Bayerisches Landesamt für
Umwelt

Klimabiomonitoring mit Flechten in Bayern

Landesweite Bewertung der lokalen Wirkungen des Klimawandels und der lufthygienischen Situation

sowie Stadtklima-Biomonitoring



Bayerisches Landesamt für
Umwelt

Klimabiomonitoring mit Flechten in Bayern

Landesweite Bewertung der lokalen Wirkungen des Klimawandels und der lufthygienischen Situation

sowie Stadtklima-Biomonitoring

Fraxinus

UmweltSpezial

Impressum

Klimabiomonitoring mit Flechten in Bayern. Landesweite Bewertung der lokalen Wirkungen des Klimawandels und der lufthygienischen Situation sowie Stadtklima-Biomonitoring

Herausgeber:
Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: 0821 9071-0
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de/

Konzept/Text:
Büro Fraxinus, Prof. Dr. Ute Windisch, Am Weidenborn 11, 35625 Hüttenberg
Bürogemeinschaft Angewandte Ökologie, Dipl.-Biol. Marion Eichler, Kaupstr. 43, 64289 Darmstadt
Büro für Vegetationskunde und Lichenologie, Dipl.-Biol. Rainer Cezanne, Kaupstr. 43, 64289 Darmstadt

Redaktion:
Büro Fraxinus, Prof. Dr. Ute Windisch, Am Weidenborn 11, 35625 Hüttenberg

Bildnachweis:
Ute Windisch, Am Weidenborn 11, 35625 Hüttenberg: Bild 21 rechts auf Seite 37, Bild 26 auf Seite 42, Bild 27 auf Seite 43
Rainer Cezanne, Kaupstr. 43, 64289 Darmstadt: Bild 4 auf Seite 21, Bild 7-8 auf Seite 26, Bild 9-11 auf Seite 27, Bild 12-16 auf Seite 28, Bild 17 oben rechts und unten links auf Seite 30
Ulrich Kirschbaum, Forsthausstr. 7a, 35435 Wettenberg: Bild 17 oben links und unten rechts auf Seite 30, Bild 20 auf Seite 36, Bild 21 links auf Seite 37

Druck:
Vollständige Adresse der Druckerei
Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier

Stand:
November 2024

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.

BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 0 89 12 22 20 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

1	**Zusammenfassung**	**8**
2	**Aufgabenstellung**	**11**
2.1	Flechten als Indikatoren des lokalen Klimawandels	13
2.1.1	Auswahl der zu untersuchenden Messflächen	13
2.1.2	Standardisierung der Flechten-Trägerbäume	13
2.1.3	Erfassung und Auswertung der Flechtendaten	13
2.2	Flechten als Indikatoren von Stadtklima-Effekten	14
2.2.1	Auswahl dreier bayerischer Städte	14
2.2.2	Auswahl homogener Flächen	15
2.2.3	Standardisierung der Flechten-Trägerbäume	17
2.2.4	Erfassung und Auswertung der Flechtendaten	17
2.3	Flechten als Indikatoren der Luftgüte	18
2.3.1	Auswahl der zu untersuchenden Messflächen	18
2.3.2	Standardisierung der Flechten-Trägerbäume	20
2.3.3	Erfassung der Flechtendaten im Gelände	21
2.3.4	Auswertung und Berechnung der Luftgüteindizes	21
2.3.5	Auswirkungen der neuen Richtlinienfassung auf das laufende Projekt	24
3	**Ergebnisse und Diskussion**	**25**
3.1	Wirkungen des lokalen Klimawandels	29
3.2	Effekte des Stadtklimas auf Flechten	34
3.2.1	Identifikation von Indikatorarten zum Nachweis von Stadtklimawirkungen	34
3.2.2	Flechten-Kenndaten für die Projektstädte	38
3.2.3	Abgleich mit Daten aus einem Klimaanalyse-Modell	40
3.2.4	Handlungsempfehlungen	47
3.3	Flechten-Luftgüte seit 1996	49
3.3.1	Aktuelle Flechten-Luftgüte	49
3.3.2	Zeitliche Entwicklung der Flechten-Luftgüte	52
4	**Literaturverzeichnis**	**57**

5 Anhang 60

5.1 Anhang 1: Liste der Messflächen der landesweiten Untersuchung 61

5.2 Anhang 2: Liste der Messflächen der Stadtklima-Untersuchung 62

5.3 Anhang 3: Liste der gefundenen Flechtenarten 65

5.4 Anhang 4: Berechnungsbeispiel Luftgüteindex (LGI) 71

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Ablaufplan der Flechtenkartierung Bayern 12

Abb. 2: Abgrenzung homogener Teilflächen nach Richtlinie des VDI (VDI 3957 Blatt 13, 2023) nach Nutzungstypen; im Beispiel sind: A: Wohngebiet, B: Allee, C: Park, D: Industriegebiet) 16

Abb. 3: Messflächen für die Flechtenkartierung 2022-2024 (aus: Windisch et al. 2012) 19

Abb. 4: Mittelstamm eines Trägerbaums mit Aufnahmegitter 21

Abb. 5: Bewertungsmatrix zur Ermittlung des Luftgüteindexes anhand der Kombination der Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger und der Referenzarten (Datenerhebung nach VDI-Richtlinie 3579 Blatt 13, 2023, Anhang B) 23

Abb. 6: Erläuterung zur Bewertungsmatrix, VDI-Richtlinie 3579 Blatt 13 (2023) 23

Abb. 7: *Gyalecta ulmi* – in Bayern vom Aussterben bedroht 26

Abb. 8: *Phaeophyscia hirsuta* – in Bayern vom Aussterben bedroht 26

Abb. 9: *Sclerophora pallida* – in Bayern vom Aussterben bedroht 27

Abb. 10: *Anaptychia ciliaris* – in Bayern stark gefährdet 27

Abb. 11: *Collema nigrescens* – in Bayern stark gefährdet 27

Abb. 12: *Gyalecta truncigena* – in Bayern vom Aussterben bedroht 28

Abb. 13: *Peltigera collina* – in Bayern stark gefährdet 28

Abb. 14: *Scutula circumspecta* – in Bayern vom Aussterben bedroht 28

Abb. 15: Melanelixia subargentifera – in Bayern stark gefährdet 28

Abb. 16: Physcia vitii – in Bayern Gefährdung unbekannten Ausmaßes 28

Abb. 17: Auswahl von Klimawandelzeigern in Bayern: *Punctelia subrudecta* (Foto: Kirschbaum), *Hypotrachyna afrorevoluta* (Foto: Eichler/Cezanne), *Flavoparmelia soredians* (Foto: Eichler/Cezanne), *Melanohalea elegantula* (Foto: Kirschbaum), von oben links nach unten rechts 30

Abb. 18: Entwicklung des Klimawandelzeiger-Index (KWI) von 2011 bis 2023 aus der Kartierung der Flechten von Baumstämmen 32

Abb. 19: Zusammenhang des Klimawandelzeiger-Indexes mit den langfristigen Jahresmitteltemperaturen (DWD; vgl. Anhang 1) 33

Abb. 20: Tolerant gegenüber städtischen Belastungsfaktoren: Urbanotolerante Blattflechtenarten *Phaeophyscia orbicularis* (links) und *Phaeophyscia nigricans* (rechts) 36

Abb. 21: Meiden stark versiegelte Bereiche von Städten: Urbanophobe Blattflechtenarten *Physcia tenella* und *Parmelia sulcata* 37

Abb. 22: Mittlere Frequenzen urbanotoleranter und urbanophober Flechtenarten; Untersuchung von Flechten im 10-Felder-Messgitter an Trägerbäumen auf homogenen Teilflächen in Aschaffenburg (AB), Nürnberg (N) und München (M) 37

Abb. 23: Mittlere Frequenzsumme pro homogener Teilfläche für urbanotolerante und urbanophobe Flechtenarten, geordnet nach Nutzungskategorien; Datenkollektiv aus Aschaffenburg, Nürnberg und München; (Kat. 1: geschlossene Bebauung, zentrumsnah; 2: Rand einer stark befahrenen Straße und hohe Versiegelung; 3a: Rand einer verkehrsberuhigten Nebenstraße und Versiegelung > 50%; 3b: Rand einer stark befahrenen Straße und

Versiegelung < 50%; 4: kleinere Grünanlage, Park oder Friedhof; 5: größere Grünanlage, Park oder Friedhof; 6: Referenz Umland) 38

Abb. 24: Boxplots der Frequenzsummen pro Baum für die Urbanotoleranten (*Phaeophyscia orbicularis*, *Phaeophyscia nigricans*), sowie für urbanophoben Arten, geordnet nach Nutzungskategorien; (Kat. 1: geschlossene Bebauung, zentrumsnah; 2: Rand einer stark befahrenen Straße und hohe Versiegelung; 3a: Rand einer verkehrsberuhigten Nebenstraße und Versiegelung > 50%; 3b: Rand einer stark befahrenen Straße und Versiegelung < 50%; 4: kleinere Grünanlage, Park oder Friedhof; 5: größere Grünanlage, Park oder Friedhof; 6: Referenz Umland) 40

Abb. 25: Mittlere Frequenzen der urbanotoleranten sowie der urbanophoben Flechtenarten in Aschaffenburg, Nürnberg und München entlang des Gradienten der Lufttemperatur in 2 m über dem Boden um 4:00 Uhr morgens; Temperaturdatenmodell aus Geo-Net (2022) 41

Abb. 26: Nürnberg – Volkspark Duzendteich als Beispiel für eine städtische Grünfläche mit deutlicher nächtlicher Abkühlung 42

Abb. 27: München – Ostfriedhof als Beispiel mikroklimatisch begünstigter städtischer Gebiete 43

Abb. 28: Aschaffenburg - Mittlere Frequenzen der urbanotoleranten und der urbanophoben Arten vor dem Hintergrund der bodennahen 04:00- Uhr-Temperaturen 44

Abb. 29: Aschaffenburg – Ausschnitt aus Abb. 13 (Hintergrundkarte: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2024) 45

Abb. 30: Nürnberg - Mittlere Frequenzen der urbanotoleranten und der urbanophoben Arten vor dem Hintergrund der bodennahen 04:00-Uhr-Temperaturen 46

Abb. 31: München - Mittlere Frequenzen der urbanotoleranten und der urbanophoben Arten vor dem Hintergrund der bodennahen 04:00-Uhr-Temperaturen 47

Abb. 32: Luftgütekarte 2023 50

Abb. 33: Stickstoffeintrag aus Ammonium und Nitrat 2020 in Bayern (LfU 2021) 51

Abb. 34: Entwicklung der Luftgüte von 1996 bis 2023 52

Abb. 35: Zeitlicher Verlauf der Flechten-Diversitätswerte (FDW) der Referenzarten und Eutrophierungszeiger für alle Messflächen 54

Abb. 36: Stickstoffdioxid (NO_2) – Entwicklung der Konzentrationen in den Belastungsniveaus verkehrsnah (ST VK / LA-ST VK), städtisch (ST HG), vorstädtisch (STV HG) und ländlich (LA-R HG) (LfU 2024) 54

