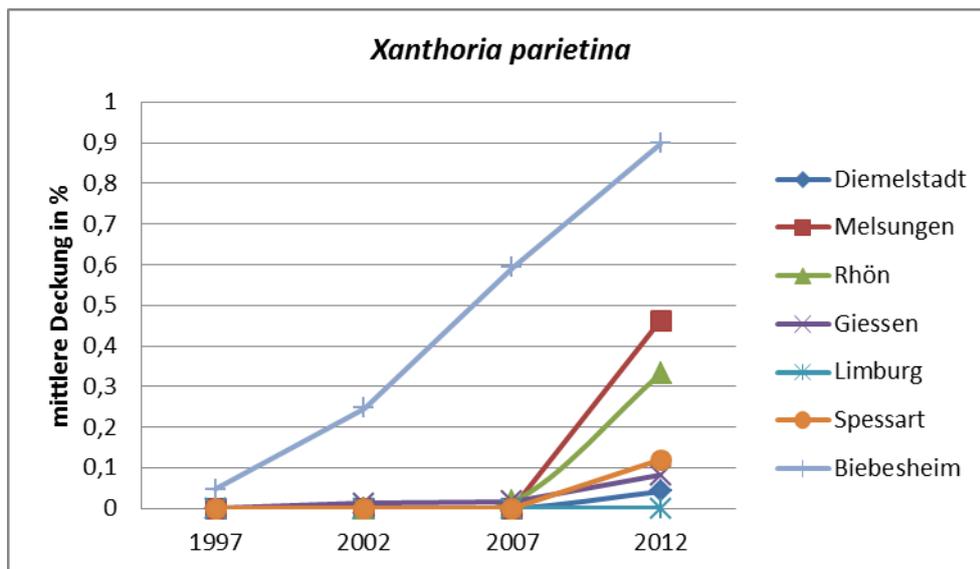


Abb. 37: Entwicklung des Deckungsgrades von *Xanthoria parietina* aus Folienaufnahmen von jeweils drei ausgewählten Bäumen



Abb. 38: Wand-Gelbflechte (*Xanthoria parietina*), ein Anzeiger für Eutrophierung

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

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

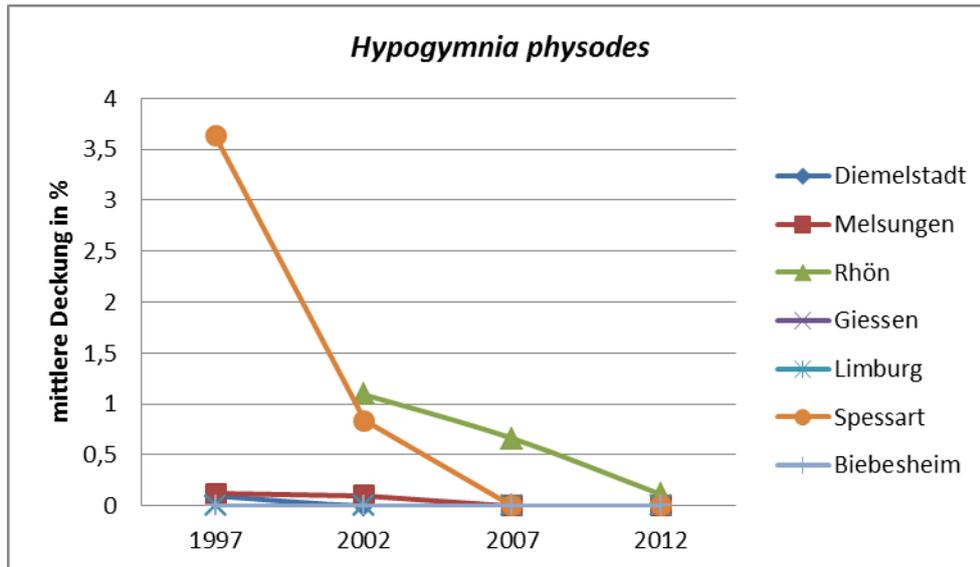


Abb. 39: Entwicklung des Deckungsgrades von *Hypogymnia physodes* aus Folienaufnahmen von jeweils drei ausgewählten Bäumen

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

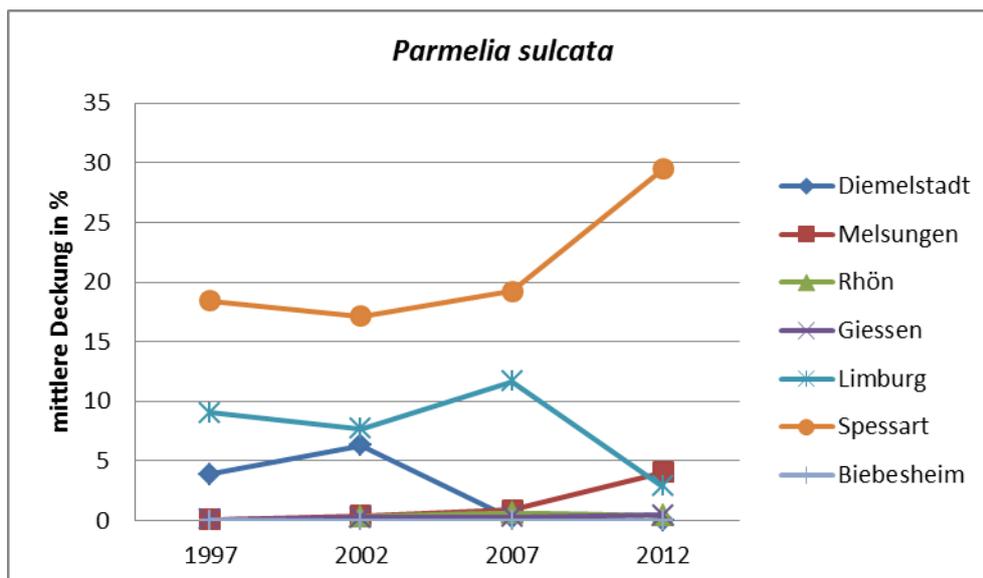


Abb. 40: Entwicklung des Deckungsgrades von *Parmelia sulcata* aus Folienaufnahmen von jeweils drei ausgewählten Bäumen



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

Das Folienverfahren erweist sich als geeignetes Instrument, um Flechtenindividuen oder Flechtenrasen detailliert zu erfassen. Die Aussagen, die mit den Ergebnissen hinsichtlich der Luftgüte getroffen werden können, decken sich weitgehend mit denen der Flechtenkartierung. Es bleibt abzuwarten, ob die Folienmethode zukünftig auch für neue Aufgabenstellungen – wie das Klimawandel-Biomonitoring – zum Einsatz kommen kann. Bisher liegt eine Zeitreihe über 15 Jahre vor, in der eine Reihe von identischen Bäumen lückenlos untersucht wurde.

5.4 Biomonitoring des Klimawandels

5.4.1 Häufigkeit der Wärmezeiger (WZ)

5.4.1.1 Standardisierte Trägerbäume „VDI-Bäume“

Da langjährige Daten aus der immissionsbezogenen Kartierung vorliegen, wird die Entwicklung der Bestände von Wärmezeigern an standardisierten Trägerbäumen dargestellt. Die Vorgehensweise entspricht weitestgehend dem derzeitigen Stand des VDI-Richtlinienentwurfes zum Klimawandel-Biomonitoring mit Flechten (VDI 3957 Blatt 20, Stand: 2013).

An den hessischen Untersuchungsflächen wurden bisher 14 der insgesamt 58 Wärmezeigerarten (= Flechten mit einem Temperaturzeigerwert von 7-9) im Messgitter der „VDI-Bäume“ gefunden. Zu Beginn der Untersuchungsreihe im Jahr 1992 waren es mit *Punctelia subrudecta* und *Physconia grisea* landesweit nur zwei Arten. Bis 1997 kamen *Flavoparmelia caperata* und *Melanohalea elegantula* hinzu. In den Folgejahren bis 2002 konnte *Flavopunctelia flaventior* neu in den untersuchten Flächen gefunden werden. Bis zum Jahr 2007 konnte ein sprunghafter Anstieg der wärmezeigenden Spezies um weitere vier Arten dokumentiert werden, der sich bis 2012 durch Hinzukommen noch weiterer fünf Arten verstärkt hat. Die mittlere Häufigkeit der 2012 gefundenen Wärmezeiger zeigt Abb. 42.

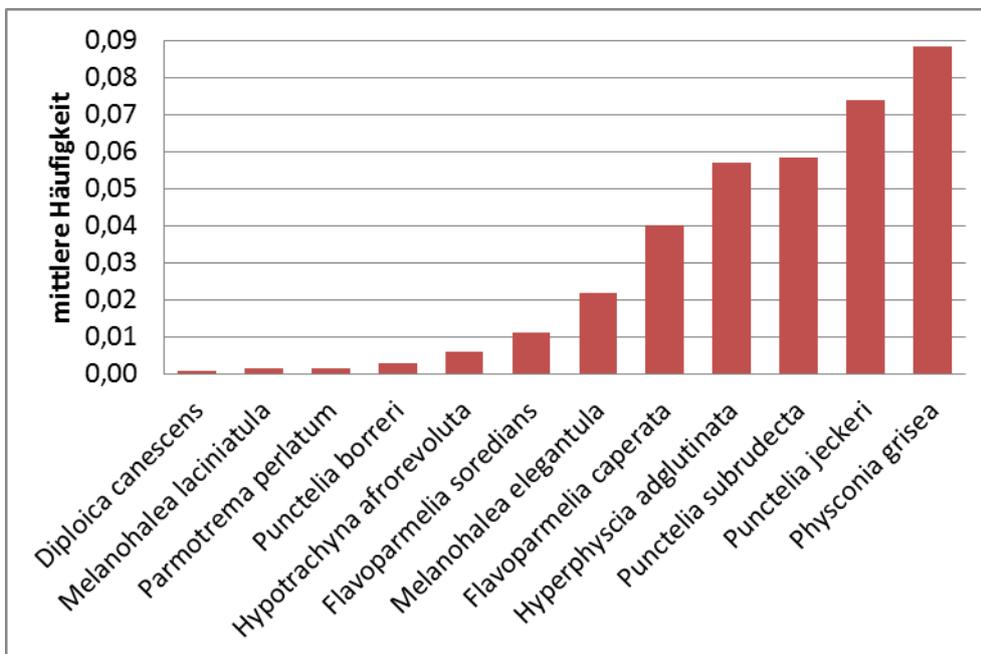


Abb. 42: Mittlere Häufigkeit der Wärmezeiger (FDW_{WZ}) in 2012 aus der Kartierung im Messgitter standardisierter Trägerbäume („VDI-Bäume“) für alle DBF

In Abb. 43 ist die mittlere Häufigkeit aller Wärmezeiger abgebildet. Ein Wert von 0,5 bedeutet, dass statistisch gesehen an der Hälfte der kartierten Bäume in einem Messgitter mit zehn Feldern (d. h. pro Baum kann jede Art maximal 10 Datensätze erzeugen) ein Wärmezeigerdatensatz erfasst wurde. An der DBF Biebesheim wurde beispielsweise 1992 an 211 Bäumen ein einziger Datensatz von Wärmezeigern aufgenommen, in 2012 kamen hier an 150 Bäumen 88 Funde von Wärmezeigern vor.

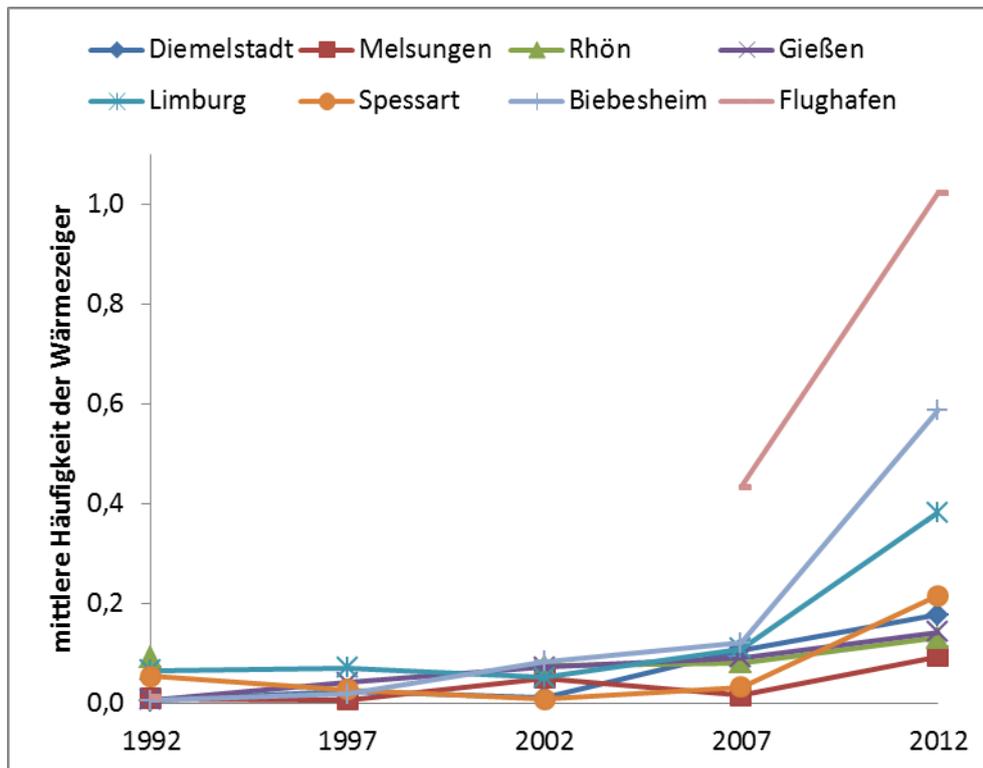


Abb. 43: Entwicklung der mittleren Häufigkeit der Wärmezeiger (FDW_{WZ}) von 1992-2012 im Messgitter standardisierter Trägerbäume; die Untersuchungsfläche Flughafen wurde 1992 (Wert: 0,01), 2007 und 2012 kartiert; die DBF Rhön wurde 1997 nicht untersucht

5.4.1.2 Nicht-standardisierte Trägerbäume „Klimabäume“

Die 2007 begonnene und in 2012 fortgesetzte Untersuchung nicht standardisierter Trägerbäume, der sogenannten Klimabäume, erfolgte nicht nur an den Untersuchungsflächen der Luftgütekartierung, sondern auch an zwei zusätzlichen Flächen (Rheingau, Odenwald). Die Zahl der jeweils untersuchten Bäume war mit 20 pro Untersuchungsfläche deutlich geringer als bei der Luftgütekartierung, an den Bäumen selbst wurde jedoch eine größere Fläche des Baumstammes auf Flechten hin untersucht.