Abb. 37: Feinstaub PM_{10} – Entwicklung der Konzentrationen in den Belastungsniveaus verkehrsnah (ST VK / LA-ST VK), städtisch (ST HG), vorstädtisch (STV HG) und ländlich (LA-R HG) (LfU 2024) 55

Abb. 38: Zeitlicher Verlauf des Stickstoffeintrags im Niederschlag an ausgewählten Messstellen in Bayern (LfU 2025) 55

Abb. 39: Zeitlicher Verlauf der atmosphärischen Ammoniak-Konzentration an ausgewählten Messstellen in Bayern (LfU 2025) 56

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Auswahl der zu untersuchenden Städte 15

Tab. 2: Liste der Messflächen für die Flechtenkartierung 2022-2024 20

Tab. 3: Vergleich der Listen der Eutrophierungszeiger nach VDI-RICHTLINIE 3957 Blatt 13 der Erscheinungsjahre 2005 und 2023; in Klammern in älterer Literatur gebräuchliche Synonyme 22

Tab. 4: Datensätze der Flechtenkartierung zu den drei untersuchten Themen 25

Tab. 5: Rote-Liste-Arten der Kategorien 1 und 2 in Bayern mit Angabe der alpinen oder kontinentalen Region 25

Tab. 6: Liste der erfassten Klimawandelzeigerarten mit Angabe ihrer Häufigkeit für beide angewendete Erfassungsmethoden 29

Tab. 7: Zeitliche Entwicklung der Flechten-Klimawandelindizes an den bayerischen Flechten-Messflächen 31

Tab. 8: Langfristige Temperatur- und Niederschlagsdaten der untersuchten Städte (Quelle: DWD) 34

Tab. 9: Identifizierung von häufigeren Flechtentaxa, die in Aschaffenburg, Nürnberg und München in stark versiegelten Stadtbereichen unterschiedliche Frequenzen erreichen als auf unversiegelten Grünflächen und im Umland 35

Tab. 10: Einteilung häufiger Flechtenarten aufgrund ihrer Fähigkeit, Stadtklimaeffekte zu tolerieren 36

Tab. 11: Handlungsempfehlungen zur Verbesserung des Stadtklimas 48

Tab. 12: Zeitliche Entwicklung des flechtenbasierten Luftgüteindexes (LGI) an den untersuchten bayerischen Messflächen (Legende: siehe Abb. 6 auf Seite 23) 53

1 Zusammenfassung

Das Projekt „Klimabiomonitoring mit Flechten in Bayern“ baut auf einer längeren Zeitreihe der Erhebung von Flechtendaten auf, die genutzt wird, um aktuelle Fragestellungen zur Umweltqualität zu bearbeiten. Flechten eignen sich für das Biomonitoring von Luftgüte und Klimawandel, da sie durch ihren speziellen Bau Wasser, gelöste Stoffe und Gase direkt über ihre Oberfläche aufnehmen. Ihre Stoffwechselaktivität hängt von ausreichender Hydration ab, während sie Trockenphasen inaktiv überstehen können.

Für das **Biomonitoring des lokalen Klimawandels** wurden in den Jahren 1996, 2011 und 2023 insgesamt 499 Bäume an landesweit 25 Messflächen auf ihre Flechten untersucht. Für Deutschland ist dokumentiert, dass die Flechtenpopulationen dynamische Veränderungen zeigen. Im Fokus sind hier die sogenannten klimawandelzeigenden Flechtenarten, die ihren Verbreitungsschwerpunkt in subatlantisch-submediterranen Regionen mit mild-feuchten Wintern und warm-feuchten Sommern haben und sich bundesweit von Westen und Süden her ausbreiten. Eine Zunahme der Arten in Gebieten, in denen sie vorher nicht dokumentiert worden waren, wird als Klimawandelwirkung interpretiert. Die Methode ist in einer Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure beschrieben (VDI-Richtlinie 3957 Blatt 20). Im Beobachtungszeitraum von 27 Jahren seit 1996 stieg der Flechtendiversitätswert der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}) an 11 der 25 Messflächen an. Der mittlere Anstieg beträgt 0,52, was bedeutet, dass bei der Kartierung mittels eines Messgitters im Mittel an jedem zweiten Baum ein Klimawandelzeiger mehr als zu Beginn der Untersuchungen in einem Gitterfeld gefunden wurde. Mit dem Klimawandelzeiger-Index (KWI) steht eine weitere Kennzahl zur Verfügung. Diese ist in den 12 Jahren von 2011 bis 2023 im Mittel um 0,23 angestiegen. Ein KWI von 1 bedeutet, dass im Durchschnitt pro Baum (bei dieser Methode werden ganze Baumstämme untersucht) eine Klimawandelzeigerart kartiert wurde. In der kartografischen Darstellung (Abb. 18, Seite 32) zeigt sich, dass insbesondere in den westlichen Landesteilen in Unterfranken und am Bodensee deutliche Veränderungen eingetreten sind. Aber auch im östlichen Niederbayern, am Königssee und in München und Nürnberg zeigen die Flechten Veränderungen des lokalen Klimas an.

Der Projektteil des **Stadtklima-Biomonitorings** ist an das Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK) der TU München angebunden. Das ZSK entwickelt praktische Empfehlungen für Städte und Kommunen zur Nutzung grüner Stadtnatur im Rahmen der Klimaanpassung. Im vorliegenden Projekt wurde an einer neuen Methode gearbeitet. Das Ziel war, die räumliche Ausdehnung von Stadtklimaeffekten, die durch Überwärmung, Trockenheit und die Anreicherung von Luftschadstoffen verursacht werden, anhand von Flechten nachzuweisen. Für die ausgewählten Städte Aschaffenburg, Nürnberg und München erfolgte eine Flechtenkartierung von insgesamt 459 Trägerbäumen, verteilt auf 30 Messflächen pro Stadt. Aus den Datensätzen wurden nach Betrachtung der Nutzung und Versiegelung im Umfeld der Bäume zwei Gruppen von Indikatorarten identifiziert. Zum einen sind es häufigere Arten, die stark versiegelte Bereiche von Städten meiden (Urbanophobe), zum anderen solche, die die dortigen Standortfaktoren tolerieren (Urbanotolerante). Die Messgitter-Frequenzen der beiden Indikatorgruppen wurden mit Daten aus einem Klimaanalyse-Modell verglichen und für die Projektstädte in Karten dargestellt (Abb. 28, Seite 44, ff.). Es konnte für einige Messflächen, vor allem in Aschaffenburg und Nürnberg, gezeigt werden, dass auf Grünflächen, für die eine nächtliche Abkühlung modelliert wurde, die urbanophoben Arten höhere mittlere Frequenzen erreichen als im stark versiegelten Zentrum der jeweiligen Stadt. Die urbanophoben Flechtenarten können die günstige stadtklimatische Situation auf städtischen Grünflächen anzeigen. Weitere Aspekte des Stadtklimas, wie die Anreicherung von Luftschadstoffen, beeinflussen ebenfalls die dafür empfindlichen Flechten und wurden hier nicht untersucht. Daher konnten die Ergebnisse der Flechtenkartierung nicht vollständig durch die hier analysierten Parameter Nutzung, Versiegelung und nächtliche Abkühlung im Sommer erklärt werden. Weitere Analysen werden empfohlen.

Aus den Ergebnissen lassen sich allgemeine Handlungsempfehlungen für die Vermeidung der Auswirkungen städtischer Wärmeinseln ableiten. Die meisten Flechtenarten meiden die stark flächenversiegelten, überwärmten Stadtzentren. Zur Anpassung an den Klimawandelt werden Maßnahmen zur Absenkung der Lufttemperatur empfohlen. Ein Rückhalt von Wasser in der Stadt („Schwammstadt"), etwa durch einen hohen Anteil unversiegelter Grünflächen, ist anzustreben. Es wird empfohlen, die Konzentration von Luftschadstoffen zu verringern und stadtplanerische Maßnahmen zur verbesserten Durchlüftung der Innenstädte zu ergreifen. Besonders belastete, kritische Stadtgebiete sollten durch ein Monitoring überwacht werden.

Die **Luftgütekartierung** mit Flechten nach einer einheitlichen Erfassungsmethode startete in Bayern vor nunmehr 27 Jahren. Es liegen aktuell Flechtendaten aus 1996, 2011 und 2023 vor. In der aktuellen Kartierung wurden an 25 landesweiten Messflächen insgesamt 253 Trägerbäume auf ihren Flechtenbewuchs in einem Messgitter untersucht. Die Daten wurden nach den Vorgaben des Vereins Deutscher Ingenieure erhoben und ausgewertet (VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13). Die aktuelle Flechten-Luftgüte reicht auf einer fünfstufigen Skala von Stufe 2 (geringe Luftgüte) bis 5 (sehr hohe Luftgüte). Die räumliche Verteilung wird in einer Luftgütekarte dargestellt (Abb. 32, Seite 50). In den mittelfränkischen und nordschwäbischen Landesteilen stellt sich die lufthygienische Situation als ungünstig dar. Eine hohe Luftgüte weisen fünf Messflächen mit Schwerpunkt im Bayerischen Wald auf etwa 500 - 600 m ü. NHN und der Voralpen und Alpen auf. Die beste Luftgütestufe wurde nur an einer Messfläche (Bad Kissingen, Unterfranken) erreicht. Der überwiegende Teil der untersuchten Flächen ergab eine mäßige Luftgüte. Eine Hauptursache für die oben beschriebene ungünstige Bewertung wurde durch die Beurteilung der Wirkung eutrophierender Luftverunreinigungen gefunden, die Teil des Luftgüteindexes ist. Alle Messflächen der Luftgütestufe 2 (geringe Luftgüte) tragen den Eutrophierungsindex E5, was einen sehr starken Einfluss eutrophierender Verbindungen belegt. Zu diesen zählen reaktive Stickstoffverbindungen wie Ammoniak, Ammonium oder Nitrat, die gasförmig, gelöst oder partikelgebunden eingetragen werden können. Ein übermäßiger Eintrag eutrophierender Verbindungen wirkt sich negativ auf die meisten Flechten und auf die Bewertung der Luftgüte aus. Entsprechend finden sich bei hoher und sehr hoher Luftgüte keine Eutrophierungsindizes, die über Stufe 3 (mäßiger Einfluss eutrophierender Luftverunreinigen) liegen. Die zeitliche Entwicklung der durch Flechten angezeigten Luftgüte seit 1996 wird kartografisch und tabellarisch dargestellt. Im ersten Betrachtungszeitraum von 1996 bis 2011 hat die Luftgüte in weiten Teilen Bayerns nachgelassen. Im Folgezeitraum von 2011 bis 2023 hat sich die Luftgüte an den meisten Messflächen nicht geändert. Trotz der Fortschritte in der Luftreinhaltung der letzten Jahrzehnte zeigen Flechten aktuell keine Verbesserung der Luftgüte an. Dies wird vor allem auf ihre hohe Empfindlichkeit gegenüber eutrophierenden Verbindungen, insbesondere Ammoniak, zurückgeführt. Damit eignen sich Flechten auch als Bioindikatoren stellvertretend für eutrophierungsempfindliche Ökosysteme.