In Abb. 44 ist die mittlere Häufigkeit der Wärmezeiger (WZ) an Klimabäumen für das Projekt abgebildet. In dieser Auswertung bedeutet ein Wert von 0,5, dass statistisch gesehen an der Hälfte der kartierten Bäume eine einzige Wärmezeigerart vorkommt (d. h. pro Baum kann jede Art maximal einen Datensatz erzeugen). An der Dauerbeobachtungsfläche Limburg wurden beispielsweise 2007 an den 20 Bäumen 13 Datensätze von Wärmezeigern aufgenommen, in 2012 hat sich die Anzahl der Funde auf 26 verdoppelt.

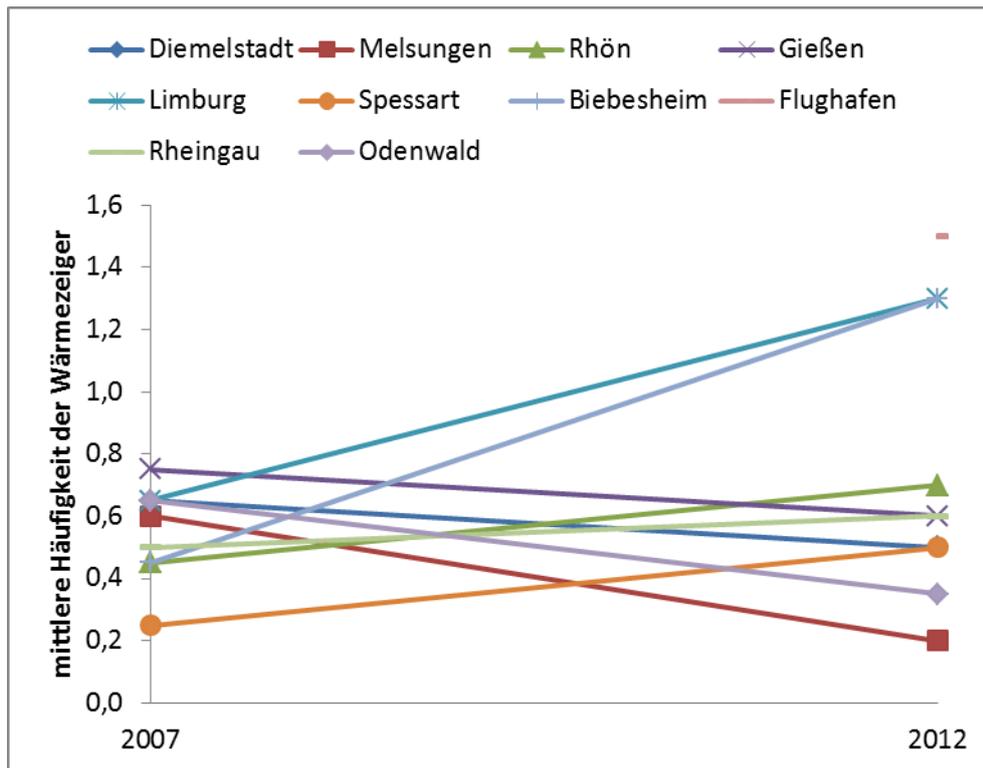


Abb. 44: Entwicklung der mittleren Häufigkeit der Wärmezeiger von 2007-2012 an jeweils 20 nicht standardisierten Trägerbäumen; für die Untersuchungsfläche Flughafen liegen nur für 2012 Daten vor

An fünf Untersuchungsflächen sind die Wärmezeiger häufiger geworden, an vier Flächen sind sie in 2012 nicht mehr so häufig wie im Jahr 2007. Am Flughafen wird in 2012 der landesweite Höchststand erreicht, allerdings liegen hier für 2007 keine Werte vor. Somit ist derzeit noch kein eindeutiger Trend zu erkennen. Der hier betrachtete, für Klimawandelfragestellungen zu kurze Zeitraum spielt dabei eine Rolle. Die vergleichsweise hohen Werte an den Untersuchungsflächen Flughafen, Limburg und Biebesheim deuten zu diesem Zeitpunkt auf eine Entwicklung hin, wie sie für die langfristigen Daten von „VDI-Bäumen“ im vorangegangenen Kapitel beschrieben sind.

Die fünf häufigsten Wärmezeiger-Arten an den nicht-standardisierten Trägerbäumen waren, ebenso wie bei den standardisierten Bäumen, die Blattflechtenarten *Flavoparmelia caperata*, *Hyperphyscia adglutinata*, *Physconia grisea*, *Punctelia jeckeri* und *Punctelia subrudecta*.

5.4.1.3 Mauern

Nach der Erstuntersuchung von Mauern in 2007 wurden auch 2012 wieder 30 vergleichbare Mauerabschnitte untersucht. Die mittlere Häufigkeit der Wärmezeiger ist Abb. 45 zu entnehmen. Ein Wert von 1 bedeutet, dass statistisch gesehen an jedem Mauerabschnitt eine einzige Wärmezeigerart vorkommt. An der Dauerbeobachtungsfläche Limburg wurden beispielsweise 2007 an 30 Mauerabschnitten 40 Datensätze von Wärmezeigern aufgenommen, in 2012 waren es 44 Datensätze.

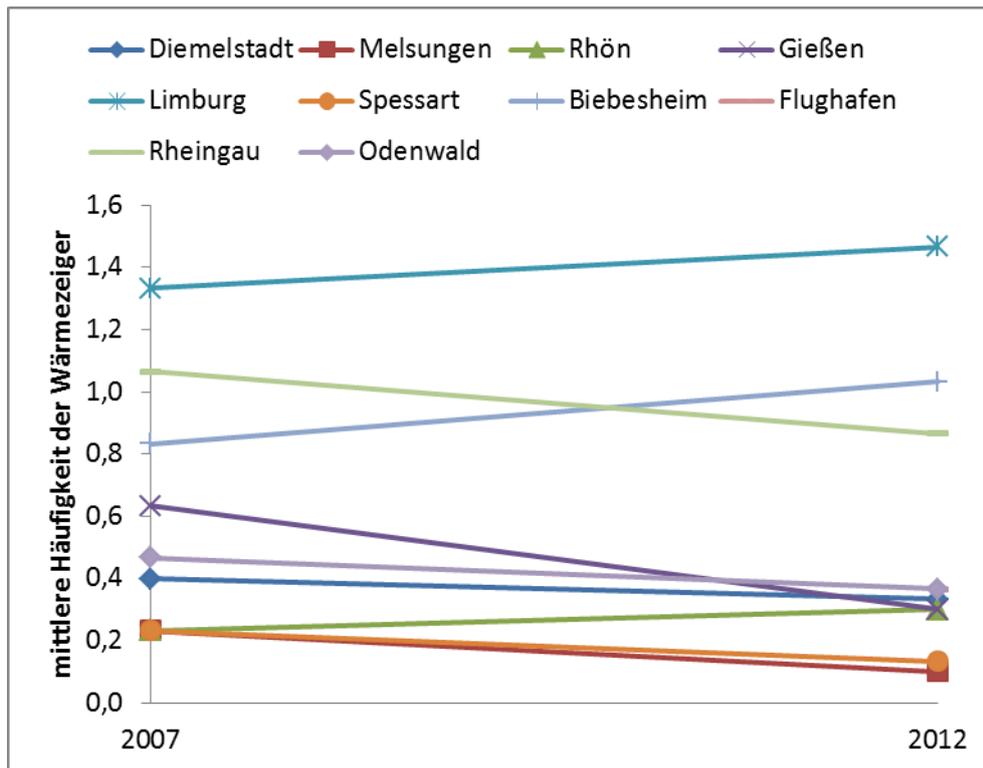


Abb. 45: Entwicklung der mittleren Häufigkeit der Wärmezeiger von 2007-2012 an jeweils 30 Mauerabschnitten; für die Untersuchungsfläche Flughafen liegen nur für 2012 Daten vor

An den Untersuchungsflächen Limburg, Biebesheim und Rhön sind die Wärmezeiger häufiger geworden, an den übrigen Flächen sind sie im Jahr 2012 nicht mehr so häufig wie noch 2007. Das Gebiet um den Flughafen erreicht einen Wert von 0,37, hier liegen für 2007 keine Werte vor. Als häufigste Art unter den Wärmezeigern auf Mauern erwies sich *Caloplaca teicholyta* (Temperaturzeigerwert: 8; Abb. 46 und 47). Landesweit kommt die wärmezeigende Art an den Mauern aller Untersuchungsflächen vor, die meisten Funde gelangen jedoch im Süden Hessens, z. B. in Limburg (an 24 von 30 Mauern), Biebesheim (an 19 von 30 Mauern) und im Rheingau (an 18 von 30 Mauern). Bisher ist eine eindeutige Tendenz bei den Wärmezeigern auf Mauern erkennbar.

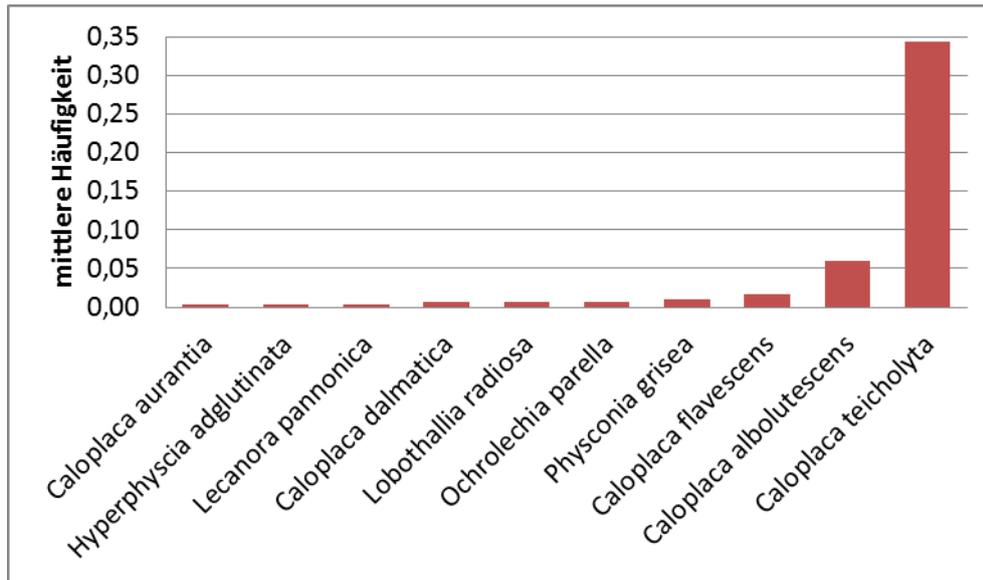


Abb. 46: Mittlere Häufigkeit der Wärmezeigerarten in 2012 aus der Kartierung von Mauern für alle DBF



Abb. 47: Ziegel-Schönfleck (*Caloplaca teicholyta*), ein Wärmezeiger auf Mauern (Foto: Kirschbaum)

5.4.2 Häufigkeit der Klimawandelzeiger (KWZ)

Die Liste der Klimawandelzeiger (vgl. Kap. 4.7.2) enthält nur epiphytische Flechten. Gesteinsflechten sind nicht enthalten, so dass hier keine Daten von Mauern betrachtet werden.

5.4.2.1 Standardisierte Trägerbäume „VDI-Bäume“

Auch hier sollen zuerst die langjährigen Daten aus der immissionsbezogenen Kartierung hinsichtlich der Entwicklung der Bestände von Klimawandelzeigern (KWZ) an standardisierten Trägerbäumen dargestellt werden. Die Vorgehensweise entspricht weitgehend dem VDI-Richtlinienentwurf (VDI 3957 Blatt 20 Stand: 2013).

An den hessischen Untersuchungsflächen wurden bisher 14 der insgesamt 46 für das Monitoring zur Verfügung stehenden Arten angetroffen. Zu Beginn der Untersuchungsreihe im Jahr 1992 war es mit *Punctelia subrudecta* landesweit nur eine Spezies. Sie wurde in allen Dauerbeobachtungsflächen außer Melsungen gefunden und hatte ihren Schwerpunkt in der Rhön (14 Datensätze) und in Limburg (8 Datensätze). Bis 1997 kamen *Flavoparmelia caperata* und *Melanohalea elegantula* hinzu. In den Folgejahren bis 2002 blieb die Zahl der KWZ weiter bei drei Arten, die Spezies wurden an den Bäumen jedoch immer häufiger angetroffen. Im Jahr 2007 konnte ein deutlicher Anstieg sowohl der Zahl der Klimawandelzeiger (sieben Arten) als auch deren Häufigkeit dokumentiert werden, der sich bis 2012 noch einmal deutlich weiter verstärkt hat.

In Abb. 48 ist die mittlere Häufigkeit für die Daten aller Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}) abgebildet. Ein Wert von 0,5 bedeutet, dass statistisch gesehen an der Hälfte der kartierten Bäume in einem Messgitter mit zehn Feldern (d. h. pro Baum kann jede Art maximal 10 Datensätze erzeugen) ein Klimawandelzeiger erfasst wurde. An der DBF Limburg wurden beispielsweise 1992 an 137 Bäumen acht Datensätze von KWZ aufgenommen, in 2012 kamen hier an 165 Bäumen 35 Funde von Klimawandelzeigern vor. Es wird deutlich, dass innerhalb des Messgitters von VDI-Bäumen bis 2007 kaum Klimawandelzeiger gefunden wurden. In den vergangenen fünf Jahren änderte sich dies: In allen Untersuchungsflächen, in denen eine immissionsbezogene Flechtenkartierung durchgeführt wurde, ist ein Anstieg von Klimawandelzeiger-Datensätzen zu verzeichnen. Besonders augenfällig ist, dass im Umland des Flughafens die Häufigkeit der Klimawandelzeiger um ein Vielfaches höher war, als in allen übrigen Untersuchungsgebieten.

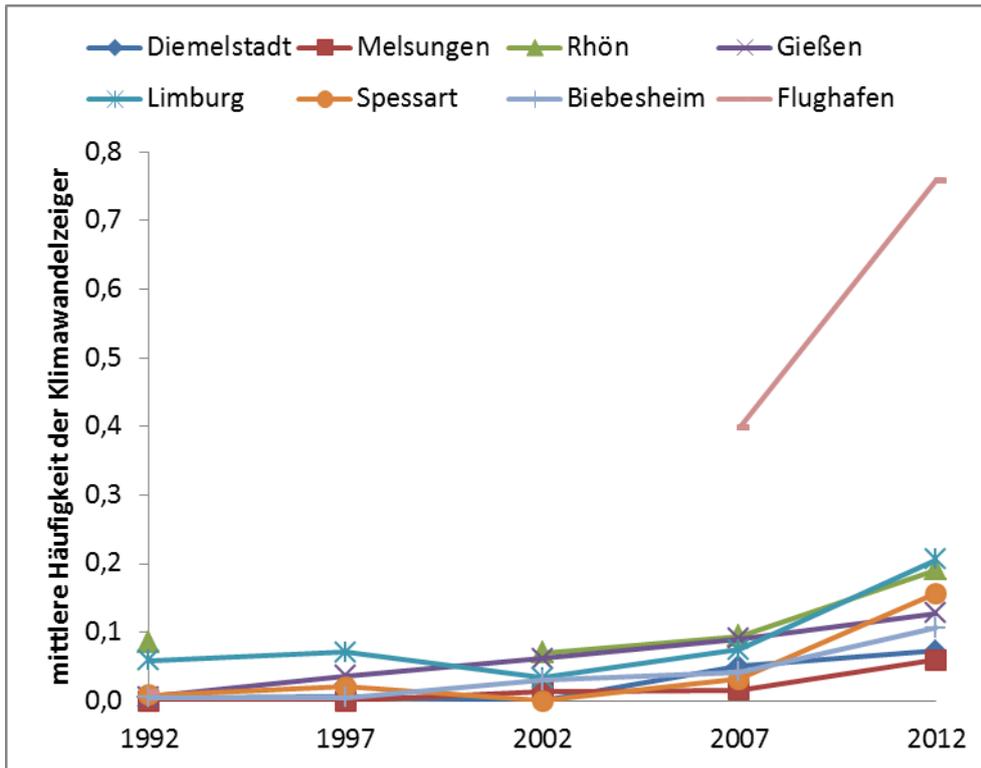


Abb. 48: Entwicklung der mittleren Häufigkeit der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}) von 1992-2012 im Messgitter standardisierter Trägerbäume; die Untersuchungsfläche Flughafen wurde 1992 (Wert: 0,01), 2007 und 2012 kartiert; die DBF Rhön wurde 1997 nicht untersucht

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der Klimawandelzeiger im Messgitter von VDI-Bäumen nur für die letzten fünf Jahre (Abb. 49), wird deutlich, dass ein räumliches Muster besteht. Die Klimawandelzeiger sind in den nordhessischen DBF Diemelstadt und Melsungen bis heute noch selten anzutreffen. In der südlichen Landeshälfte ist innerhalb von fünf Jahren ein Wandel eingetreten. Die Häufigkeit der Klimawandelzeiger hat sich dort an allen untersuchten Flächen erhöht. Besonders interessant ist hier das Gebiet um den Flughafen, das schon 2007 deutlich mehr dieser Zeigerarten trug und sich bis 2012 noch weiter gesteigert hat. Der Flughafen gehört mit Biebesheim zu den wärmsten und niederschlagsärmsten der untersuchten Gebiete in Hessen.

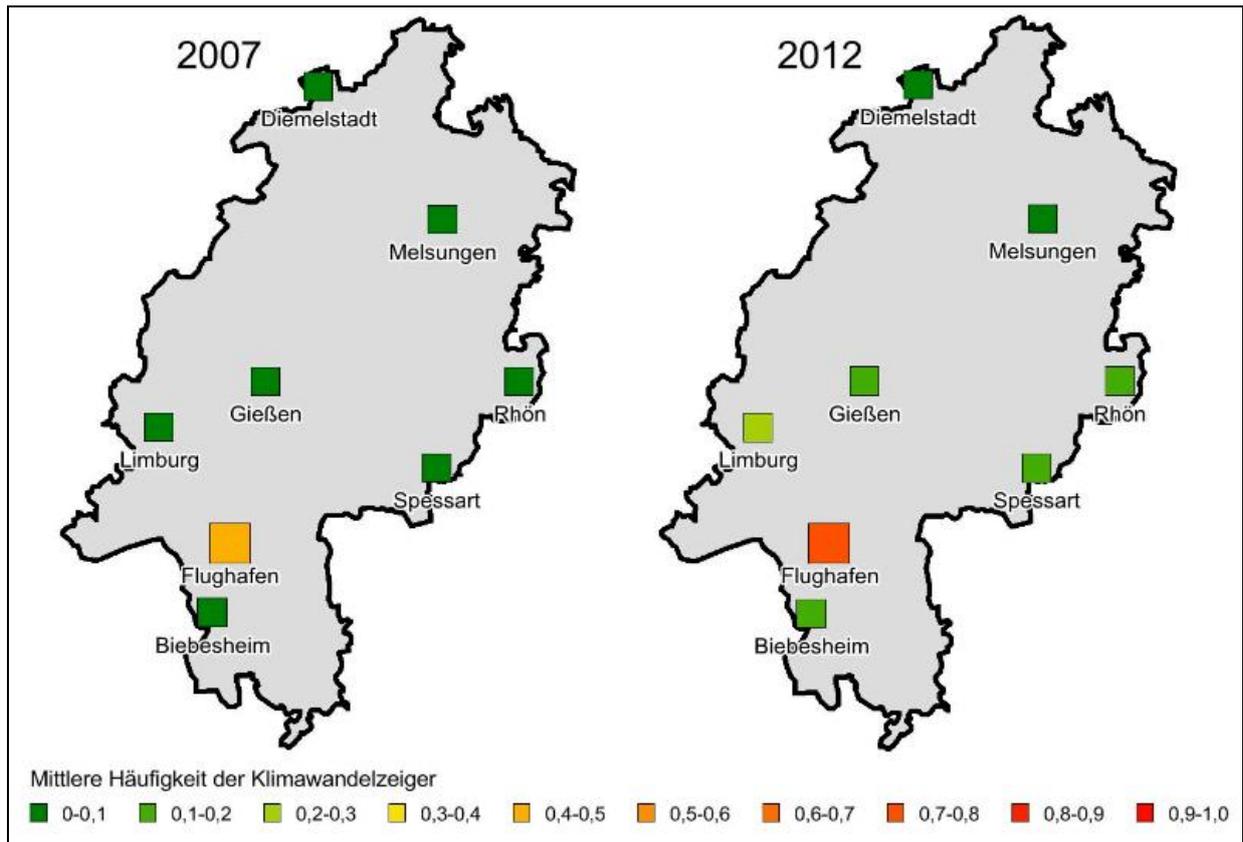


Abb. 49: Karte der mittleren Häufigkeit der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}) aus der Kartierung im Messgitter standardisierter Trägerbäume („VDI-Bäume“)

In 2012 wurden im Messgitter standardisierter Trägerbäume 14 Klimawandelzeiger angetroffen (Abb. 50). Ihr Schwerpunkt liegt in den Untersuchungsgebieten Flughafen (9 Arten) und Limburg (8 Arten). Zu den häufigen Klimawandelzeigern gehört eine Reihe großlappiger Blattflechten, z. B. aus den Gattungen *Punctelia* (Abb. 51) und *Flavoparmelia* (Abb. 52).

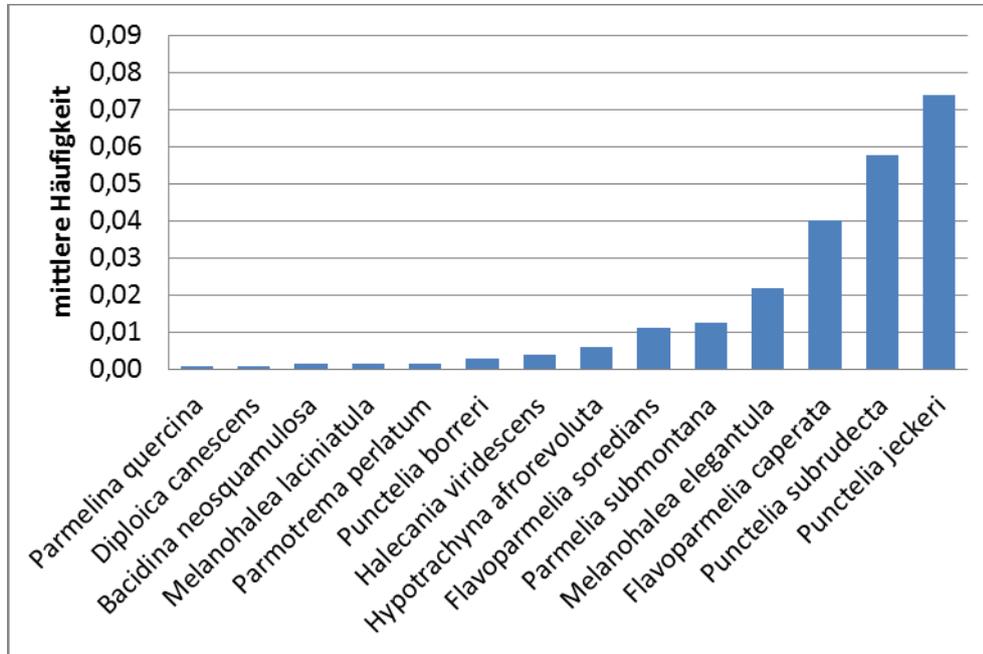


Abb. 50: Mittlere Häufigkeit der Klimawandelzeigerarten (FDW_{KWZ}) in 2012 aus der Kartierung im Messgitter standardisierter Trägerbäume („VDI-Bäume“) für alle DBF



Abb. 51: Gefleckte Punktflechte (*Punctelia subrudecta*), ein Klimawandelzeiger in Hessen (Foto: Kirschbaum)



Abb. 52: Caperatflechte (*Flavoparmelia caperata*), ein Klimawandelzeiger in Hessen
(Foto: Kirschbaum)

5.4.2.2 Nicht-standardisierte Trägerbäume „Klimabäume“

Die 2007 begonnene und in 2012 fortgesetzte Untersuchung des gesamten Stammes nicht standardisierter Trägerbäume, der sogenannten „Klimabäume“, erfolgte nicht nur an den Dauerbeobachtungsflächen der Luftgütekartierung, sondern auch an drei zusätzlichen Flächen (Flughafen, Rheingau, Odenwald). Die Zahl der jeweils untersuchten Bäume war mit 20 pro Untersuchungsfläche deutlich geringer als bei der Luftgütekartierung.