Es ließen sich auch neue Erkenntnisse zur Flechtenflora Bayerns gewinnen. So wurden mit *Arthonia ligniaria* und *Lecanora hybocarpa* nicht nur zwei bislang aus Bayern nicht bekannte Arten nachgewiesen. Darüber hinaus wurden auch Verbreitungsdaten zu vielen in Bayern extrem seltenen oder hochgradig bestandsgefährdeten Flechtenarten gewonnen. Solche bemerkenswerten Arten wurden ganz überwiegend in den Bayerischen Alpen und dem Alpenvorland festgestellt. Mit dem Nachweis von *Caloplaca monacensis* im Bereich der Messstation 252-Attenkam gelang auch ein Wiederfund für die kontinentale Region Bayerns.

Als letztes Fazit lässt sich sagen, das Flechten in diesem Projekt als Bioindikatoren für vielseitige Fragestellungen eingesetzt wurden. Veränderungen in Luftgüte, Klimawandel und Stadtklima konnten dokumentiert werden. Langzeitdaten von 1996 bis 2023 zeigen dynamische Veränderungen, die auf lokalklimatische Veränderungen und Umweltbelastungen wie eutrophierende Verbindungen zurückzuführen sind. Die Ergebnisse verdeutlichen einerseits den Einfluss des Klimawandels durch die

Ausbreitung klimawandelzeigender Flechtenarten, andererseits eine stagnierende durch Flechten angezeigte Luftgüte trotz der Fortschritte in der Luftreinhaltung. Zudem konnte eine Grundlage für das Stadtklima-Biomonitoring geschaffen werden. Die Ergebnisse des Projekts fließen in bundesweit einheitliche Richtlinien des VDI ein und tragen zur Weiterentwicklung der einschlägigen Methoden bei. Es wird empfohlen, das langfristige Monitoring unter Beibehaltung der standardisierten Aufnahmemethode fortzuführen.

2 Aufgabenstellung

Das vorliegende Projekt war im Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK) der Technischen Universität München eingebunden und wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanziert. Ziel des ZSK ist es, praktische Handlungsempfehlungen für Städte und Kommunen in Bayern zu erarbeiten, die zeigen, wie mit Hilfe der Ökosystemdienstleistungen der grünen Stadtnatur die nachhaltige Stadt der Zukunft an die Folgen des Klimawandels angepasst werden kann. Die interdisziplinären Aufgaben werden in Teilprojekten umgesetzt. Das vorliegende Projekt geht als Teilprojekt 15 (TP 15) mit dem Titel „Klimabiomonitoring durch Flechten in Bayern“ ein. Es wurde von Frau Dr. Jutta Köhler, Landesamt für Umwelt (LfU), betreut.

Die für das Land Bayern zahlreich vorliegenden Arbeiten, in denen Flechten als Indikatoren der Luftgüte eingesetzt wurden, sollten im Rahmen dieses ZSK-Teilprojekts weiter genutzt werden. Ziele waren zum einen, neue Erkenntnisse zum Monitoring des lokalen Klimawandels im ländlichen und urbanen Raum zu gewinnen und zum anderen, eine Methode zum Stadtklima-Biomonitoring zu entwickeln.

Bereits in einer Untersuchung im Jahre 2011 wurde erstmals das Monitoring des lokalen Klimawandels in das Programm mit aufgenommen (LfU-Projekt: Untersuchung der Wirkung des Klimawandels auf biotische Systeme in Bayern mittels Flechtenkartierung, Laufzeit: 2010 - 2011). Die Daten aus einer Erhebung 1996 wurden in das genannte Projekt integriert. Die Arbeit lieferte einen Beitrag zur Weiterentwicklung einer mittlerweile veröffentlichten Methode des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) zum Klimawandel-Biomonitoring mit Flechten. In der Richtlinie des VDI 3957 Blatt 20 werden sogenannte Klimawandelzeiger-Arten benannt, deren Vorkommen langfristig beobachtet werden sollen.

Als Betrachtungszeitrum für das Klima sind 30 Jahre üblich. Seit der ersten Flechtenkartierung 1996 sind nunmehr 26 Jahre vergangen. So trägt das vorliegende Projekt zu einer langfristigen Beobachtung bei. Es sollte untersucht werden, ob und inwieweit sich der Klimawandel auf die Bestände der definierten klimawandelzeigenden Flechtenarten seit den Untersuchungen 1996 und 2011 bis heute ausgewirkt hat.

Der Einsatz der Flechten für das Luftgüte- und Klimawandelmonitoring ist möglich, weil Flechten aufgrund ihrer biologischen Eigenschaften einen intensiven Austausch mit ihrer Umgebung betreiben. Im Gegensatz zu Höheren Pflanzen besitzen sie keine Cuticula (Wachsschicht) auf ihrer Oberfläche und nehmen Wasser, darin gelöste Stoffe und Gase (inklusive toxischer Gase) ungehindert über ihre gesamte Oberfläche auf. Die Wasserabgabe ist ebenfalls nicht reguliert, so dass Flechten nur stoffwechselaktiv sind, wenn sie ausreichend hydriert sind. Trockenphasen tolerieren sie in einem inaktiven Zustand. Die Verfügbarkeit von Wasser stellt somit einen begrenzenden Faktor für das Flechtenwachstum dar. Dabei gibt es artspezifische Unterschiede in der Fähigkeit, vorhandenes Wasser zu nutzen.

Zu den ausgesprochen trockenen Standorten für Flechten gehören die Oberflächen von Baumstämmen in Gebieten mit geringer Wasserverfügbarkeit. In vielen Bereichen größerer Städte herrschen mikroklimatische Verhältnisse, die es nur bestimmten wenigen Flechtenarten erlauben, dorthin vorzudringen. Es sollte geprüft werden, inwieweit Flechten die mikroklimatischen Ausprägungen städtischer Wärmeinseln nachzeichnen können und ob es möglich ist, kühlfeuchte Bereiche zu identifizieren. Weiterhin sollte auch die Frage behandelt werden, inwieweit eine solche Methode Ergänzungen zu städtischen Klimagutachten liefern kann. Und es sollte eine Einschätzung erfolgen, ob auch in Städten, für die keine Klimaanalyse vorliegt – biologisch wirksame Hitzeinseln sowie Kältegradienten/-schneisen nachgewiesen werden können. Die Methode, das sogenannte Stadtklima-Biomonitoring mittels Flechten, sollte in drei Städten Bayerns, die landesweit in unterschiedlichen Regionen liegen, erprobt und weiterentwickelt werden. Die Ergebnisse werden im VDI-Richtlinienausschuss diskutiert mit dem Ziel, zu einer bundesweit einheitlichen Vorgehensweise zu kommen.

Sowohl das Monitoring der Wirkungen des lokalen Klimawandels als auch die Untersuchung der Stadtklimaeffekte tragen zur laufenden Fortschreibung der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie bei. Die Kartierung ausgewählter Flechten als Indikator der Klimawirkungen im urbanen und ländlichen Raum soll mittelfristig in das Biomonitoring des LfU aufgenommen werden.

Zur Untersuchung der Luftgüte in Bayern werden seit Mitte der 1990er Jahre standardisierte Methoden des VDI in landesweitem Umfang eingesetzt. Die Arbeiten zur Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten wurden 1996 und 2011 durchgeführt und veröffentlicht (Vorbeck et al. 1997; Windisch et al. 2011). Eine weitere Aufgabe dieses Projekts ist es, mithilfe des bayernweiten Flechten-Monitorings vorhandene Datenreihen weiterzuführen und Aussagen zur langfristigen Entwicklung der Luftgüte sowie zum Einfluss eutrophierender Verbindungen zu erhalten. Der zeitliche Ablauf von der Erstellung des Konzeptes bis bin zum Projektabschluss wird aus Abb. 1 ersichtlich.

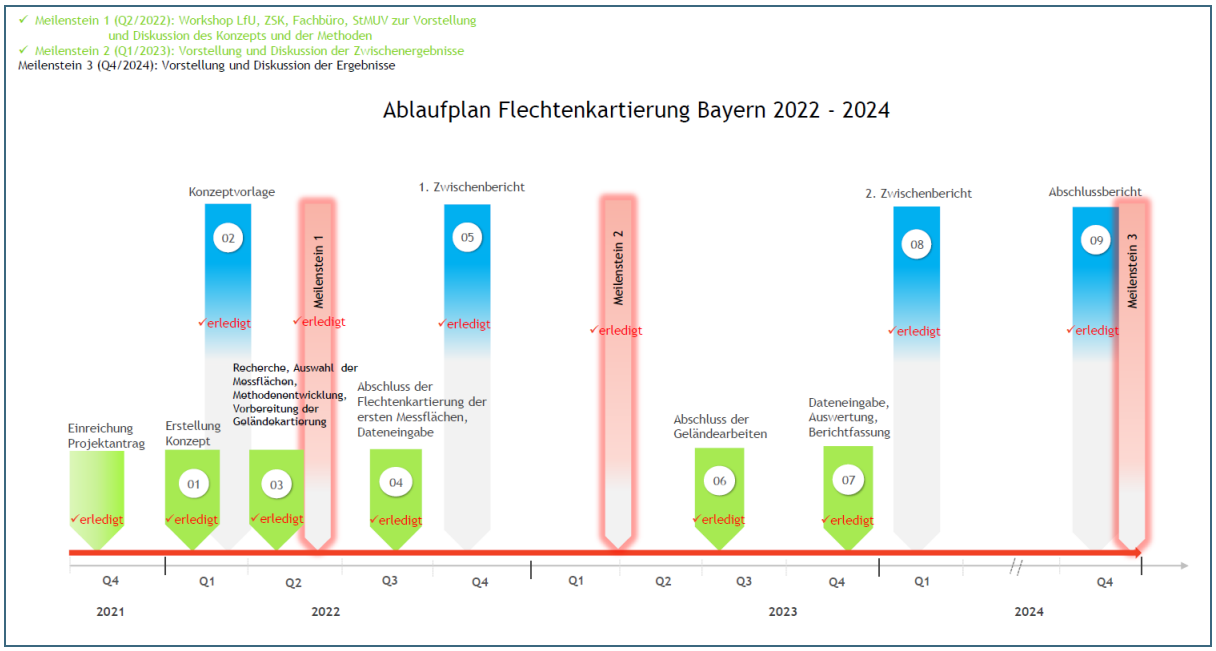


Abb. 1: Ablaufplan der Flechtenkartierung Bayern

Methoden

Die Methoden des vorliegenden Projekts behandeln die drei Themen lokaler Klimawandel, Stadtklima-Effekte und Luftgüte. Die Grunddatenerfassung der Flechtenkartierung verläuft nach den durch den Verein Deutscher Ingenieure standardisierten Verfahren. Je nach Untersuchungsziel erfolgt eine entsprechende Auswertung und Darstellung der Ergebnisse.

2.1 Flechten als Indikatoren des lokalen Klimawandels

Die Flechtenpopulationen in Deutschland verändern sich gegenwärtig mit einer großen Dynamik. Es wird eine Zunahme von Arten dokumentiert, die charakteristisch für subneutrale und schwach saure sowie nährstoffreiche Substrate sind. Aber auch Spezies milder Klimagebiete zeigen in vielen Teilen Deutschlands und benachbarten westeuropäischen Ländern (van Herk et al. 2002) einen deutlichen Anstieg ihrer Bestände. Bei Letzteren handelt es sich um Flechtenarten, die ihren Verbreitungsschwerpunkt in subatlantisch-submediterranen Regionen mit mild-feuchten Wintern und warm-feuchten Sommern haben. Diese Arten werden als Klimawandelzeiger bezeichnet. Es sind 45 Arten als solche identifiziert und gelistet (Richtlinie VDI 3957 Blatt 20). Die plausibelste Erklärung für die Verschiebungen der Arealgrenzen ist die Veränderung des Klimas in den letzten Jahrzehnten, auf die Arten milder und warmer Klimagebiete reagieren. Das Biomonitoring des lokalen Klimawandels dokumentiert die Bestände der Klimawandelzeiger mit einer standardisierten Methode und lässt Rückschlüsse auf die langfristigen Wirkungen des lokalen Klimawandels zu.

2.1.1 Auswahl der zu untersuchenden Messflächen

Es werden landesweit 25 Messflächen untersucht. Die Lage der Messflächen und weitere Informationen finden sich in Kapitel 3.3 (Luftgüteuntersuchung). Ausschlaggebend zur Auswahl der Flächen war insbesondere der geforderte Klimagradient in Bayern und die Nähe zu den Klimamessstationen des Deutschen Wetterdienstes.

2.1.2 Standardisierung der Flechten-Trägerbäume

Die Richtlinie zur Ermittlung der Wirkung von lokalen Klimaveränderungen mit Flechten ist - einige Jahre nach der letzten bayerischen Kartierung - im Jahr 2017 erstmalig erschienen (Richtlinie VDI 3957 Blatt 20). Die Anforderungen an die Trägerbäume wurden stringenter formuliert als dies in der Flechtenkartierung 2011 der Fall war. In diesem Projekt sollen dennoch nach Möglichkeit dieselben Bäume kartiert werden wie in 2011. Müssen jedoch ausgefallene Bäume ersetzt werden, sollen Bäume nach den Kriterien der neuen Richtlinie ausgewählt werden. Diese Kriterien sind:

- Es werden Bäume mit höherem Borken-pH-Wert verwendet (z. B. Spitzahorn, Gemeine Esche, Bergahorn, Linde, Weide, Walnuss, Apfelbaum, Ulme, Pappel und Robinie).
- Der Baum steht frei, der Stamm ist unbeschädigt und nicht durch Kletterpflanzen bewachsen.
- In einer Höhe von 1,3 m über dem Boden beträgt der Stammumfang 50 bis 250 cm.

Auch neu auszuwählende Bäume sollen wie die bisherigen möglichst nahe an einer Klimamessstation stehen.

2.1.3 Erfassung und Auswertung der Flechtendaten

Durch das erstmalige Erscheinen der Richtlinie (Richtlinie VDI 3957 Blatt 20) liegt eine einheitliche Methode für die Erfassung und Auswertung der Daten vor, der hier weitgehend gefolgt wird. So werden alle vorkommenden Flechtenarten sowohl am gesamten Baumstamm in einer Höhe von 0,5 bis 2 Meter über dem Boden als auch in einem am Baum befestigten Messgitter erfasst. Die Bestimmung der Flechten erfolgt mit dem Werk von Wirth et al. (Wirth et al. 2013) unter Berücksichtigung der

aktuellen Flechtennomenklatur (Printzen et al. 2023). In Einzelfällen wurden weitere aktuelle Publikationen zur Bestimmung herangezogen.

Zur Auswertung erfolgt die Berechnung der Indizes „Klimawandelzeiger-Index“ und „Diversitätswert der Klimawandelzeiger“ entsprechend den Vorgaben der Richtlinie. Diese Berechnung wird auch für die Datensätze aus den Kartierungen 1996 und 2011 vorgenommen. Ändert sich das Flechtenartenspektrum im Laufe der Jahre zugunsten der Klimawandelzeiger, wird dies als Wirkung des Klimawandels interpretiert. Die GIS-Daten des Projektes liegen vor und sind zu Beginn der Geländekartierung von den Kartierenden intern abrufbar.

2.2 Flechten als Indikatoren von Stadtklima-Effekten

Städte sind geprägt durch eine stärkere Bodenversiegelung und eine umfassendere Bebauung im Vergleich zum Umland. Oberflächenwasser wird meistens rasch abgeführt und steht so nicht mehr zur Verdunstung und Abkühlung zur Verfügung. Die Aktivitäten des Menschen führen zu einer Beeinträchtigung der Luftqualität. Emittenten wie Kfz-Verkehr, Industrie, Gewerbe und Hausbrand privater Haushalte produzieren gas- und partikelförmige Luftschadstoffe.

In Folge bildet sich ein „Stadtklima“ aus, das geprägt ist von Überwärmung, in den Sommermonaten von Überhitzung, zunehmend klimabedingter Trockenheit oder Starkregenereignissen und Anreicherung von Luftschadstoffen. Wenn sich, den Prognosen zum Klimawandel folgend, sommerliche Hitze und Dürre sowie Extremwetterereignisse verstärken (Klima-Report, StMUV 2021), betrifft dies insbesondere auch die Städte. Städte können als „Schaufenster in die Zukunft“ des Klimawandels bezeichnet werden, denn die städtische Wärmeinsel nimmt die globale Erwärmung bis zu einem gewissen Grad lokal voraus (Sukopp und Wurzel 1995). Insbesondere in den Sommermonaten birgt die Überhitzung der Städte Gefahrenpotenziale, vor allem für Ältere und Kinder. Von den Kommunen müssen daher zunehmend angepasste Hitze-Aktionspläne erstellt werden.

Um die negativen Wirkungen des Stadtklimas zu dokumentieren, werden geeignete Organismengruppen als Bioindikatoren eingesetzt. Flechten gehören dazu, da sie aufgrund ihrer physiologischen Besonderheiten sensibel auf das Stadtklima reagieren. Bei Flechten ist die Stoffwechselaktivität und Überlebensfähigkeit in hohem Maße von der Wasserverfügbarkeit (Regen, Nebel, Tau) abhängig. Letztere ist in stark versiegelten Stadtzentren herabgesetzt. Eine wärmere, trockenere und schadstoffangereicherte Luft in stark versiegelten Stadtzentren stellt eine lebensfeindliche Umgebung für Flechten dar. Die meisten Flechtenarten meiden daher die Stadtzentren („Urbanophobie“). Nur wenige Arten tolerieren solche Bedingungen in einem höheren Maße und dringen bis in stark versiegelte Stadtzentren vor und können als urbanotolerant bezeichnet werden.

Aufbauend auf Erkenntnissen bisheriger Arbeiten (Munzi et al. 2014, Windisch et al. 2018, Schmitz et al. 2021) leistet das vorliegende Projekt einen Beitrag zur Weiterentwicklung der Methode des Stadtklima-Biomonitoring, die vom Verein Deutscher Ingenieure (Richtlinienausschuss „Wirkungsfeststellung an Niederen Pflanzen“) derzeit entwickelt wird.

2.2.1 Auswahl dreier bayerischer Städte

In Bayern sollen für dieses Vorhaben drei Städte ausgewählt werden, für die aufgrund ihrer Besiedelungsdichte und nach Aussagen vorliegender Stadtklimagutachten eine städtische Wärmeinsel ausgebildet ist. Weiterhin sollen für diese Städte bereits immissionsbezogene Flechtenkartierungen nach einer standardisierten Methode (Richtlinie VDI 3957 Blatt 13) vorliegen, um Vorinformationen über die Flechtenbestände und die Ausstattung an geeigneten Trägerbäumen zu nutzen. Dies ist in fünf Städten der Fall (Tab. 1). München und Nürnberg rangieren auf der Liste der größten Städte Bayerns auf den ersten beiden Plätzen und können idealerweise auf eine Flechtenkartierung zurückgreifen.

Da die Arbeiten schon über zehn Jahre her sind, ist eine Betrachtung von klimarelevanten Tendenzen geplant. Beide Städte werden in das Projekt aufgenommen.

Für Platz 3 des Rankings kommen mehrere Städte in Frage. Auch eine Aufnahme der Stadt Würzburg wurde geprüft, aber wegen einer fehlenden Erstkartierung letztlich verworfen. So wird Aschaffenburg ausgewählt, weil es auf eine neuere Flechtenkartierung zurückgreifen kann und der Nordwesten des Landes im Projekt abgedeckt ist.

Tab. 1: Auswahl der zu untersuchenden Städte

Rang	Stadt	Fläche in km² *1	Einwohnerzahl vom 31.12.2020 *1	EW je km²	Flechtenkartierung, letzte	Flechten-Luftgütezone, letzte Kartierung	Anzahl Messflächen, letzte Kartierung	Stadtklimagutachten
1	München	310,7	1.488.202	4.790	2000*2	rot (Stadtzentrum) bis blau (Westen, Nordosten)	91	2014
2	Nürnberg	186,4	515.543	2.765	1998*3	rot (Altstadt, Bahnhof, etc.) bis gelb (Süden)	44	2014
3	Aschaffenburg	62,5	70.858	1.135	2015/2016*4	orange (Innenstadt) bis blau (Süden und Südosten)	44	2000
4	Bamberg	54,6	76.674	1.404	1999*5	rot (Stadtzentrum) bis grün (Südwesten und Südosten)	72	nicht verfügbar
5	Coburg	48,3	40.842	846	2018*6	orange (Norden) bis blau (Westen)	84	nicht verfügbar

*1: Bayerisches Landesamt für Statistik; *2: Vorbeck & Windisch (2000); *3: Windisch & Vorbeck (1998); *4: Vorbeck et al. (2016); *5: Vorbeck & Windisch (1999); *6: Windisch et al. (2019)

2.2.2 Auswahl homogener Flächen

In jedem städtischen Untersuchungsgebiet werden 30 Messflächen untersucht. Pro Messfläche werden vier bis sechs Bäume kartiert. Die Bäume einer Messfläche gehören zu einer homogenen Teilfläche, wie vom VDI in der neuen Richtlinienversion zur Flechtenkartierung veranschaulicht (Abb. 2).

Eine homogene Teilfläche ist durch gleichbleibende Standortfaktoren gekennzeichnet. In der Abbildung erfolgt die Abgrenzung homogener Teilflächen anhand der Nutzungstypen. Da jedoch auch innerhalb eines Nutzungstyps kleinräumig mit standörtlichen Abweichungen durch lokal begrenzte Besonderheiten (Fußwege, Beschattung, etc.) zu rechnen ist, wird das Vorliegen von Standort-Homogenität bei der Geländekartierung vor Ort abschließend überprüft. Die Kartierung erfolgt an nahe beieinanderstehenden Bäumen, die einer homogenen Teilfläche zugeordnet werden können.