Hier wurden an den landesweit 10 untersuchten Flächen aktuell insgesamt 11 Klimawandelzeiger gefunden (Abb. 53). Vier Arten davon (*Bacidina neosquamulosa*, *Hypotrachyna afrorevoluta*, *Hypotrachyna revoluta*, *Parmotrema perlatum*) sind in den vergangenen fünf Jahren neu hinzugekommen. Die Blattflechtenarten *Punctelia jeckeri*, *Punctelia subrudecta* und *Flavoparmelia caperata* waren in beiden Untersuchungsjahren die häufigsten Spezies unter den Klimawandelzeigern.

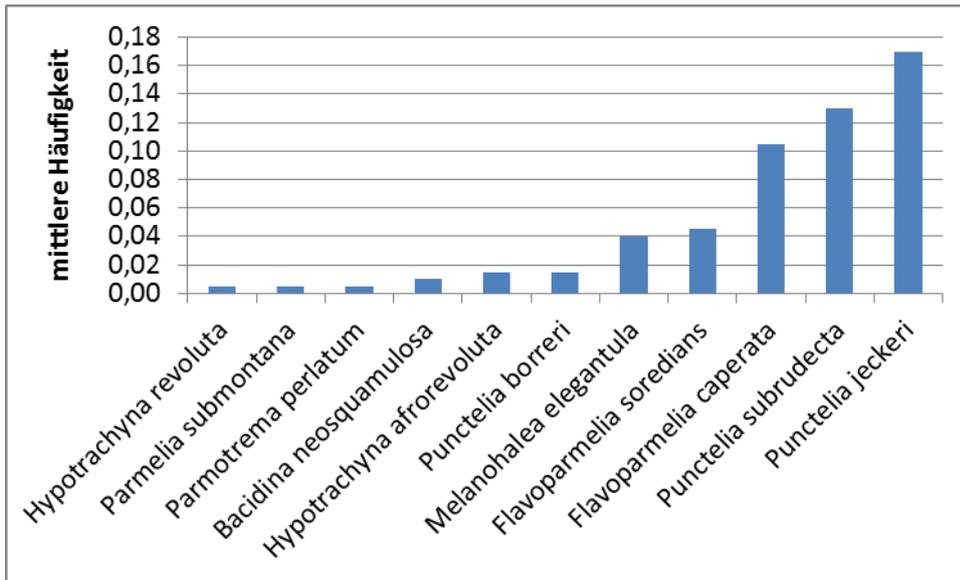


Abb. 53: Mittlere Häufigkeit der Klimawandelzeiger in 2012 aus der Kartierung nicht standardisierter Trägerbäume („Klimabäume“) für alle DBF

In Abb. 54 ist der Klimawandelzeigerindex (KWI), das heißt, die mittlere Häufigkeit der Klimawandelzeiger für 2007 und 2012 abgebildet. In dieser Auswertung bedeutet ein Wert von 0,5, dass statistisch gesehen an der Hälfte der kartierten Bäume eine einzige Art der KWZ vorkommt (d. h. pro Baum kann jede Art maximal einen Datensatz erzeugen). An der Dauerbeobachtungsfläche Spessart wurden beispielsweise 2007 an 20 Bäumen fünf Datensätze von KWZ aufgenommen, in 2012 waren es bei gleicher Anzahl von Bäumen bereits zehn Funde von Klimawandelzeigern.

Bis zum Jahr 2012 etablierten sich klimawandelzeigende Flechtenarten an den „Klimabäumen“ aller untersuchten Flächen. An acht der neun in beiden Jahren untersuchten Gebiete sind in 2012 mehr Klimawandelzeiger angetroffen worden, als fünf Jahre zuvor. An der Dauerbeobachtungsfläche Gießen ist die Häufigkeit der Klimawandelzeiger auf dem gleichen Niveau geblieben. Die Untersuchungsfläche Flughafen erbrachte im aktuellen Untersuchungsjahr die höchste Häufigkeit, hier liegen jedoch für 2007 keine Werte vor.

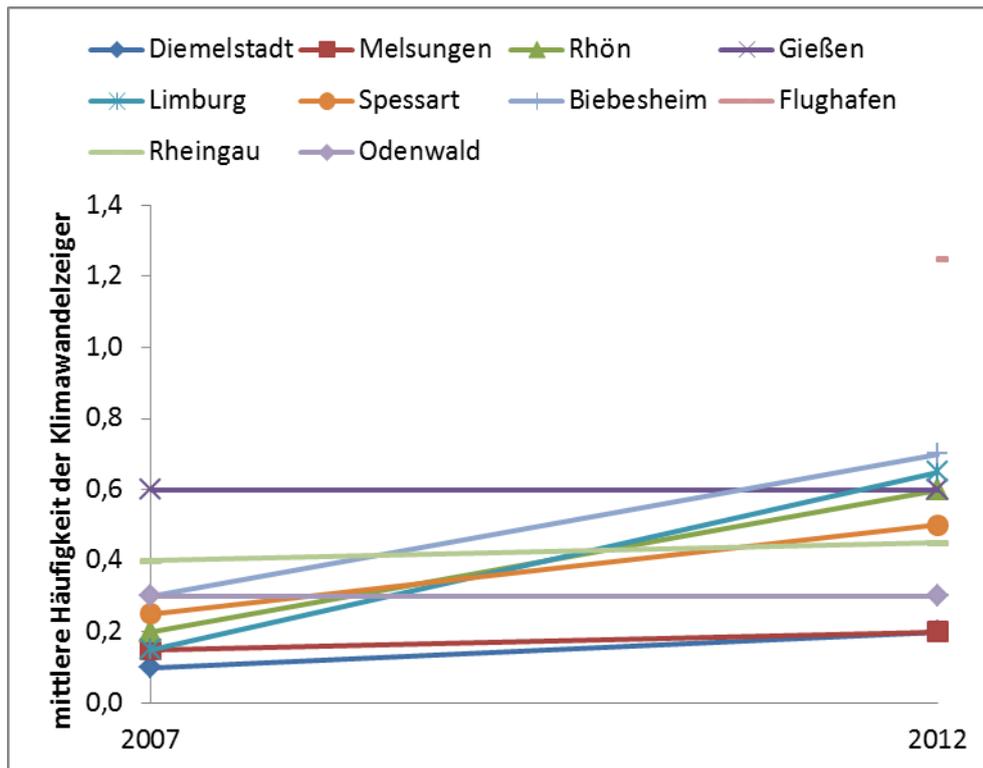


Abb. 54: Entwicklung des Klimawandelindex (KWI) von 2007-2012 an jeweils 20 nicht standardisierten Trägerbäumen; für die Untersuchungsfläche Flughafen liegen nur für 2012 Daten vor

Nachdem nun die Entwicklung der Indikatorarten nach verschiedenen Auswertungsvarianten dargestellt wurde, soll abgeschätzt werden, inwieweit die vorliegenden Daten mit Klimadaten korrelieren.

5.4.3 Zusammenhänge zwischen Flechten- und Klimadaten

Um die Zusammenhänge zwischen Flechtendaten und Klima- bzw. Depositionsdaten zu quantifizieren, wurden Korrelationsanalysen durchgeführt (Abb. 55).

Die mittlere Häufigkeit entspricht dem Flechten-Diversitätswert (FDW). Dabei wurden mittlere Häufigkeiten von Wärmezeigern (FDW_{WZ}), Klimawandelzeigern (FDW_{KWZ}) sowie der Zeigerarten *Caloplaca teicholyta* (C_{teich} , wärmeliebende Gesteinsflechte) und *Punctelia jeckeri* (P_{jeck} , wärmeliebende Rindenflechte) herangezogen. Zusätzlich wurden Flechten-Diversitätswerte von Eutrophierungszeigern (FDW_{Eu}) und Nicht-Eutrophierungszeigern (FDW_{Ref} = Referenzarten) in die Auswertung aufgenommen.

Mit der vorliegenden Auswertung wird jeweils nur ein Parameter betrachtet, in Freilanduntersuchungen wirken aber immer viele Faktoren auf die Flechten ein. Daher sind hier Korrelationen

über 0,7 bereits als hoch zu betrachten. Es zeigten sich Blöcke mit deutlichen Zusammenhängen, die in Abb. 55 farblich markiert sind.

- **Häufigkeit epiphytischer Wärmezeiger – Mitteltemperaturen (roter Block)**
Zwischen der Häufigkeit der epiphytischen Wärmezeiger (sowohl an „Klimabäumen“ als auch an „VDI-Bäumen“) und den Mitteltemperaturen bestehen höhere Korrelationen. An den standardisierten Trägerbäumen („VDI-Bäumen“) ist der Zusammenhang jeweils deutlicher als an den Klimabäumen. Die Korrelationen mit den Jahresmitteltemperaturen sind stärker für den Zeitraum der letzten 10 Jahre als für den Zeitraum der vergangenen 30 Jahre. Alle Jahreszeiten erreichen einen starken Zusammenhang, besonders aber der Sommer und der Herbst.
- **Häufigkeit epiphytischer Klimawandelzeiger – Mitteltemperaturen (violetter Block)**
Die Häufigkeit der epiphytischen Klimawandelzeiger zeigt nur mittlere Korrelationen zu den Mitteltemperaturen. Hier spielen also weitere Faktoren eine Rolle. Der Vergleich der Korrelationen der Klimawandelzeiger-Daten von „VDI-Bäumen“ (Erfassung nur im Messgitter) mit denen von „Klimabäumen“ (Erfassung des gesamten Baumstammes) ergibt, dass bei den Klimabäumen engere Zusammenhänge zu den Mitteltemperaturen bestehen.
- **Häufigkeit epiphytischer Referenzarten – Niederschlagssummen (blauer Block)**
Als Nicht-Eutrophierungszeiger (=Referenzarten) wird der Großteil der Flechten bezeichnet, mit Ausnahme einer kleinen Liste von Arten, die nach der Luftgütekartierungsmethode als Eutrophierungszeiger ausgewiesen sind. Der Flechten-Diversitätswert der Referenzarten steht in starkem Zusammenhang mit den Niederschlagssummen. Je höher die Niederschläge, desto größer die Häufigkeit und Artenvielfalt dieser Gruppe. Das Wasserangebot fördert das Gedeihen der wechselfeuchten Flechten. Zusätzlich wirken höhere Niederschläge einer Nährstoffübersversorgung entgegen. Niederschläge waschen Staubpartikel, die Nährstoffe enthalten können, aus der Luft aus und verhindern damit einen Teil der flechtenschädigenden Nährstoffübersversorgung. Weiterhin ist denkbar, dass ein höheres Aufkommen von Stammabflusswasser an den höher gelegenen Dauerbeobachtungsflächen die Baumborken und Flechten von anhaftenden Nährstoffen befreit.
- **Diversität epiphytischer Wärme- und Klimawandelzeiger – Kontinentalität (gelber Block)**
Die Häufigkeit der epiphytischen Wärme- und Klimawandelzeiger steht in positivem Zusammenhang mit der Kontinentalität. Dieser Befund war so zunächst nicht erwartet worden: Höhere Kontinentalität ist mit stärkeren Temperaturgegensätzen im Sommer und Winter verbunden. In wärmeren Sommern werden aufgrund längerer Austrocknungsperioden geringere Wachstumsraten bei Flechten erwartet; im Winter könnte das Wachstum aufgrund tieferer Temperaturen ebenfalls geringer ausfallen. Am stärksten kontinental sind die Untersuchungsflächen am Flughafen und in Biebesheim. Beide Flächen haben jedoch auch die höchsten Temperaturen in allen Jahreszeiten, was hier wohl den Ausschlag für das Vorkommen der betrachteten Arten gibt. Das Kontinentalitätsgefälle in-

nerhalb des Landes Hessen ist offensichtlich nicht hoch genug, um ein Vorkommen der eher als atlantisch geltenden Klimawandelzeiger zu differenzieren. Hier sind großräumigere Betrachtungen über Ländergrenzen hinweg sicherlich aufschlussreich.

Die beschriebenen Zusammenhänge betrafen ausschließlich epiphytische Flechten. Sie erweisen sich in der vorliegenden Arbeit als geeignet, um landesweite klimatische Unterschiede, insbesondere der Temperatur, darzustellen. Für die Daten aus der Kartierung der Wärmezeiger an Mauern waren die Zusammenhänge mit den Mitteltemperaturen und den Niederschlägen ebenso vorhanden, fielen aber niedriger aus als bei den Epiphyten. Vergleicht man die Korrelationen (der Wärmezeiger mit den Mitteltemperaturen) mit denen der letzten Arbeit in Hessen (KIRSCHBAUM 2009), so liegen die Werte der vorliegenden Untersuchung niedriger. Die Zahlen sind allerdings nicht direkt vergleichbar, da bei der letzten Untersuchung die damals relevanten Referenzzeiträume der Klimadaten herangezogen wurden.