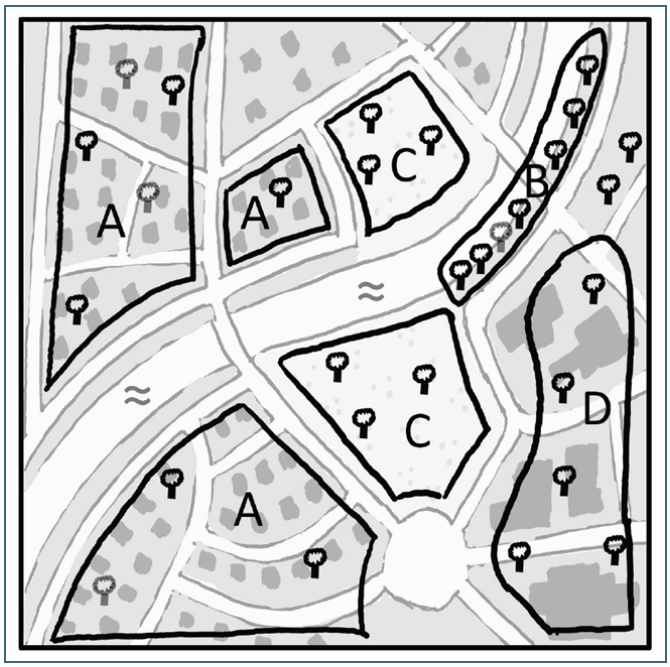


Abb. 2:
Abgrenzung homogener Teilflächen nach Richtlinie des VDI (VDI 3957 Blatt 13, 2023) nach Nutzungstypen; im Beispiel sind: A: Wohngebiet, B: Allee, C: Park, D: Industriegebiet)

Im Juli 2022 erfolgten Vorexkursionen mit Begutachtung zahlreicher Baumgruppen in München und Nürnberg, da die dortigen Flechtenkartierungen schon über 20 Jahre her sind und die damals kartierten Bäume möglicherweise nicht mehr vorhanden oder nicht mehr geeignet sind. Ziel war, im Vorfeld der Kartierung folgende Fragen zu beantworten:

- Welche Baumarten sind im Stadtgebiet durchgängig vorhanden und für eine Kartierung verfügbar?
- Wie lassen sich homogene Teilflächen bei der vorliegenden Fragestellung beschreiben und ist dies im Gelände praktikabel?
- Wo sollen die 30 Messflächen platziert werden, um einen Stadtklimagradienten abzudecken?
- Besteht die Möglichkeit, geeignete Trägerbäume in ausreichender Menge zu finden?

Für Aschaffenburg liegt eine Flechtenkartierung von 2015/16 vor (Vorbeck et al. 2016). Es wird angenommen, dass ein Großteil der Trägerbäume noch vorhanden ist. Daher wurden die Standortkoordinaten für Linde, Spitzahorn und Bergahorn dargestellt und unter Berücksichtigung der damaligen Luftgüteindizes das Untersuchungsgebiet abgegrenzt.

Aufgrund der Erkenntnisse aus den Vorexkursionen werden für die vorliegende Arbeit neue, der Fragestellung angepasste Kategorien aufgestellt, die die Nutzung und den Versiegelungsgrad der Flächen beschreiben. Die Versiegelung wird als Maß für die rasche Ableitung von Wasser aus dem urbanen Raum und die daraus folgende Erwärmung der Oberflächen herangezogen.

Für die Kategorien 1, 2 und 3a wird eine, mit einer hohen Flächenversiegelung einhergehende, ungünstige mikroklimatische Situation angenommen, während für die Kategorien 3b, 4 und 5 zunehmend günstigere mikroklimatische Verhältnisse erwartet werden. Kategorie 6 stellt die Referenz dar. Hier soll die Umgebung möglichst gering versiegelt sein und die Lebensbedingungen für Flechten sollen den naturräumlichen regionalen Bedingungen nahekommen, was durch eine möglichst günstige Flechten-Luftgütezone der letzten Flechtenkartierung bekräftigt wird.

- Kategorie 1: geschlossene Bebauung; zentrumsnah; hoher Versiegelungsgrad; nicht am Rand einer stark befahrenen Straße (> 15.000 Kfz/Tag)
- Kategorie 2: Straßenrand einer stark befahrenen Straße (> 15.000 Kfz/Tag); Versiegelungsgrad in der näheren Umgebung der Bäume hoch (> 50 %)
- Kategorie 3a: Rand einer verkehrsberuhigten Nebenstraße oder eines Radwegs oder kleiner Abstandsgrünstreifen; Versiegelungsgrad in der näheren Umgebung der Bäume hoch (> 50 %)
- Kategorie 3b: Rand einer verkehrsberuhigten Nebenstraße oder eines Radwegs oder kleiner Abstandsgrünstreifen; Versiegelungsgrad in der näheren Umgebung der Bäume gering bis mäßig (< 50 %)
- Kategorie 4: kleinere inselartige Grünanlage, Park oder Friedhof (> 2 ha)
- Kategorie 5: größere Grünanlage, Park oder Friedhof (> 20 ha)
- Kategorie 6: Referenz Umland, Flechten-Luftgüte mindestens mäßig (gelb) (nach letzter Flechtenkartierung nach VDI 3957 Blatt 13, vgl. Tab. 2) und Versiegelungsgrad in der näheren Umgebung der Bäume gering bis mäßig (< 50 %)

Pro Kategorie ergeben sich, abhängig von der Verfügbarkeit im Gelände, drei bis sieben homogene Teilflächen (Messflächen).

2.2.3 Standardisierung der Flechten-Trägerbäume

Die Untersuchung erfolgt an Trägerbäumen, die bestimmte Anforderungen erfüllen müssen. Diese sind in Flechtenkartierungsrichtlinien beschrieben (z. B. VDI 3957 Blatt 13, 2023). Sie sind:

- frei und geradestehend, mit Sonneneinstrahlung am Stamm zumindest während eines Teils des Tages
- Stammumfang in 1,3 m Höhe von 70 bis 250 cm
- Baumarten mit vergleichbaren Borkeneigenschaften, z. B. bezüglich des Borken-pH-Wertes

Die Zahl der Baumarten wird für das Stadtklima-Biomonitoring im Sinne der Standardisierung eingeschränkt. Es werden Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*), Spitzahorn (*Acer platanoides*) sowie Linde (*Tilia* spp.) verwendet.

Im Gelände werden Eigenschaften, Standortfaktoren und geografische Koordinaten der kartierten Bäume in einem Aufnahmebogen notiert.

2.2.4 Erfassung und Auswertung der Flechtendaten

Es wird auch hier ein Messgitter verwendet (Beschreibung in Kap. 2.3), das für die Dauer der Flechtenaufnahme am Mittelstamm des Baums fixiert wird (siehe Abb. 4). Es werden alle Flechtenarten im Messgitter kartiert. Vorkommen und Anzahl der bewachsenen Gitterfelder werden notiert. Die Bestimmung der Flechten erfolgt mit dem Werk von Wirth et al. (Wirth et al. 2013).

Mittels der Datenauswertung werden Muster in der Flechtenbesiedelung der untersuchten Städte untersucht. Es wird geprüft, in welchem Maße die Versiegelung im Umfeld der Trägerbäume die Flechtenbestände beeinflusst. Weiterhin werden Daten aus einem Stadtklimamodell zum Vergleich herangezogen.

2.3 Flechten als Indikatoren der Luftgüte

Ergänzend zu den bereits aufgeführten Fragestellungen soll die durch Flechten angezeigte Luftgüte wiederholt erfasst werden. Die letzten landesweiten immissionsbezogenen Flechtenkartierungen fanden 1996 und 2011 im Auftrag des LfU und mit Finanzierung durch das StMUV statt:

- Windisch, U., Vorbeck, A. (1996): Flechten als Bioindikatoren der Luftgüte in Bayern. Gutachten im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt; veröffentlicht unter Vorbeck et al. (1997)
- Windisch, U., Vorbeck, A., Eichler, M., Cezanne, R. (2011): Untersuchung der Wirkung des Klimawandels auf biotische Systeme in Bayern mittels Flechtenkartierung. Publikationen zum Thema Luftreinhaltung des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit.

Beide Kartierungen waren mit der seinerzeit gültigen Fassung der Richtlinie VDI 3957 Blatt 13 durchgeführt und ausgewertet worden. Die Diversität epiphytischer Flechten, aufgenommen in einem Messgitter am Mittelstamm von standardisierten Trägerbäumen, dient als Indikator für die Luftgüte sowie die Wirkungen von eutrophierenden Luftverunreinigungen.

Die Vorgehensweise lässt sich in diskrete Arbeitsschritte untergliedern:

2.3.1 Auswahl der zu untersuchenden Messflächen

Für das längerfristige Monitoring mittels Untersuchung der epiphytischen Flechten von standardisierten Trägerbäumen werden 25 geeignete Messflächen ausgewählt. Die Kriterien zur Eignung der Messflächen werden im Folgenden genannt.

Das Messnetz orientiert sich in erster Linie an dem bestehenden Messnetz der Flechtenkartierung 2011 (Windisch et al. 2011), um die Kontinuität des langfristig angelegten Monitorings zu gewährleisten. Die 25 damals untersuchten Messflächen werden übernommen (Abb. 3, Tab. 2). Die Messflächen decken einen großen Klimagradienten ab. So liegt die Fläche in Kahl am Main in Unterfranken auf 107 m ü. NHN bei einer Niederschlagssumme von 714 l/m^2 und einer vergleichsweise hohen Jahresmitteltemperatur von 10,8 °C, während die alpine Messfläche am Wendelstein auf 1.832 m ü. NHN liegt und mit 2,3 °C die kälteste Messfläche ist und 1.773 l/m^2 Niederschlag empfängt (DWD-Daten für den Zeitraum 1996-2010).

Die Anforderungen an die Messflächen wurden in der Arbeit aus 2011 detailliert beschrieben und können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Die Messflächen liegen maximal innerhalb eines Umkreises von 10 km um eine der Klimamessstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD).
- In jedem Naturraum Bayerns befindet sich mindestens eine Messfläche.
- Die Messflächen weisen einen Gradienten bezüglich klimarelevanter Parameter (Höhenlage, Jahresmitteltemperaturen, Niederschlagssumme usw.) auf.
- Es müssen mindestens sechs, nach Möglichkeit 12 standardisierte Trägerbäume in ausreichender Menge vorhanden sein.
- Die Messflächen liegen in ländlichen Gebieten und sind möglichst unbeeinflusst von Stadtklimaeffekten und größeren Immissionsquellen (Autobahn usw.). Einige Vergleichsstandorte sind in Ballungsräumen (München, Nürnberg) positioniert.

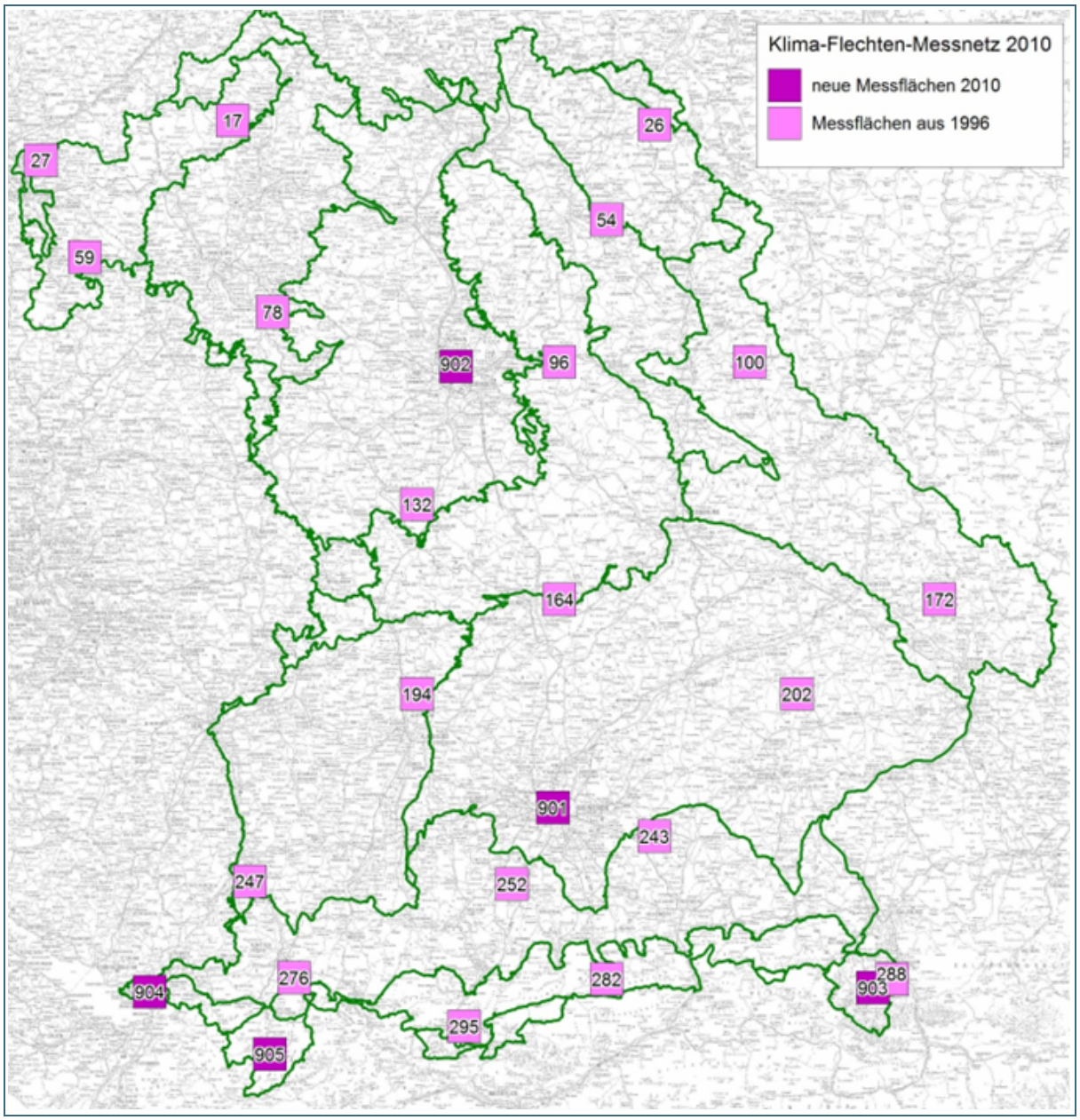


Abb. 3: Messflächen für die Flechtenkartierung 2022-2024 (aus: Windisch et al. 2012)

Tab. 2: Liste der Messflächen für die Flechtenkartierung 2022-2024

Nr.	Name	Nr. DWD-Station	mittlere Höhe in m ü. NHN
17	Bad Kissingen	2597	282
26	Selb/Oberfranken-Lauterbach	4548	609
27	Kahl am Main	2480	107
54	Fichtelberg/Oberfr.-Hüttstadl	1357	657
59	Röllbach	3319	239
78	Gollhofen	5149	308
96	Pommelsbrunn-Mittelburg	3975	522
100	Oberviechtach	3739	596
132	Weißenburg	5440	422
164	Kösching	2700	417
172	Saldenburg-Entschenreuth	4354	456
194	Augsburg	232	416
202	Falkenberg, Kr. Rottal-Inn	1332	472
243	Ebersberg-Halbing	1103	592
247	Memmingen	3244	615
252	Attenkam	217	672
276	Oy-Mittelberg-Petersthal	3857	872
282	Wendelstein	5467	1.832
288	Berchtesgaden/Obersalzberg	110	950
295	Mittenwald-Buckelwiesen	3307	981
901	München-Stadt	3379	515
902	Nürnberg	3668	314
903	Schönau am Königssee	361	616
904	Sigmarszell-Zeisertsweiler	4704	507
905	Oberstdorf	3730	806

2.3.2 Standardisierung der Flechten-Trägerbäume

Im Sinne der Kontinuität der Datenerhebung werden dieselben Bäume wie bei der letzten Kartierung im Jahr 2011 untersucht, sofern sie noch vorhanden sind. Da die letzte Kartierung jedoch über zehn Jahre her ist, werden voraussichtlich nicht mehr alle Bäume vorhanden bzw. noch geeignet sein. Ersatzbäume werden entsprechend der Kriterien der Richtlinie ausgewählt (VDI 3957 Blatt 13, 2023), wie z. B. freier Stand der Bäume oder Verwendung von Baumarten mit vergleichbarem Borken-pH-Wert.

Die GIS-Daten des Projektes (z. B. die Koordinaten der Trägerbäume aus 2011) liegen vor und sind zu Beginn der Geländekartierung abrufbar.

2.3.3 Erfassung der Flechtendaten im Gelände

Am Mittelstamm des Trägerbaums wird in 1,5 Metern Höhe ein Aufnahmegitter an der am stärksten mit Flechten bewachsenen Seite angelegt (Abb. 4). Es werden alle Flechtenarten im Aufnahmegitter erfasst und notiert, in wie vielen der zehn Gitterfelder sie vorhanden sind. Die Bestimmung der Flechten erfolgt mit dem Werk von Wirth et al. (Wirth et al. 2013).

Im Rahmen dieser Kartierung wurde die Flechtennomenklatur auf den neuesten Stand gebracht und auch für die Daten der letzten Kartierungen aktualisiert.



Abb. 4:
Mittelstamm eines Trägerbaums mit Aufnahmegitter

Damit folgt die Aufnahmemethode der landesweiten Kartierung in 2011 und entspricht den Vorgaben der Neufassung der Richtlinie VDI 3957 Blatt 13, Anhang B (2023).

2.3.4 Auswertung und Berechnung der Luftgüteindizes

Die Berechnung der Luftgüteindizes erfolgt nach der entsprechenden Richtlinie des VDI (VDI 3957 Blatt 13, 2023). Ein Beispiel ist Anhang 4 zu entnehmen. Aus der Anzahl der im Aufnahmegitter vorhandenen Arten und deren Häufigkeit werden zunächst Flechten-Diversitätswerte (FDW) errechnet. Die FDW werden für die Eutrophierung anzeigenden Arten (Eutrophierungszeiger) und für die übrigen Spezies (Referenzarten) getrennt berechnet. Eutrophierungszeiger sind die in Tab. 3 genannten Arten. Die Einschätzung der Arten als Eutrophierungszeiger basiert auf den Zeigerwerten für Pflanzen nach Wirth (2010). In einer neunstufigen Skala werden dabei die Ansprüche der Arten gegenüber wichtigen ökologischen Faktoren wie dem Nährstoffangebot des Standortes ausgedrückt.
Die Richtlinie erschien 2023 in einer Neufassung. Relevant für die Berechnung der Luftgüteindizes ist insbesondere die Erweiterung der Liste der Eutrophierungszeiger (Tab. 3). Es wurden Arten ergänzt, die in den letzten 15 Jahren vermehrt gefunden wurden und als Eutrophierungszeiger gelten (z. B. *Candelaria concolor*). Auch gesteinsbewohnende Arten, die bei starker Staubimprägnierung der

Bäume auf diesen siedeln können und häufiger in den Datensätzen von Flechtenkartierungen auftauchen (z. B. *Candelariella aurella*, *Candelariella vitellina*) finden sich auf der neuen Liste. Schließlich wurden Taxa, die bei der Geländekartierung kaum auseinander zu halten sind, in Gruppen zusammengefasst (z. B. *Candelariella efflorescens* / *C. xanthostigmoides* / *C. reflexa*).

Tab. 3: Vergleich der Listen der Eutrophierungszeiger nach VDI-RICHTLINIE 3957 Blatt 13 der Erscheinungsjahre 2005 und 2023; in Klammern in älterer Literatur gebräuchliche Synonyme

Flechtentaxa	**2005**	**2023**
Athallia cerinella / A. cerinelloides (syn. Caloplaca cerinella / C. cerinelloides)		x
Athallia holocarpa / A. pyracea (syn. Caloplaca holocarpa / C. pyracea)	x	x
Candelaria concolor		x
Candelaria pacifica		x
Candelariella aurella		x
Candelariella efflorescens / C. xanthostigmoides / C. reflexa (= Candelariella reflexa s. lat.)		x
Candelariella vitellina		x
Catillaria nigroclavata		x
Flavoplaca citrina (syn. Caloplaca citrina)	x	x
Polyozosia dispersa (syn. Lecanora dispersa)	x	x
Polyozosia hagenii / P. persimilis (syn. Lecanora hagenii / L. persimilis)	x	x
Phaeophyscia nigricans	x	x
Phaeophyscia orbicularis	x	x
Physcia adscendens	x	x
Physcia caesia	x	x
Physcia dubia	x	x
Physcia tenella	x	x
Physciella chloantha		x
Physconia grisea	x	x
Polycauliona candelaria / P. ucrainica (syn. Xanthoria candelaria / X. ucrainica)	x	x
Polycauliona phlogina (syn. Caloplaca phlogina)		x
Polycauliona polycarpa (syn. Xanthoria polycarpa)	x	x
Protoparmeliopsis muralis (syn. Lecanora muralis)	x	x
Rinodina oleae / R. gennarii		x
Rinodina pityrea		x
Rinodina spp.	x	
Xanthomendoza huculica (syn. Oxneria huculica)		x
Xanthoria parietina	x	x

Mit den ermittelten Flechten-Diversitätswerten wird in der Bewertungsmatrix der Luftgüteindex (LGI) ausgelesen (Abb. 5). Für jede Messfläche wird ein LGI ermittelt. Der Luftgüteindex repräsentiert die Belastung durch säurebildende und eutrophierende Luftverunreinigungen. Der Index setzt sich aus zwei Ziffern zusammen, die durch ein „E“ getrennt sind. Die erste Ziffer des Indexes entspricht der Luftgüte und ist mit einer Farbe gekoppelt, die zweite Ziffer symbolisiert den Einfluss eutrophierender Luftverunreinigungen (Abb. 6). Dabei wird die Luftgüte verbal in fünf Stufen bewertet und mit der entsprechenden Farbe in der Luftgütekarte gekennzeichnet. Beispielsweise belegt ein LGI von „5 E1“ eine sehr hohe Luftgüte bei einem sehr geringen Einfluss eutrophierender Luftverunreinigungen.