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie

r	JT30	JT10	FT30	ST30	HT30	WT30	JN30	JN10	FN30	SN30	HN30	WN30	Konti	N-Depos
2012 Mauern FDW_WZ	0,47	0,51	0,53	0,44	0,51	0,47	-0,49	-0,49	-0,42	-0,55	-0,36	-0,34	0,18	-0,66
2012 Klima FDW_WZ	0,62	0,74	0,69	0,78	0,74	0,62	-0,50	-0,50	-0,48	-0,52	-0,43	-0,47	0,70	-0,32
2012 VDI FDW_WZ	0,72	0,80	0,76	0,86	0,80	0,72	-0,48	-0,48	-0,44	-0,52	-0,49	-0,51	0,72	-0,24
2012 VDI FDW_KWZ	0,40	0,49	0,48	0,55	0,49	0,40	-0,21	-0,21	-0,17	-0,25	-0,22	-0,26	0,56	0,06
2012 Klima FDW_KWZ	0,51	0,65	0,64	0,71	0,65	0,51	-0,34	-0,34	-0,31	-0,36	-0,33	-0,36	0,82	-0,20
2012 Mauern FDW_C teich	0,51	0,55	0,60	0,49	0,55	0,51	-0,43	-0,43	-0,33	-0,53	-0,32	-0,31	0,25	-0,71
2012 VDI FDW_P_jeck	0,52	0,58	0,59	0,61	0,58	0,52	-0,31	-0,31	-0,27	-0,36	-0,31	-0,29	0,58	-0,03
2012 VDI FDW_Eu	0,44	0,38	0,26	0,36	0,38	0,44	-0,58	-0,58	-0,71	-0,53	-0,54	-0,52	-0,19	-0,22
2012 VDI FDW_Ref	-0,57	-0,58	-0,46	-0,55	-0,58	-0,57	0,74	0,74	0,70	0,70	0,81	0,84	-0,33	0,66

Temperatur in °C	Abkürzung
Jahresmitteltemperatur 1981 - 2010 als 30-Jahresmittel	JT30
Jahresmitteltemperatur 2001 - 2010 als 10-Jahresmittel	JT10
Saisonale Mitteltemperatur Frühling 1981 - 2010 als 30-Jahresmittel	FT30
Saisonale Mitteltemperatur Sommer 1981 - 2010 als 30-Jahresmittel	ST30
Saisonale Mitteltemperatur Herbst 1981 - 2010 als 30-Jahresmittel	HT30
Saisonale Mitteltemperatur Winter 1981 - 2010 als 30-Jahresmittel	WT30
Niederschlag in mm	
Jahressumme Niederschlag 1981 - 2010 als 30-Jahresmittel	JN30
Jahressumme Niederschlag 2001 - 2010 als 10-Jahresmittel	JN10
Saisonale Summe Niederschlag Frühling 1981 - 2010 als 30-Jahresmittel	FN30
Saisonale Summe Niederschlag Sommer 1981 - 2010 als 30-Jahresmittel	SN30
Saisonale Summe Niederschlag Herbst 1981 - 2010 als 30-Jahresmittel	HN30
Saisonale Summe Niederschlag Winter 1981 - 2010 als 30-Jahresmittel	WN30
Kontinentalität in K	
Kontinentalität, berechnet auf Basis der Temperatur im Referenzzeitraum 1961-1990	Konti
Stickstoffdeposition in kg ha⁻¹ a⁻¹	
Gesamt-N-Deposition (trocken, nass, feucht)	N-Depos

 höhere Korrelationen zwischen der Häufigkeit epiphytischer Wärmezeiger und Mitteltemperaturen

 mittlere Korrelationen zwischen der Häufigkeit epiphytischer Klimawandelzeiger und Mitteltemperaturen

 höhere Korrelationen zwischen der Häufigkeit epiphytischer Referenzarten (NEu) und Niederschlagssummen

 mittlere bis hohe Korrelationen zwischen der Diversität epiphytischer Wärme- und Klimawandelzeiger und der Kontinentalität

Abb. 55: Zusammenhang zwischen Flechtendaten und Klima- bzw. N-Depositionsdaten (r: Maßkorrelationskoeffizient; Schattierung hellgrau: Wert von 0,6 bis <0,7, mittelgrau: 0,7 bis <0,8, dunkelgrau \geq 0,8)

5.4.4 Empfehlungen für das Klimawandel-Biomonitoring mit Flechten in Hessen

5.4.4.1 Flechten als Umweltindikatoren in Hessen

Um die Entwicklung der Umwelt in Hessen zu dokumentieren, stellt das HLUG Umweltindikatoren bereit, die regelmäßig fortgeschrieben und weiterentwickelt werden. Aus den Erkenntnissen der Flechten-Dauerbeobachtung können die Flechten als Indikatoren für den Bereich Naturschutz/Biodiversität sowie Klima dienen. Es wird vorgeschlagen, sowohl die Entwicklung der Wärmezeiger als auch der Klimawandelzeiger zu verfolgen.

Die vorliegende Arbeit brachte das Ergebnis, dass ab dem Jahr 2012 auch die Aufnahme der Flechten im Messgitter standardisierter Trägerbäume zu einer Differenzierung des Vorkommens von Zeigerarten des Klimawandels führt. Noch vor fünf Jahren wurde die Aufnahmefläche des Messgitters als zu klein betrachtet, um möglicherweise neu einwandernde Klimawandelzeiger frühzeitig zu erfassen. Die Konsequenz war, ganze Baumstämme und Mauerabschnitte zusätzlich zu untersuchen. Der derzeitige Wandel des Flechtenartenspektrums schreitet jedoch so rasch voran, dass dies auch auf der kleinen Fläche des Messgitters dokumentiert werden kann. Der Vorteil der Verwendung von Daten aus dem Messgitter ist, dass lange Datenreihen zum Vergleich zur Verfügung stehen – was ideal für Fragestellungen der Entwicklungsdynamik und der Klimawandelfolgen ist.

Die Entwicklung der Häufigkeit von Indikatorarten (Flechten) kann auf zwei Wegen nachverfolgt werden:

- **Teilindikator a)**

Der Flechten-Diversitätswert wärmeliebender Flechten als Mittelwert für Hessen bzw. der Flechten-Dauerbeobachtungsflächen, ausgedrückt in der Einheit $[FDW_{WZ}$ in Datensätze pro Baum], beschreibt die mittlere Häufigkeit wärmeliebender Flechten in Hessen. Als Auswertungsgrundlage wird ausschließlich die Temperaturzahl herangezogen. Alle 58 Arten, die nach WIRTH (2010) eine Temperaturzahl zwischen 7 und 9 haben, werden als Wärmezeiger (WZ) bezeichnet.

Zur Berechnung des FDW_{WZ} werden Daten von Flechtenfrequenzen aus Luftgüteuntersuchungen nach VDI 3957 Blatt 13 (Anhang A) herangezogen. Aus der Frequenz der Wärmezeiger wird der Flechten-Diversitätswert der Wärmezeiger (FDW_{WZ}) ermittelt. Die Berechnung erfolgt analog der Ermittlung von Flechten-Diversitätswerten für Eutrophierungszeiger und Referenzarten aus Luftgüteuntersuchungen. Die Summe von FDW_{WZ} wird durch die Anzahl der untersuchten Bäume geteilt. Zum Beispiel bedeutet ein Wert von 0,5, dass statistisch gesehen an der Hälfte der kartierten Bäume in einem Messgitter mit zehn Feldern (d. h. pro Baum kann jede Art maximal 10 Datensätze erzeugen) ein Wärmezeigerdatensatz erfasst wurde. Der Wert wird für die Dauerbeobachtungsflächen und für das Land Hessen berechnet.

Für diesen Teilindikator ergibt sich das linke Bild in Abb. 56. Eine Mittelung des FDW_{WZ} der Untersuchungsflächen Diemelstadt, Melsungen, Gießen, Limburg, Rhön, Spessart,

Biebesheim und Flughafen wird vorgenommen. Für 2007 ergibt sich der Wert 0,12; bis 2012 hat er sich fast verdreifacht ($FDW_{WZ} = 0,34$). Die Wärmezeiger sind folglich in 2012 häufiger im Messgitter angetroffen worden.

Aufgrund der Korrelationsberechnungen in der vorliegenden Arbeit steht der FDW_{WZ} in einem engen Zusammenhang zu den langjährigen Temperaturmessungen (vgl. Kapitel 5.4.3).

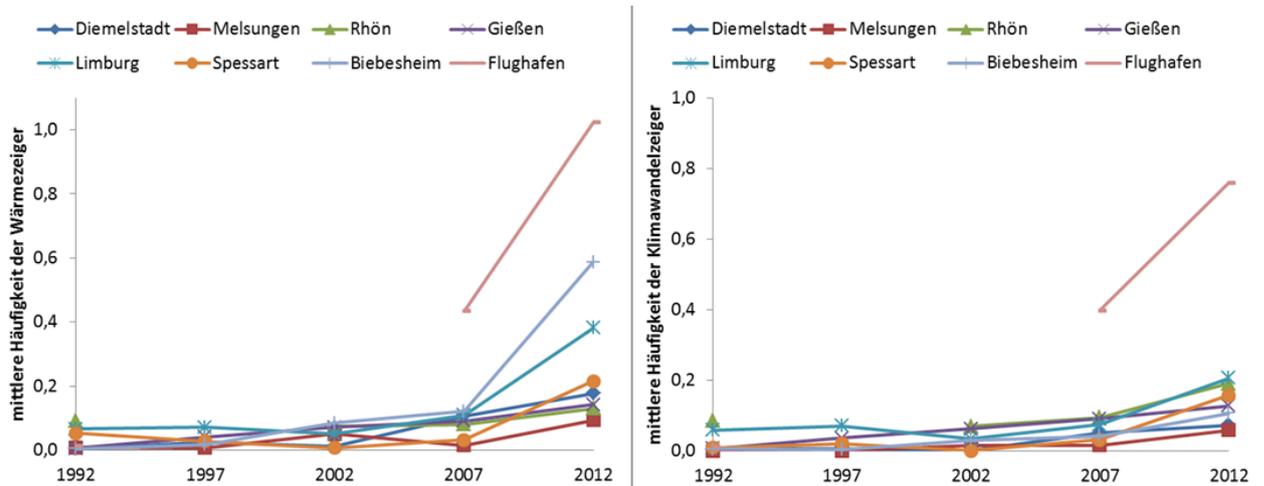


Abb. 56: Vergleich der zeitliche Entwicklung der vorgeschlagenen Indikatoren; links: Teilindikator a) FDW_{WZ} , rechts: Teilindikator b) FDW_{KWZ}

- **Teilindikator b)**

Der Flechten-Diversitätswert klimawandelzeigender Flechten als Mittelwert für Hessen bzw. der Flechten-Dauerbeobachtungsflächen, ausgedrückt in der Einheit [FDW_{KWZ} in Datensätze pro Baum], beschreibt die mittlere Häufigkeit von klimawandelzeigenden Flechten in Hessen. Basierend auf den Zeigerwerten nach WIRTH (2010) und KIRSCHBAUM & WIRTH (2010) sowie Literaturdaten wurden 45 Flechtenarten selektiert, die im Folgenden als „Klimawandelzeiger“ bezeichnet werden. (Die Artenliste erscheint in der neuen Richtlinie VDI 3957 Blatt 20.)

Zur Berechnung des FDW_{KWZ} werden Daten von Flechtenfrequenzen aus Luftgüteuntersuchungen nach VDI 3957 Blatt 13 (Anhang A) herangezogen. Aus der Frequenz der als Klimawandelzeiger bekannten Arten wird ein Diversitätswert der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}) ermittelt. Die Berechnung erfolgt analog der Ermittlung von Flechten-Diversitätswerten für Eutrophierungszeiger und Referenzarten aus Luftgüteuntersuchungen. Die Summe von FDW_{KWZ} wird durch die Anzahl der untersuchten Bäume geteilt. Zum Beispiel bedeutet ein Wert von 0,5, dass statistisch gesehen an der Hälfte der kartierten Bäume in einem Messgitter mit zehn Feldern (d. h. pro Baum kann jede Art maximal 10 Datensätze erzeugen) ein Klimawandelzeigerdatensatz erfasst wurde. Der Wert wird für Dauerbeobachtungsflächen und für das Land Hessen berechnet.

Für diesen Teilindikator ergibt sich das rechte Bild in Abb. 56. Eine Mittelung des FDW_{WZ} der Untersuchungsflächen Diemelstadt, Melsungen, Gießen, Limburg, Rhön,

Spessart, Biebesheim und Flughafen ergibt für 2007 den Wert 0,10. Bis zum Jahr 2012 hat er sich fast verdoppelt ($FDW_{KWZ} = 0,21$).

Aufgrund der Korrelationsberechnungen in der vorliegenden Arbeit steht der FDW_{KWZ} in einem mittleren Zusammenhang zu den langjährigen Temperaturmessungen (vgl. Kapitel 5.4.3). Hier spielen noch weitere Klimafaktoren wie Feuchtigkeit eine Rolle, die in der vorliegenden Arbeit nicht näher betrachtet werden konnten.