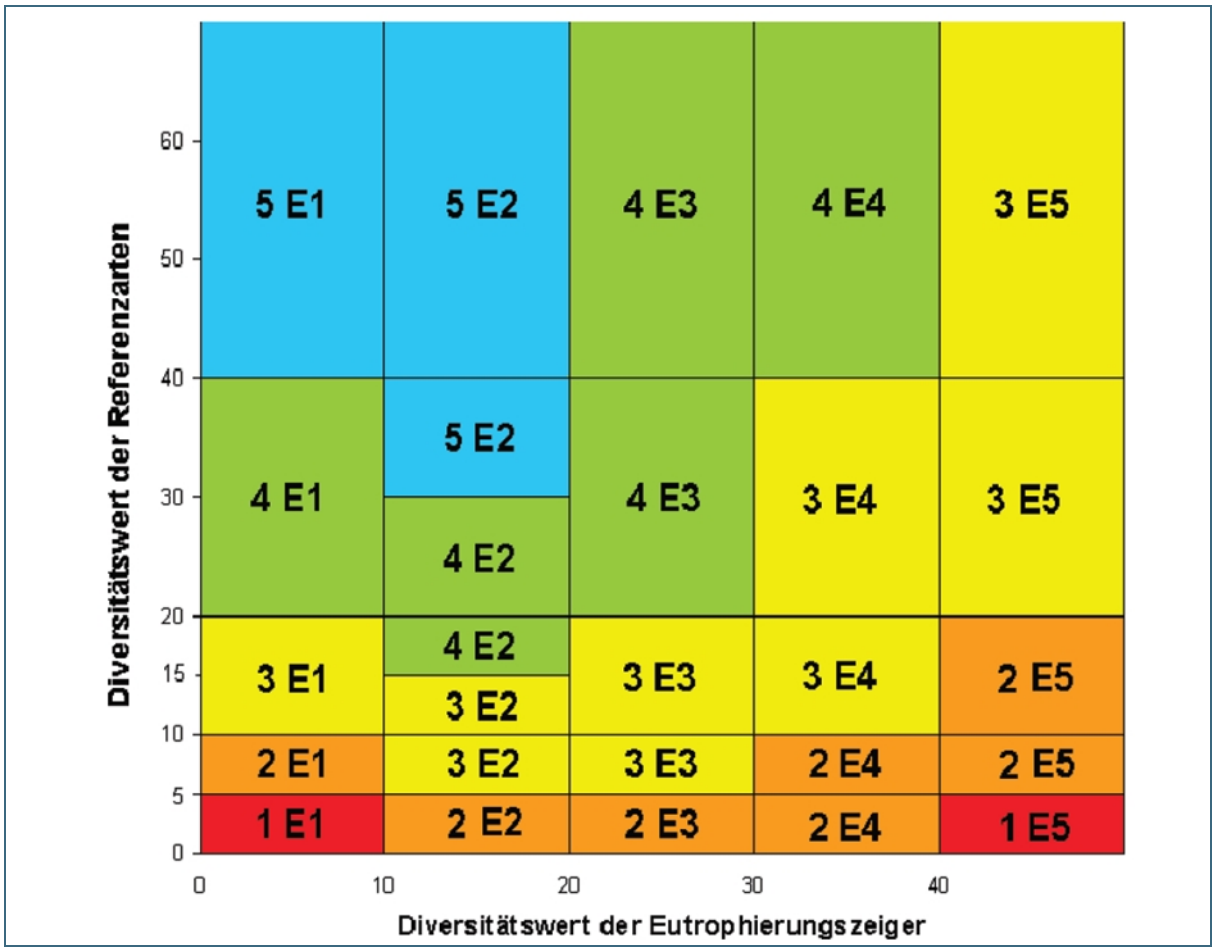


Abb. 5: Bewertungsmatrix zur Ermittlung des Luftgüteindexes anhand der Kombination der Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger und der Referenzarten (Datenerhebung nach VDI-Richtlinie 3579 Blatt 13, 2023, Anhang B)

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

Abb. 6: Erläuterung zur Bewertungsmatrix, VDI-Richtlinie 3579 Blatt 13 (2023)

2.3.5 Auswirkungen der neuen Richtlinienfassung auf das laufende Projekt

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

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

Eine Ausnahme stellt die recht häufige Artengruppe *Candelariella reflexa* s. lat. dar, die seit Richtlinienversion 2023 erstmalig als Eutrophierungszeiger gilt. In ihr werden die bisher kaum erfassten und im Gelände nicht unterscheidbaren Spezies *C. xanthostigmoides* und *C. efflorescens* mit der kenntlichen *C. reflexa* s. str. zusammengefasst. *Candelariella reflexa* (in der damaligen Artauffassung) wurde in der Kartierung 1996 noch gemeinsam mit *C. xanthostigma* kartiert und ausgewertet, wobei *C. reflexa* s. lat. gegenüber *C. xanthostigma* die deutlich häufigere Art war: In 2011 wurden von *C. reflexa* s. lat. durchschnittlich 4,67 Datensätze pro Baum kartiert, während es bei *C. xanthostigma* 1,99 Datensätze pro Baum waren. Daher erhält die kartierte Artengruppe für das Jahr 1996 den Status „Eutrophierungszeiger“. Seit 2011 werden *Candelariella reflexa* s. lat. und *C. xanthostigma* getrennt kartiert.

Es erfolgt eine Neuberechnung aller Grunddaten seit 1996 nach den Vorgaben der neuen Richtlinienfassung. Dabei kann es an einzelnen Messflächen zu Neueinstufungen der Luftgüte aufgrund der Neubewertung der Eutrophierungszeiger kommen.

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

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Grunddatenerfassung des Projekts wurde im Jahr 2023 abgeschlossen. Es stehen somit Flechten-Datensätze von den 25 Messflächen des Klimawandel- und des Luftgütemonitorings zur Verfügung. Die Datensätze der Luftgütekartierung gehen zusätzlich in die Bewertung der Wirkungen des lokalen Klimawandels ein. Weiterhin liegen die Daten für das Stadtklimamonitoring der drei untersuchten Städte Aschaffenburg, Nürnberg und München vor (Tab. 4).

Tab. 4: Datensätze der Flechtenkartierung zu den drei untersuchten Themen

Projektthema	Anzahl der untersuchten Bäume	Anzahl der Flechten-Datensätze
lokaler Klimawandel	499	7.311
Stadtklima	459	5.137
Luftgüte	253	2.949
Summe	1.211	15.397

Die Liste der gefundenen Flechtenarten ist dem Anhang 3 zu entnehmen. Es wurden 239 Taxa erfasst, darunter auch zahlreiche Arten, die in der Roten Liste der Flechten Bayerns (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019) aufgeführt sind. 15 der im Rahmen des Projekts festgestellten Flechtenarten sind als vom Aussterben bedroht eingestuft (Rote Liste 1), 15 gelten als stark gefährdet (Rote Liste 2).

Tab. 5: Rote-Liste-Arten der Kategorien 1 und 2 in Bayern mit Angabe der alpinen oder kontinentalen Region

Taxon	Rote Liste Bayern	Rote Liste BY Alpin	Rote Liste BY Kont.	Anzahl der Messflächen [Region]
Anaptychia ciliaris (Abb. 10)	2	2	1	4 [Kont.]
Bacidia igniarii	1	R	0	1 [Alpin]
Biatora beckhausii	2	G	2	1 [Alpin]
Biatoridium monasteriense	2	1	2	2 [Alpin]
Calicium adspersum	2	R	2	1 [Kont.]
Caloplaca monacensis	1	R	0	3 [Alpin, Kont.]
Chaenotheca phaeocephala	2	3	2	2 [Kont.]
Collema nigrescens (Abb. 11)	2	2	1	2 [Alpin]
Gyalecta fagicola	2	2	2	11 [Alpin, Kont.]
Gyalecta truncigena (Abb. 12)	1	1	1	3 [Alpin]
Gyalecta ulmi (Abb. 7)	1	2	1	1 [Alpin]
Lecidea nylanderi	2	2	2	1 [Alpin]
Leptogium saturninum	2	V	0	1 [Alpin]
Melanelixia subargentifera (Abb. 15)	2	V	2	14 [Alpin, Kont.]
Ochrolechia subviridis	2	2	2	1 [Kont.]
Peltigera collina (Abb. 13)	2	2	1	1 [Alpin]
Phaeophyscia hirsuta (Abb. 8)	1	1	0	2 [Alpin]
Physcia aipolia	2	3	2	4 [Alpin, Kont.]
Ramalina fastigiata	1	1	1	1 [Alpin]

Taxon	Rote Liste Bayern	Rote Liste BY Alpin	Rote Liste BY Kont.	Anzahl der Messflächen [Region]
Ramalina fraxinea	2	3	2	2 [Alpin, Kont.]
Rinodina colobina	1	1	1	1 [Alpin]
Rinodina sophodes	1	G	1	1 [Kont.]
Rostania occultata	1	1	1	1 [Alpin]
Sclerophora pallida (Abb. 9)	1	2	1	2 [Alpin]
Scutula circumspecta (Abb. 14)	1	1	1	1 [Alpin]
Scytinium fragrans	1	1	0	1 [Alpin]
Scytinium teretiusculum	2	V	2	1 [Alpin]
Solitaria chrysophthalma	1	1	1	2 [Alpin]
Sphinctrina anglica	1	1	1	1 [Kont.]

Die geografische Verteilung jener Flechtenarten, insbesondere der Rote-Liste-1-Arten, stellt sich sehr unterschiedlich dar. Mit Abstand am meisten der vom Aussterben bedrohten Arten fanden sich an Bäumen der Messflächen 295 Mittenwald-Buckelwiesen (sechs Arten) und 905 Oberstdorf (acht Arten). Unter diesen Arten (Rote-Liste-Kategorie 1) hervorzuheben sind *Bacidia igniarii*, *Gyalecta ulmi*, *Phaeophyscia hirsuta*, *Rinodina colobina, Rostania occultata, Sclerophora pallida* und *Scytinium fragrans*. Bedeutsame Funde stellen außerdem die in Bayern als extrem selten (Rote Liste R) eingestuften Arten *Arthopyrenia salicis*, *Candelariella viae-lacteae*, *Fuscidea lightfootii*, *Gyalideopsis helvetica*, *Lecanora horiza*, *Psoroglaena dictyospora* und *Rinodina capensis* dar.



Abb. 7: *Gyalecta ulmi* – in Bayern vom Aussterben bedroht



Abb. 8: *Phaeophyscia hirsuta* – in Bayern vom Aussterben bedroht

Die Messstationen mit den meisten Arten der Rote-Liste-Kategorien 1 und 2 – 295 Mittenwald-Buckelwiesen (elf Arten), 905 Oberstdorf (zehn Arten), 288 Obersalzberg (acht Arten), 903 Schönau (fünf Arten) – liegen allesamt in den Bayerischen Alpen. Höhere Werte ergaben sich auch für die Stationen, 247 Memmingen (vier Arten), 252 Attenkam (vier Arten) und 276 Oy-Mittelberg (vier Arten) im Alpenvorland. Einzig die im Norden Bayerns gelegene Messtation 17 Bad Kissingen (vier Arten) weist eine vergleichbar hohe Anzahl von stark gefährdeten und vom Aussterben bedrohten Flechtenarten auf.