5.4.4.2 Fazit und weitere Vorgehensweise

Seit 2007 findet im Rahmen der Flechten-Dauerbeobachtung in Hessen neben der immissionsbezogenen Fragestellung auch ein Klimawandel-Biomonitoring mit Flechten statt. Um die in benachbarten westlichen Ländern beobachtete Einwanderung wärmeliebender Arten ggf. auch in Hessen dokumentieren zu können, wurden die beobachteten Aufnahmeflächen erweitert. Es wurde nicht nur wie bisher das Messgitter am Mittelstamm standardisierter Bäume auf Flechten untersucht, sondern es wurden zusätzlich größere Stammabschnitte sowie Mauern betrachtet. Diese umfangreichen Daten liegen nun auch für 2012 vor. Bei den Korrelationsberechnungen der Flechtendaten mit Klimaparametern zeigt sich, dass hohe Zusammenhänge zwischen Temperaturdaten des Deutschen Wetterdienstes und der Häufigkeit von Wärmezeigern bestehen. Vergleicht man die Datensätze der verschiedenen Substrate, so zeigen sich die besten Zusammenhänge für die Flechten im Messgitter, die Daten aus der Kartierung ganzer Stämme bringen ebenfalls noch hohe Korrelationen. Die Wärmezeigerdaten von Mauern erbringen für 2012 nur mittlere Korrelationen mit Temperaturdaten. In der Arbeit 2007 stellten sich die statistischen Befunde für die Mauerflechten noch günstiger dar, es wurden hohe Zusammenhänge mit Jahresmitteltemperaturen gefunden, wenn auch der damals relevante Bezugszeitraum der Klimadaten ein anderer war (KIRSCHBAUM 2009). Es stellt sich nun die Frage, ob bei der nächsten Kartierung wieder Mauern untersucht werden sollten. Auf der potenziellen Artenliste der Wärmezeiger gehört etwa die Hälfte zu den Gesteinsflechten, diese stehen künftig 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.

Ausgesprochen günstig ist der Befund, nach dem hohe Zusammenhänge zwischen den Flechten im Messgitter am Mittelstamm standardisierter Bäume und Jahresmittelwerten der Temperatur bestehen. Für diese Variante liegen Daten nach einer standardisierten Erhebungsmethode seit 1992 vor. So können zu diesem Zeitpunkt bereits Zeitreihen klimawandelrelevanter Indizes über 20 Jahre erstellt werden.

Bei bisherigen Wiederholungskartierungen hat sich gezeigt, dass nennenswerte Veränderungen der Flechtenvegetation schon nach drei Jahren nachweisbar sind (KIRSCHBAUM & HANEWALD 2001). In Hessen hat sich für die Untersuchung der Flechten-Dauerbeobachtungsflächen ein Zeitraum von fünf Jahren bewährt (KIRSCHBAUM ET AL. 2010). Auch für das Biomonitoring des Klimawandels werden Wiederholungsuntersuchungen im Abstand von fünf Jahren empfohlen.

Zum Thema Flechten und Klimawandel gibt es bisher noch wenige Untersuchungen und Praxiserfahrungen. Eine methodische Unterstützung und neue Anwenderkreise wird sicherlich die VDI-Richtlinie 3957 Blatt 20 „Kartierung von Flechten zur Ermittlung der Wirkung von lokalen Klimaveränderungen“ bringen, die in absehbarer Zeit veröffentlicht werden wird. Sowohl die Erfassungsmethoden, als auch die Auswertung der vorliegenden Arbeit sind weitestgehend kompatibel mit dieser Richtlinie.

6 Literatur

- APTROOT, A. (2009): Lichens as an Indicator of Climate and Global Change. In: Climate Change, Observed Impacts on Planet Earth: Elsevier B.V., S. 401–408.
- APTROOT, A.; 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. In: Grabherr, L., Körner, G., Thompson, C., Nagy, D.B.A. (Hg.): Alpine biodiversity in Europe. Berlin, Heidelberg: Springer (Ecological Studies 167), S. 437–441.
- BAIRLEIN, F.; HÜPPOP, O. (2004): Migratory Fuelling and Global Climate Change. In: Advances in Ecological Research 35, S. 33–47.
- BRADLEY, B.A.; OPPENHEIMER, M.; WILCOVE, D.S. (2009): Climate change and plant invasions: restoration opportunities ahead? In: Global Change Biology 15, S. 1511–1521.
- BUILTJES, P.; HENDRIKS, E.; KOENEN, M.; SCHAAP, M.; BANZHAF, S.; KERSCHBAUMER, A.; GAUGER, T.; NAGEL, H.-D.; SCHEUSCHNER, T.; SCHLUTOW, A. (2011): Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und deren Wirkung in Deutschland. MAPESI - Modelling of Air Pollutants and Ecosystem Impacts. Umweltbundesamt. Appendix 11. Dessau-Rosslau.
- CEZANNE, R.; EICHLER, M.; KIRSCHBAUM, U.; WINDISCH, U. (2008): Flechten als Anzeiger des Klimawandels. In: Sauteria 15, S. 159–174.
- DE BRUYN, U.; LINDERS, W.; MOHR, K. (2009): Epiphytische Flechten im Wandel von Immissionen und Klima, Ergebnisse einer Vergleichskartierung 1989/2007 in Nordwestdeutschland. In: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung 21 (1), S. 63–75.
- EEA - EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2004): Impacts of Europe`s changing climate. An indicator-based assessment. Luxembourg: Addison-Wesley.
- GEBHARDT, H. (1996): Ecological and economic consequences of introduction of exotic wildlife (birds and mammals) in Germany. In: Wildl. Biol. 2, S. 205–211.
- GEBHARDT, H.; RAMMERT, U.; SCHRÖDER, W.; WOLF, H. (2010): Klima-Biomonitoring: Nachweis des Klimawandels und dessen Folgen für die belebte Umwelt. Neuer Schwerpunkt des Arbeitskreises Bioindikation/Wirkungsermittlung. In: Umweltwiss. Schadst. Forsch. 22, S. 7–19.
- 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.
- HLUG - HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2013a): Beobachteter Klimawandel. Infobroschüre des HLUG. Wiesbaden.

- HLUG - HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2013b): Lufthygienischer Jahresbericht 2012. Teil I: Kontinuierliche Messungen. Hg. v. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Wiesbaden.
- INSAROV, G. (2002): A method for detecting large-scale environmental change with lichens. In: Scheidegger, P.L.; Nimis, C. und Wolseley, P.A. (Hg.): Monitoring with Lichens - Monitoring Lichens. Dordrecht: Kluwer, S. 399–403.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007): Climate Change 2005: Synthesis Report.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2013): Climate Change 2013. The Physical Science Basis.
- 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: Unveröff. Bericht im Auftrag des HLUG.
- KIRSCHBAUM, U.; HANEWALD, K. (1998a): Biological indication of air pollution by lichen mapping in long time observation areas in Hesse/Germany. In: Journal of Applied Botany 72 (5-6), S. 212–227.
- KIRSCHBAUM, U.; HANEWALD, K. (1998b): Immissionsbezogene Flechtenkartierungen in hessischen Dauerbeobachtungsflächen. In: Angewandte Botanik 72, S. 212–227.
- KIRSCHBAUM, U.; HANEWALD, K. (2001): Veränderungen des Flechtenbewuchses in den hessischen Dauerbeobachtungsflächen Melsungen und Limburg zwischen 1997 und 1999. In: Angewandte Botanik 75, S. 20–30.
- KIRSCHBAUM, U.; HANEWALD, K. (2009): Flechten als Anzeiger der Luftgüte und des Klimawandels. Hg. v. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Wiesbaden. 47 S.
- KIRSCHBAUM, U.; WINDISCH, U. (1995): Beurteilung der lufthygienischen Situation Hessens mittels epiphytischer Flechten. Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz 171. 150 S.
- KIRSCHBAUM, U.; WINDISCH, U.; HANEWALD, K. (2010): Immissionsbezogene Flechtenkartierung in Hessen von 1992 - 2007. In: Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft 70 (4), S. 135–140.
- KIRSCHBAUM, U.; WIRTH, V. (2010): Flechten erkennen - Umwelt bewerten. Hg. v. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Wiesbaden. 204 S.
- KOWARIK, I. (2003): Biologische Invasionen - Neophyten und Neozoen in Mitteleuropa. Stuttgart: Ulmer.
- SCHMITZ, U.; STAPPER, N.; STEVENS, M.; DAHL, A.; LEISTEN, A. (2014): Klimafolgenmonitoring Landeshauptstadt Düsseldorf 2013. Untersuchungen der Auswirkungen des Klimawandels auf ausgewählte Gruppen der Tier- und Pflanzenwelt. Unveröff. Gutachten der Bio-

logischen 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.
- 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 (2005): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen mit Flechten (Bioindikation). Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für Luftgüte. In: *VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft* 1a.
- VDI 3957 BLATT 20 (Stand: 2013): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen mit Flechten (Biomonitoring). Kartierung von Flechten zur Ermittlung der Wirkung von lokalen Klimaveränderungen (Vorentwurf). In: *VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft* 1a.
- VDI 3957 BLATT 8 (Stand: 2013): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation). Flächenbestimmung epiphytischer Flechten zur immissionsökologischen Langzeitbeobachtung (Vorentwurf). In: *VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft* 1a.
- VORBECK, A.; WINDISCH, U.; EICHLER, M.; CEZANNE, R. (2009): Immissionsbezogene Flechtenkartierung Aschaffenburg unter besonderer Berücksichtigung des Straßenverkehrs. Wiederholungsuntersuchung 2008/09. Unveröff. Gutachten im Auftrag der Stadt Aschaffenburg.
- 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.; MENZEL, M. (2013): Software zur Flächenberechnung von Epiphytenbeständen. *Herzogia* 26(2), S. 423–427.
- WINDISCH, U.; VORBECK, A.; EICHLER, M.; CEZANNE, R. (2012): Dauerbeobachtung von Flechten in Hessen. Immissionsbezogene Flechtenkartierungen am Flughafen Frankfurt (Main) (1992–2012). Unveröff. Gutachten im Auftrag des HLUG und der Gemeinnützige Umwelthaus GmbH.
- WINDISCH, U.; VORBECK, A. (2006): Nachweis von Klimaänderungen mit Flechten. Methodentwicklung 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. Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.). Online verfügbar unter http://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_all_00098.htm

- WIRTH, V. (1991): Zeigerwerte von Flechten. In: Ellenberg, H. et al. (Hg.): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Göttingen: Goltze.
- WIRTH, V. (2010): Ökologische Zeigerwerte von Flechten - erweiterte und aktualisierte Fassung. In: Herzogia 23 (2), S. 229–248.
- WIRTH, V.; KIRSCHBAUM, U. (2014): Flechten einfach bestimmen. Ein zuverlässiger Führer zu den häufigsten Arten Mitteleuropas. Wiebelsheim: Quelle & Meyer.
- WIRTH, V.; HAUCK, M.; SCHULTZ, M. (2013): Die Flechten Deutschlands. Stuttgart: Ulmer. 2 Bände, 1244 S.

Anhang

A1: Erhebungsbogen für Bäume nach VDI 3957 Blatt 13

A2: Erhebungsbogen für Klimabäume

A3: Erhebungsbogen für Mauern

A4: Klima- und Stickstoffdepositionsdaten der Untersuchungsflächen

A5: Artenliste

A2: Erhebungsbogen für Klimabäume

		DBF Hessen 2012: Klimabäume		DBF	Mfl.
		Kartierung: Eich/Cez/Win	Datum	Ort	Blatt ... / ...
Objekt-Nr.					
Baumart					
Amandinea punctata	pun				
Buellia griseovirens	gr				
Caloplaca obscurella	obs				
Candelaria concolor	co				
Candelariella reflexa	ref				
Candelariella vitellina	vit				
Candelariella xanthostigma	xa				
Evernia prunastri	pru				
Flavoparmelia caperata	cap				
Hypogymnia physodes	phy				
Hypogymnia tubulosa	tub				
Lecania cyrtella	cyr				
Lecanora chlorotera	chl				
Lecanora dispersa	ldi				
Lecanora expallens	exp				
Lecanora hagenii	lha				
Lecanora saligna	sal				
Lecidella etaeochroma	lec				
Lepraria incana	inc				
Melanelia glabrata	xgl				
Melanelia subaurifera	psu				
Melanohalea elegantula	ele				
Melanohalea exasperatula	exa				
Opegrapha rufescens	ruf				
Parmelia ernstiae	ern				
Parmelia sulcata	sul				
Phaeophyscia nigricans	nig				
Phaeophyscia orbicularis	orb				
Phlyctis argena	arg				
Physcia adscendens	ads				
Physcia caesia	cae				
Physcia dubia	dub				
Physcia tenella	pte				
Physconia enteroxantha	ent				
Physconia grisea	gri				
Pleurosticta acetabulum	ace				
Pseudevernia furfuracea	fur				
Punctelia jeckeri	uph				
Punctelia subrudecta	sub				
Ramalina farinacea	far				
Strangospora pinicola	pin				
Xanthoria candelaria-Gr.	can				
Xanthoria parietina	par				
Xanthoria polycarpa	pol				

A3: Erhebungsbogen für Mauern

	DBF Hessen 2012: Mauern		DBF	Mfl.
	Kartierung: Eich/Cez	Datum	Ort	Blatt .../...
Objekt-Nr.				
Baumart				
Acarospora fuscata	afu			
Ariandinea punctata	pun			
Aspicilia contorta ssp. hoff	aho			
Aspicilia moenium	amo			
Caloplaca albolutescens	caa			
Caloplaca chlorina	chc			
Caloplaca citrina	cit			
Caloplaca orenulata	cor			
Caloplaca dalmatica	cda			
Caloplaca decipiens	cde			
Caloplaca flavocitrina	cfl			
Caloplaca oasis	oas			
Caloplaca pusilla	pus			
Caloplaca teicholyta	tei			
Candelariella aurella	aur			
Candelariella vitellina	vit			
Catillaria chalybeia	chy			
Diplazium alboatrum	dal			
Lecania erysibe	ery			
Lecania inundata	inu			
Lecanora albescens	lal			
Lecanora campestris	cam			
Lecanora dispersa	ldi			
Lecanora dispersa s.l.	lds			
Lecanora muralis	lmu			
Lecanora polutropa	lpo			
Lecidea fuscoatra	lfu			
Lecidea grisella	lgr			
Lecidella carpathica	cpt			
Lecidella scabra	sc			
Lecidella stigmatia	lst			
Lepraria youxi	you			
Phaeophyscia nigricans	nig			
Phaeophyscia orbicularis	orb			
Physcia adscendens	ads			
Physcia caesia	cae			
Physcia dubia	dub			
Physcia tenella	pte			
Pleurozia olearia	ole			
Pleurozia picea	pit			
Sarcogyne regularis	reg			
Scaliosporium umbrinum	umb			
Verrucaria muralis	vmu			
Verrucaria nigrescens	vni			
Verrucaria tectorum	tec			
Xanthoria elegans	el			
Xanthoria parietina	par			

A4: Klima- und Stickstoffdepositionsdaten der Untersuchungsflächen

	JT30	JT10	FT30	ST30	HT30	WT30	JN30	JN10	FN30	SN30	HN30	WN30	JW20	JD30	JG30	Konti	N-Depos. in kg ha ⁻¹ a ⁻¹
Diemelstadt	8,5	8,5	7,5	16,5	8,5	0,5	750	750	162,5	212,5	187,5	187,5	3,25	9,5	575	16,25	19
Melsungen	8,5	8,5	7,5	16,5	8,5	0,5	750	750	187,5	212,5	187,5	162,5	3,25	9,3	575	16,75	18
Rhön	6,5	7,5	6,5	15,5	7,5	-1,5	1050	1050	236,5	262,5	262,5	262,5	4,75	8,7	475	17,25	19
Gießen	9,5	9,5	9,5	17,5	9,5	1,5	650	650	162,5	187,5	162,5	162,5	3,25	9,7	625	17,75	13
Limburg	9,5	9,5	9,5	17,5	9,5	1,5	650	650	162,5	187,5	187,5	187,5	3,25	9,5	625	17,25	14
Spessart	8,5	8,5	8,5	16,5	8,5	0,5	950	950	212,5	237,5	237,5	287,5	2,75	9,3	575	17,25	18
Biebesheim	10,5	10,5	10,5	19,5	10,5	2,5	650	650	162,5	187,5	162,5	137,5	3,25	10,1	625	18,25	13
Flughafen	10,5	10,5	10,5	19,5	10,5	2,5	650	650	162,5	187,5	162,5	137,5	2,75	9,9	625	18,25	17
Rheingau	9,5	9,5	9,5	17,5	9,5	1,5	650	650	162,5	187,5	162,5	162,5	3,25	9,9	625	16,75	11
Odenwald	8,5	8,5	8,5	16,5	8,5	0,5	1050	1050	262,5	237,5	262,5	287,5	3,75	9,1	575	17,25	17

Abkürzungen: siehe Erklärungen im Text (Tab. 3)

A5: Artenliste

	licheni-	Anzahl DBF/UF mit Vorkommen auf	
	coler Pilz	Bäumen	Mauern
<i>Acarospora fuscata</i> (Schrad.) Th. Fr.			8
<i>Acarospora moenium</i> (Vain.) Räsänen			8
<i>Acarospora nitrophila</i> H. Magn.			6
<i>Acarospora tongletii</i> var. <i>paupera</i> (H. Magn.) Clauzade & Cl. Roux			1
<i>Acarospora umbilicata</i> Bagl.			4
<i>Agonimia opuntiella</i> (Buschardt & Poelt) Vězda			1
<i>Agonimia tristicula</i> (Nyl.) Zahlbr.			5
<i>Alyxoria varia</i> (Pers.) Ertz & Tehler		2	
<i>Amandinea punctata</i> (Hoffm.) Coppins & Scheid.		10	8
<i>Anisomeridium polypori</i> (Ellis & Everh.) M. E. Barr		3	
<i>Arthonia apotheciorum</i> (A. Massal.) Almq.	x		2
<i>Arthonia didyma</i> Körb.		1	
<i>Arthonia epiphysciae</i> Nyl.	x	1	
<i>Arthonia galactinaria</i> Leight.	x		1
<i>Arthonia molendoi</i> (Frauenf.) R. Sant.	x	2	
<i>Arthonia phaeophysciae</i> Grube & Matzer	x	8	4
<i>Arthonia radiata</i> (Pers.) Ach.		2	
<i>Athallia holocarpa</i> (Hoffm.) Arup, Frödén & Söchting		3	5
<i>Athallia pyracea</i> Arup, Frödén & Söchting		10	
<i>Athelia arachnoidea</i> (Berk.) Jülich	x	9	
<i>Bacidia arceutina</i> (Ach.) Arnold		1	
<i>Bacidia fuscoviridis</i> (Anzi) Lettau			1
<i>Bacidia rubella</i> (Hoffm.) A. Massal.		1	
<i>Bacidina arnoldiana</i> (Körb.) V. Wirth & Vězda			2
<i>Bacidina caligans</i> (Nyl.) Llop & Hlalun		1	
<i>Bacidina delicata</i> (Larbal. & Leight.) V. Wirth & Vězda		5	4
<i>Bacidina neosquamulosa</i> (Aptroot & Herk) S. Ekman		2	
<i>Bacidina sulphurella</i> (Samp.) M. Hauck & V. Wirth		2	
<i>Bilimbia sabuletorum</i> (Schreb.) Arnold			6
<i>Botryolepraria lesdainii</i> (Hue) Canals et al.			2
<i>Bryoria fuscescens</i> (Gyelnik) Brodo & D. Hawksw.		1	
<i>Buellia aethalea</i> (Ach.) Th. Fr.			5
<i>Buellia griseovirens</i> (Turner & Borrer ex Sm.) Almb.		9	
<i>Buelliella physciicola</i> Poelt & Hafellner	x	2	
<i>Calogaya arnoldii</i> ssp. <i>obliterata</i> (Pers.) Arup, Frödén & Söchting			1
<i>Calogaya decipiens</i> (Arnold) Arup, Frödén & Söchting			10
<i>Calogaya pusilla</i> (A. Massal.) Arup, Frödén & Söchting			10
<i>Caloplaca albolutescens</i> (Nyl.) H. Olivier			7
<i>Caloplaca cerina</i> var. <i>cerina</i> (Ehrh. ex Hedw.) Th. Fr.		2	
<i>Caloplaca cerinella/cerinelloides</i>		9	

	licheni-	Anzahl DBF/UF	
	coler	mit Vorkommen auf	
	Pilz	Bäumen	Mauern
<i>Caloplaca chlorina</i> (Flot.) H. Oliv.		4	9
<i>Caloplaca lucifuga</i> G. Thor		1	
<i>Caloplaca oasis</i> (A. Massal.) Szatala		1	10
<i>Caloplaca phlogina</i> (Ach.) Flagey		2	
<i>Caloplaca obscurella</i> (J. Lahm ex Körb.) Th. Fr.		7	
<i>Caloplaca saxicola</i> (Hoffm.) Nordin			2
<i>Caloplaca soralifera</i> Vondrák & Hrouzek			3
<i>Caloplaca spec.</i>		1	2
<i>Caloplaca teicholyta</i> (Ach.) J. Steiner			10
<i>Caloplaca xerica</i> Poelt & Vězda			1
<i>Candelaria concolor</i> (Dicks.) Stein		9	1
<i>Candelaria pacifica</i> M. Westb. & Arup		3	
<i>Candelariella aurella</i> var. <i>aurella</i> (Hoffm.) Zahlbr.		5	10
<i>Candelariella medians</i> (Nyl.) A. L. Sm.			1
<i>Candelariella reflexa</i> (Nyl.) Lettau		10	
<i>Candelariella vitellina</i> (Hoffm.) Müll. Arg.		10	10
<i>Candelariella xanthostigma</i> (Pers. ex Ach.) Lettau		9	
<i>Carbonea vitellinaria</i> (Nyl.) Hertel	x		1
<i>Catillaria chalybeia</i> (Borrer) A. Massal.			6
<i>Catillaria nigroclavata</i> (Nyl.) Schuler		5	
<i>Cercidospora epipolytropa</i> (Mudd) Arnold	x		2
<i>Cerothallina luteoalba</i> (Turner) Arup, Frödén & Søchting			1
<i>Circinaria caesiocinerea</i> (Nyl. ex Malbr.) A. Nordin, S. Savić & Tibell			2
<i>Circinaria calcarea</i> (L.) A. Nordin, S. Savić & Tibell			2
<i>Circinaria contorta</i> s.l.			1
<i>Circinaria contorta</i> ssp. <i>contorta</i> (Hoffm.) A. Nordin, S. Savić & Tibell			7
<i>Circinaria contorta</i> ssp. <i>hoffmanniana</i> (S.Ekman & Fröberg) comb. ined.			9
<i>Cladonia coniocraea</i> (Flörke) Spreng.		4	2
<i>Cladonia pyxidata</i> agg.		4	4
<i>Cladonia spec.</i>		2	
<i>Coenogonium pineti</i> (Schrad.) Lücking & Lumbsch		1	
<i>Collema crispum</i> (Huds.) Weber ex F. H. Wigg.			2
<i>Collema tenax</i> (Sw.) Ach. em. Degel.			2
<i>Diploicia canescens</i> (Dicks.) A. Massal.		1	
<i>Diploschistes muscorum</i> (Scop.) R. Sant.			1
<i>Diploschistes scruposus</i> (Schreb.) Norman			3
<i>Diplotomma alboatrum</i> (Hoffm.) Flot.			7
<i>Diplotomma porphyricum</i> Arnold			1
<i>Endocarpon pusillum</i> Hedw.			1
<i>Evernia prunastri</i> (L.) Ach.		10	
<i>Flavoparmelia caperata</i> (L.) Hale		8	

	licheni-	Anzahl DBF/UF	
	coler	mit Vorkommen auf	
	Pilz	Bäumen	Mauern
<i>Flavoparmelia soledians</i> (Nyl.) Hale		5	
<i>Flavoplaca arcis</i> (Poelt & Vězda) Arup, Frödén & Söchting			4
<i>Flavoplaca citrina</i> (Hoffm.) Arup, Frödén & Söchting			10
<i>Flavoplaca dichroa</i> (Arup) Arup, Frödén & Söchting			2
<i>Flavoplaca flavocitrina</i> (Nyl.) Arup, Frödén & Söchting		10	10
<i>Flavoplaca limonia</i> (Nimis & Poelt) Arup, Frödén & Söchting			6
<i>Flavoplaca oasis</i> (A. Massal.) Arup, Frödén & Söchting			10
<i>Flavopunctelia flaventior</i> (Stirt.) Hale		1	
<i>Gyalolechia flavovirescens</i> (Wulfen) Söchting, Frödén & Arup			1
<i>Halecania viridescens</i> Coppins & P. James		5	
<i>Hyperphyscia adglutinata</i> (Flörke) H. Mayrhofer & Poelt		5	1
<i>Hypocenomyce scalaris</i> (Ach. ex Lilj.) M. Choisy		3	
<i>Hypogymnia farinacea</i> Zopf		1	
<i>Hypogymnia physodes</i> (L.) Nyl.		10	
<i>Hypogymnia tubulosa</i> (Schaer.) Hav.		8	
<i>Hypotrachyna afrorevoluta</i> (Krog & Swinscow) Krog & Swinscow		3	
<i>Hypotrachyna revoluta</i> (Flörke) Hale		1	
<i>Illosporopsis christiansenii</i> (B. L. Brady & D. Hawksw.) D. Hawksw.	x	6	
<i>Imshaugia aleurites</i> (Ach.) S. L. F. Mey.		1	
<i>Lecania cyrtella</i> (Ach.) Th. Fr.		10	
<i>Lecania erysibe</i> (Ach.) Mudd			10
<i>Lecania hyalina</i> (Fr.) R. Sant.		2	
<i>Lecania inundata</i> (Hepp ex Körb.) M. Mayrhofer			9
<i>Lecania naegelii</i> (Hepp) Diederich & van den Boom		9	
<i>Lecania rabenhorstii</i> (Hepp) Arnold			2
<i>Lecania sylvestris</i> (Arnold) Arnold			1
<i>Lecania turicensis</i> (Hepp) Müll. Arg.			1
<i>Lecanora albescens</i> (Hoffm.) Branth & Rostr.			10
<i>Lecanora allophana</i> (Ach.) Nyl.		2	
<i>Lecanora campestris</i> (Schaer.) Hue			9
<i>Lecanora carpinea</i> (L.) Vain.		9	
<i>Lecanora chlarotera</i> Nyl.		10	
<i>Lecanora compallens</i> Herk & Aptroot		1	
<i>Lecanora conizaeoides</i> Nyl. ex Cromb.		8	
<i>Lecanora crenulata</i> Hook.			1
<i>Lecanora dispersa</i> (Pers.) Röhl.		10	9
<i>Lecanora dispersa s.l.</i>		2	5
<i>Lecanora dispersella</i> auct., non Steiner			7
<i>Lecanora expallens</i> Ach.		10	
<i>Lecanora flotoviana</i> Spreng.			10
<i>Lecanora hagenii</i> (Ach.) Ach.		9	4

	licheni-	Anzahl DBF/UF	
	coler	mit Vorkommen auf	
	Pilz	Bäumen	Mauern
<i>Lecanora muralis</i> (Schreb.) Rabenh.		1	10
<i>Lecanora pannonica</i> Szatala			1
<i>Lecanora persimilis</i> Th. Fr.		10	
<i>Lecanora polytropa</i> (Ehrh. ex Hoffm.) Rabenh.			8
<i>Lecanora pulicaris</i> (Pers.) Ach.		6	
<i>Lecanora rupicola ssp. rupicola</i> (L.) Zahlbr.			4
<i>Lecanora saligna</i> (Schrader) Zahlbr.		9	
<i>Lecanora semipallida</i> H. Magn.			7
<i>Lecanora subcarpineae</i> Szatala		1	
<i>Lecanora sulphurea</i> (Hoffm.) Ach.			1
<i>Lecanora symmicta</i> (Ach.) Ach.		8	
<i>Lecanora varia</i> (Hoffm.) Ach.		2	1
<i>Lecidea fuscoatra</i> (L.) Ach.			7
<i>Lecidea grisella</i> Flörke			7
<i>Lecidella carpathica</i> Körb.			9
<i>Lecidella elaeochroma</i> (Ach.) M. Choisy		9	
<i>Lecidella flavosorediata</i> (Vězda) Hertel & Leuckert		6	
<i>Lecidella scabra</i> (Taylor) Hertel & Leuckert		2	9
<i>Lecidella stigmatea</i> (Ach.) Hertel & Leuckert			10
<i>Lempholemma chalazanum</i> (Ach.) B. de Lesd.			1
<i>Lepraria incana</i> (L.) Ach.		10	2
<i>Lepraria lobificans</i> Nyl.		2	2
<i>Lepraria vouauxii</i> (Hue) R. C. Harris		5	10
<i>Leproplaca chrysodeta</i> (Vain. ex Räsänen) J. R. Laundon			1
<i>Leptogium plicatile</i> (Ach.) Leight.			3
<i>Licea parasitica</i> (Zukal) Martin	x	1	
<i>Lichenochora obscurioides</i> (Linds.) Triebel & Rambold	x	1	
<i>Lichenocodium erodens</i> M. S. Christ & D. Hawksw.	x	2	
<i>Lichenocodium xanthoriae</i> M. S. Christ.	x	1	
<i>Lichenodiplis lecanorae</i> (Vouaux) Dyko & D. Hawksw.	x	3	
<i>Lobothallia radiosa</i> (Hoffm.) Hafellner			1
<i>Marchandiobasidium aurantiacum</i> (Lasch) Diederich & Schultheis	x	9	
<i>Melanelixia fuliginosa</i> (Fr. ex Duby) O. Blanco et al.			3
<i>Melanelixia glabratula</i> (Lamy) Sandler & Arup		10	1
<i>Melanelixia subaurifera</i> (Nyl.) O. Blanco et al.		10	1
<i>Melanohalea elegantula</i> (Zahlbr.) O. Blanco et al.		6	
<i>Melanohalea exasperata</i> (De Not.) O. Blanco et al.		1	
<i>Melanohalea exasperatula</i> (Nyl.) O. Blanco et al.		10	
<i>Melanohalea laciniatula</i> (Flagey ex Oliv.) O. Blanco et al.		2	
<i>Micarea denigrata</i> (Fr.) Hedl.		1	
<i>Micarea prasina</i> agg. Fr.		2	
<i>Muellerella lichenicola</i> (Sommerf.: Fr.) D. Hawksw.	x		1

	licheni-	Anzahl DBF/UF	
	coler	mit Vorkommen auf	
	Pilz	Bäumen	Mauern
<i>Ochrolechia androgyna</i> (Hoffm.) Arnold		2	
<i>Ochrolechia arborea</i> (Kreyer) Almb.		3	
<i>Ochrolechia parella</i> (L.) A. Massal.			1
<i>Ochrolechia turneri</i> (Sm.) Hasselrot		2	
<i>Opegrapha demutata</i> Nyl.			1
<i>Opegrapha rufescens</i> Pers.		7	
<i>Opegrapha vulgata</i> (Ach.) Ach.		1	
<i>Pachyphiale fagicola</i> (Hepp) Zwackh		2	
<i>Paranectria oropensis</i> (Ces. ex Rabenh.) D. Hawksw. & Piroz.	x	3	1
<i>Parmelia ernstiae</i> Feuerer & A. Thell		5	
<i>Parmelia saxatilis</i> (L.) Ach.		5	2
<i>Parmelia submontana</i> Nád. ex Hale		2	
<i>Parmelia sulcata</i> Taylor		10	3
<i>Parmelina pastillifera</i> (Harm.) Hale		1	
<i>Parmelina quercina</i> (Willd.) Hale		1	
<i>Parmelina tiliacea</i> (Hoffm.) Hale		7	
<i>Parmeliopsis ambigua</i> (Wulfen) Nyl.		4	
<i>Parmotrema perlatum</i> (Huds.) M. Choisy		1	
<i>Pertusaria albescens</i> (Huds.) M. Choisy & Werner		4	1
<i>Pertusaria amara</i> (Ach.) Nyl.		2	
<i>Pertusaria coccodes</i> (Ach.) Nyl.		1	1
<i>Pertusaria flavida</i> (DC.) J. R. Laundon		1	
<i>Pertusaria pertusa</i> var. <i>pertusa</i> (Weigel) Tuck		1	
<i>Phaeophyscia orbicularis</i> (Neck.) Moberg		10	10
<i>Phaeophyscia nigricans</i> (Flörke) Moberg		10	10
<i>Phlyctis argena</i> (Sprengel) Flot.		9	1
<i>Physcia adscendens</i> H. Olivier		10	5
<i>Physcia aipolia</i> (Ehrh. ex Humb.) Fürnr.		1	
<i>Physcia caesia</i> (Hoffm.) Fürnr.		9	8
<i>Physcia dimidiata</i> (Arnold) Nyl.		1	
<i>Physcia dubia</i> (Hoffm.) Lettau		10	8
<i>Physcia stellaris</i> (L.) Nyl.		7	
<i>Physcia tenella</i> (Scop.) DC.		10	10
<i>Physconia distorta</i> (With.) J. R. Laundon		2	
<i>Physconia enteroxantha</i> (Nyl.) Poelt		5	
<i>Physconia grisea</i> (Lam.) Poelt		10	3
<i>Physconia perisidiosa</i> (Erichsen) Moberg		2	
<i>Piccolia ochrophora</i> (Nyl.) Hafellner		3	
<i>Placopyrenium fuscillum</i> (Turner) Gueidan & Cl. Roux			3
<i>Placynthiella dasaea</i> (Stirt.) Tønsberg		1	
<i>Placynthiella icmalea</i> (Ach.) Coppins & P. James		1	
<i>Placynthium nigrum</i> (Huds.) Gray			2

	licheni-	Anzahl DBF/UF	
	coler	mit Vorkommen auf	
Pilz		Bäumen	Mauern
<i>Platismatia glauca</i> (L.) W. L. Culb. & C. F. Culb.		3	
<i>Pleurosticta acetabulum</i> (Neck.) Elix & Lumbsch		8	
<i>Polycauliona phlogina</i> (Ach.) Arup, Frödén & Søchting		2	
<i>Polycauliona polycarpa</i> (Hoffm.) Frödén, Arup & Søchting		10	
<i>Polysporina simplex</i> (Davies) Vězda			1
<i>Polysporina subfuscescens</i> (Nyl.) K. Knudsen & Kocourk.	x		5
<i>Porina aenea</i> (Wallr.) Zahlbr.		1	
<i>Porpidia soledizodes</i> (Lamy ex Nyl.) J. R. Laundon			6
<i>Porpidia tuberculosa</i> (Sm.) Hertel & Knoph			2
<i>Protoblastenia rupestris</i> (Scop.) J. Steiner			3
<i>Pseudevernia furfuracea</i> (L.) Zopf		6	
<i>Punctelia borreri</i> (Sm.) Krog		3	
<i>Punctelia jeckeri</i> (Roum.) Kalb		10	
<i>Punctelia subrudecta</i> (Nyl.) Krog		10	
<i>Pyrenodesmia variabilis</i> (Pers.) A. Massal.			1
<i>Ramalina farinacea</i> (L.) Ach.		9	
<i>Ramalina fastigiata</i> (Pers.) Ach.		2	
<i>Ramalina fraxinea</i> (L.) Ach.		2	
<i>Ramalina pollinaria</i> (Westr.) Ach.		3	
<i>Ramalina spec.</i>		1	
<i>Raphidicyrtis trichosporella</i> (Nyl.) Vainio		1	
<i>Rhizocarpon distinctum</i> Th. Fr.			5
<i>Rhizocarpon geographicum ssp. geographicum</i> (L.) DC.			1
<i>Rhizocarpon reductum</i> Th. Fr.			3
<i>Rinodina efflorescens</i> Malme		1	
<i>Rinodina exigua</i> (Ach.) Gray		1	
<i>Rinodina oleae</i> Bagl.		4	10
<i>Rinodina pityrea</i> Ropin & H. Mayrhofer		9	4
<i>Rinodina pyrina</i> (Ach.) Arnold		3	
<i>Rinodina teichophila</i> (Nyl.) Arnold			1
<i>Rufoplaca subpallida</i> (H. Mag.) Arup, Søchting & Frödén			3
<i>Rusavskia elegans</i> (Link) S. Y. Kondr. & Kärnefelt		1	10
<i>Sarcogyne privigna</i> (Ach) A. Massal.			1
<i>Sarcogyne regularis</i> Körb.			10
<i>Scoliciosporum chlorococcum</i> (Graewe ex Stenham.) Vězda		4	
<i>Scoliciosporum galluræ</i> Vězda & Poelt		1	
<i>Scoliciosporum umbrinum</i> (Ach.) Arnold			7
<i>Staurothele frustulenta</i> Vain.			7
<i>Staurothele rugulosa</i> (A. Massal.) Arnold			1
<i>Stigmidium fuscatae</i> (Arnold) R. Sant.	x		3
<i>Strangospora pinicola</i> (A. Massal.) Körb.		9	
<i>Syzygospora physciacearum</i> Diederich	x	4	

	licheni-	Anzahl DBF/UF mit Vorkommen auf	
	coler Pilz	Bäumen	Mauern
<i>Taeniolella phaeophysciae</i> D. Hawksw.	x	5	1
<i>Tephromela atra</i> var. <i>atra</i> (Huds.) Hafellner			1
<i>Tephromela grumosa</i> (Pers.) Hafellner & Cl. Roux			1
<i>Thelocarpon coccosporum</i> Lettau	x		1
<i>Toninia aromatica</i> (Turner ex Sm.) A. Massal.			3
<i>Trapelia coarctata</i> (Turner ex Sm.) M. Choisy			1
<i>Trapelia glebulosa</i> (Sm.) J. R. Laundon			2
<i>Trapelia obtegens</i> (Th. Fr.) Hertel			3
<i>Trapelia placodioides</i> Coppins & P. James			7
<i>Trapeliopsis flexuosa</i> (Fr.) Coppins & P. James		1	
<i>Tremella caloplacae</i> (Zahlbr.) Diederich	x	1	
<i>Tremella hypogymniae</i> Diederich & M. S. Christ.	x	1	
<i>Tremella phaeophysciae</i> Diederich & M. S. Christ.	x	2	1
<i>Tuckermannopsis chlorophylla</i> (Willd.) Hale		1	
<i>Usnea dasypoga</i> (Ach.) Nyl.		1	
<i>Usnea hirta</i> (L.) Weber ex F. H. Wigg.		5	
<i>Variospora aurantia</i> (Pers.) Arup, Frödén & Söchting			1
<i>Variospora dolomiticola</i> (Hue) Arup, Söchting & Frödén			2
<i>Variospora flavescens</i> (Huds.) Arup, Frödén & Söchting			1
<i>Verrucaria macrostoma</i> Dufour ex DC.			2
<i>Verrucaria muralis</i> Ach.			10
<i>Verrucaria nigrescens</i> f. <i>tectorum</i> (A. Massal.) Coppins & Aptroot			6
<i>Verrucaria nigrescens</i> Pers.			10
<i>Verrucaria viridula</i> (Schr.) Ach.			7
<i>Vouauxiella lichenicola</i> (Linds.) Pet. & Syd.	x	2	
<i>Xanthocarpia crenulatella</i> (Nyl.) Frödén, Arup & Söchting			10
<i>Xanthomendoza fulva</i> (Hoffm.) Söchting, Kärnefelt & S. Y.		1	
<i>Xanthoparmelia conspersa</i> (Ehrh. ex Ach.) Hale		1	1
<i>Xanthoparmelia verruculifera</i> (Nyl.) O. Blanco et al.			4
<i>Xanthoria calcicola</i> Oxner			6
<i>Xanthoria candelaria</i> -Gr.		10	
<i>Xanthoria parietina</i> (L.) Th. Fr.		10	9
<i>Xanthoriicola physciae</i> (Kalchbr.) D. Hawksw.	x	3	
<i>Zwackhiomyces lecanorae</i> (Stein) Nik. Hoffm. & Hafellner	x	3	1