Abb. 9: *Sclerophora pallida* – in Bayern vom Aussterben bedroht



Abb. 10: *Anaptychia ciliaris* – in Bayern stark gefährdet



Abb. 11: *Collema nigrescens* – in Bayern stark gefährdet

Mit *Arthonia ligniaria* und *Lecanora hybocarpa* konnten zwei bislang aus Bayern nicht bekannte Arten festgestellt werden. Mit dem Nachweis von *Caloplaca monacensis* im Bereich der Messstation 252 Attenkam gelang zudem auch ein Wiederfund für die kontinentale Region Bayerns. Erstaunlich häufig wurden *Gyalecta fagicola* (an 11 von 24 Messflächen) und *Melanelixia subargentifera* (an 14 von 24 Messflächen) registriert. Beide Arten scheinen – wie auch *Physcia aipolia* – zumindest in Süddeutschland in Ausbreitung begriffen zu sein und dürften inzwischen auch in Bayern nicht mehr stark gefährdet sein. Ebenfalls vergleichsweise häufig fand sich die in Deutschland auf das Alpenvorland und die

Alpen beschränkte, nach Wirth et al. (2023) wohl auch übersehene *Physcia vitii* (Rote Liste G), die an insgesamt acht Messflächen in zum Teil großen Populationen vorkommt.



Abb. 12: *Gyalecta truncigena* – in Bayern vom Aussterben bedroht



Abb. 13: *Peltigera collina* – in Bayern stark gefährdet



Abb. 14: *Scutula circumspecta* – in Bayern vom Aussterben bedroht



Abb. 15: Melanelixia subargentifera – in Bayern stark gefährdet



Abb. 16: Physcia vitii – in Bayern Gefährdung unbekannten Ausmaßes

3.1 Wirkungen des lokalen Klimawandels

Zum Nachweis der Wirkungen des lokalen Klimawandels wurden Flechten an 25 bayerischen Messflächen kartiert. Erfasst wurden die vorkommenden Flechtenarten

- im Messgitter am Mittelstamm der Bäume; die Daten dienen zur Berechnung des „Diversitätswerts der Klimawandelzeiger“ (FDW_{KWZ}) **und**
- am gesamten Baumstamm; die Daten dienen zur Berechnung des „Klimawandelzeiger-Index“ (KWI)

Mit diesen beiden Erfassungsmethoden werden derzeit landesweit 15 der 45 in der Richtlinie ausgewiesenen Klimawandelzeigerarten an den untersuchten Bäumen dokumentiert (Tab. 6). Die Blattflechten *Punctelia jeckeri* und *Punctelia subrudecta* (Abb. 17) wurden am häufigsten erfasst. Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass die Indikatorflechten bei Untersuchung ganzer Baumstämme prozentual an mehr Bäumen notiert wurden als auf der deutlich kleineren Fläche des Messgitters. Eine Reihe von klimawandelzeigenden Arten wäre nicht erfasst worden, wenn die Kartierung nur mit dem Messgitter erfolgt wäre. Jedoch liegen dank der Messgitterkartierung, die im Rahmen der Luftgüteuntersuchungen bereits 1996 begonnen wurde, längerfristige Daten vor. Daher wird empfohlen, auch bei zukünftigen Kartierungen beide Erfassungsmethoden zu nutzen, um die langfristigen Auswirkungen des Klimawandels zu dokumentieren.

Tab. 6: Liste der erfassten Klimawandelzeigerarten mit Angabe ihrer Häufigkeit für beide angewendete Erfassungsmethoden

Taxon	**bewachsene Baumstämme in %**	**bewachsene Messgitterflächen in %**
Punctelia jeckeri	29,3	15,8
Punctelia subrudecta	13,6	6,7
Melanohalea elegantula	10,0	7,1
Flavoparmelia caperata	6,0	2,0
Halecania viridescens	3,4	0,8
Flavoparmelia soredians	2,0	0,4
Hypotrachyna afrorevoluta	1,8	0,4
Bacidina neosquamulosa	1,0	0
Fuscidea lightfootii	0,6	0
Punctelia borreri	0,6	0,4
Hypotrachyna revoluta	0,2	0
Lecanora hybocarpa	0,2	0
Pyrenula nitida	0,2	0
Ropalospora viridis	0,2	0
Parmotrema perlatum	0	0,4



Abb. 17: Auswahl von Klimawandelzeigern in Bayern: *Punctelia subrudecta* (Foto: Kirschbaum), *Hypotrachyna afrorevoluta* (Foto: Eichler/Cezanne), *Flavoparmelia soredians* (Foto: Eichler/Cezanne), *Melanohalea elegantula* (Foto: Kirschbaum), von oben links nach unten rechts

Ein zeitlicher Vergleich der Indizes mit denen früherer Untersuchungen zeigt eine Zunahme sowohl des Flechtendiversitätswertes der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}), als auch des KWI an vielen der untersuchten Messflächen (Tab. 7).

Der FDW_{KWZ} aus der Messgitterkartierung, der ab 1996 ermittelt werden kann, ist seit Beginn der Untersuchung an 11 der 25 Messflächen angestiegen. Der mittlere Anstieg von 1996 bis 2023 beträgt +0,54. Ein FDW_{KWZ} von 1 bedeutet, dass im Durchschnitt pro Baum eines von zehn Feldern des Messgitters von einer Klimawandelzeigerart bewachsen ist. Die höchsten Zuwächse zeigen die Messflächen Röllbach (59) mit +5,40, Bad Kissingen (17) mit +1,83, Saldenburg-Entschenreuth (172) mit +1,90, München-Stadt (901) mit +1,95 und Sigmarszell-Zeisertsweiler (904) mit +2,20. Sieben Messflächen weisen negative FDW_{KWZ} (-0,1 bis -1,70) auf. Hier nahmen die Diversitätswerte der Klimawandelzeiger im Vergleichszeitraum ab. Die betrachteten Arten haben sich offensichtlich hier nicht weiter etabliert und es kann folglich angenommen werden, dass der lokale Klimawandel sich hier bisher nicht ausgewirkt hat. Letzteres gilt auch für Differenzwerte von 0,00. Neben lokalklimatischen Veränderungen kommen auch weitere Ursachen in Frage, wenn klimawandelzeigende Flechtenarten bei einer Wiederholungsuntersuchung nicht kartiert werden können. So könnten Trägerbäume nicht mehr existieren, es können zwischenzeitlich Nutzungsänderungen wie Beweidung vorliegen oder Konkurrenz, z. B. durch Moose, aufgetreten sein. Auch lokale Immissionen wie Hausbrand mit starker Rußentwicklung könnten die Bestände geschädigt haben.

Für die Messfläche 282 (Wendelstein) liegen keine FDW_{KWZ}-Daten aus der Messgitterkartierung vor, weil in dieser Höhe keine Trägerbäume gefunden werden konnten, die den genannten Anforderungen entsprechen.

Tab. 7: Zeitliche Entwicklung der Flechten-Klimawandelindizes an den bayerischen Flechten-Messflächen

Nr.	FDW_{KWZ} 1996	FDW_{KWZ} 2011	FDW_{KWZ} 2023	FDW_{KWZ} Differenz 1996-2023		KWI 2011	KWI 2023	KWI Differenz 2011-2023
17	0,00	1,08	1,83	+1,83		0,45	0,53	+0,08
26	0,00	0,10	0,30	+0,30		0,20	0,15	-0,05
27	0,57	2,75	0,67	+0,10		1,19	1,65	+0,46
54	0,00	0,00	0,80	+0,80		0,24	0,53	+0,29
59	0,50	4,60	5,90	+5,40		1,10	2,50	+1,40*
78	0,00	0,17	0,00	0,00		0,05	0,05	0,00
96	0,00	0,00	0,00	0,00		0,10	0,25	+0,15
100	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,15	+0,15
132	0,67	0,08	0,00	-0,67		0,50	1,00	+0,50
164	0,10	0,10	1,11	+1,01		0,20	0,50	+0,30
172	0,60	1,40	2,50	+1,90		0,50	1,35	+0,85*
194	0,00	0,08	0,00	0,00		0,25	0,40	+0,15
202	0,10	0,00	0,00	-0,10		0,25	0,40	+0,15
243	1,33	1,00	0,10	-1,23		0,70	0,55	-0,15
247	1,10	1,00	0,45	-0,65		0,40	0,50	+0,10
252	1,21	2,18	0,36	-0,85		0,65	0,50	-0,15
276	0,00	0,08	0,27	+0,27		0,35	0,55	+0,20
282	k. Daten	k. Daten	k Daten			0,00	0,05	+0,05
288	0,14	0,00	0,00	-0,14		0,33	0,45	+0,12
295	1,07	0,10	0,10	-0,97		0,40	0,30	-0,10
901	0,25	2,40	2,20	+1,95		0,67	0,90	+0,23
902	0,00	0,30	1,20	+1,20		0,65	1,30	+0,65
903	k. Daten	1,70	0,00	-1,70		0,30	0,80	+0,50
904	0,00	8,44	2,20	+2,20		1,75	1,55	-0,20
905	0,00	0,17	0,18	+0,18		0,35	0,38	+0,03
			$\bar{X}$:	**+0,54**			**$\bar{X}$:**	**+0,23**

Erläuterungen: FDW_{KWZ}: Flechtendiversitätswert der Klimawandelzeiger, basierend auf Kartierung im Messgitter; KWI: Klimawandelzeiger-Index, basierend auf Kartierung ganzer Baumstämme (Untersuchung seit 2011); *: signifikante Änderung (Mann-Whitney U-Test, $p < 0,05$)

Der Klimawandelzeiger-Index (KWI) ist seit 2011 im Mittel um +0,23 angestiegen. Ein KWI von 1 bedeutet, dass im Durchschnitt pro Baum eine Klimawandelzeigerart kartiert wurde. Die KWI erhöhten sich insbesondere an den Messflächen 59 (Röllbach), 172 (Saldenburg-Entschenreuth), 902 (Nürnberg) 132 (Weißenburg), 903 (Schönau am Königssee) und 27 (Kahl am Main). Signifikant ist der Anstieg an den Messflächen 59 ($p = 0,003$) und 172 ($p = 0,005$), ermittelt mit dem Mann-Whitney U-Test.

Rückläufige KWI mit ausgesprochen niedrigen Differenzen (-0,05 bis -0,2) wurden an fünf Messflächen ermittelt und an einer Messfläche ergab sich ein Wert von 0. An diesen Flächen sind keine mit dieser Methode nachweisbaren Wirkungen des lokalen Klimawandels eingetreten.

Somit zeigen beide Indizes eine zunehmende Wirkung des lokalen Klimawandels an (Abb. 18). Besonders auffällig betrifft dies die Messflächen in Unterfranken im Nordwesten des Landes. Aber auch in anderen Gebieten Bayerns werden Klimawandelwirkungen nachgewiesen, so im östlichen Niederbayern, am Bodensee, am Königssee und an den städtischen Messflächen in München und Nürnberg.

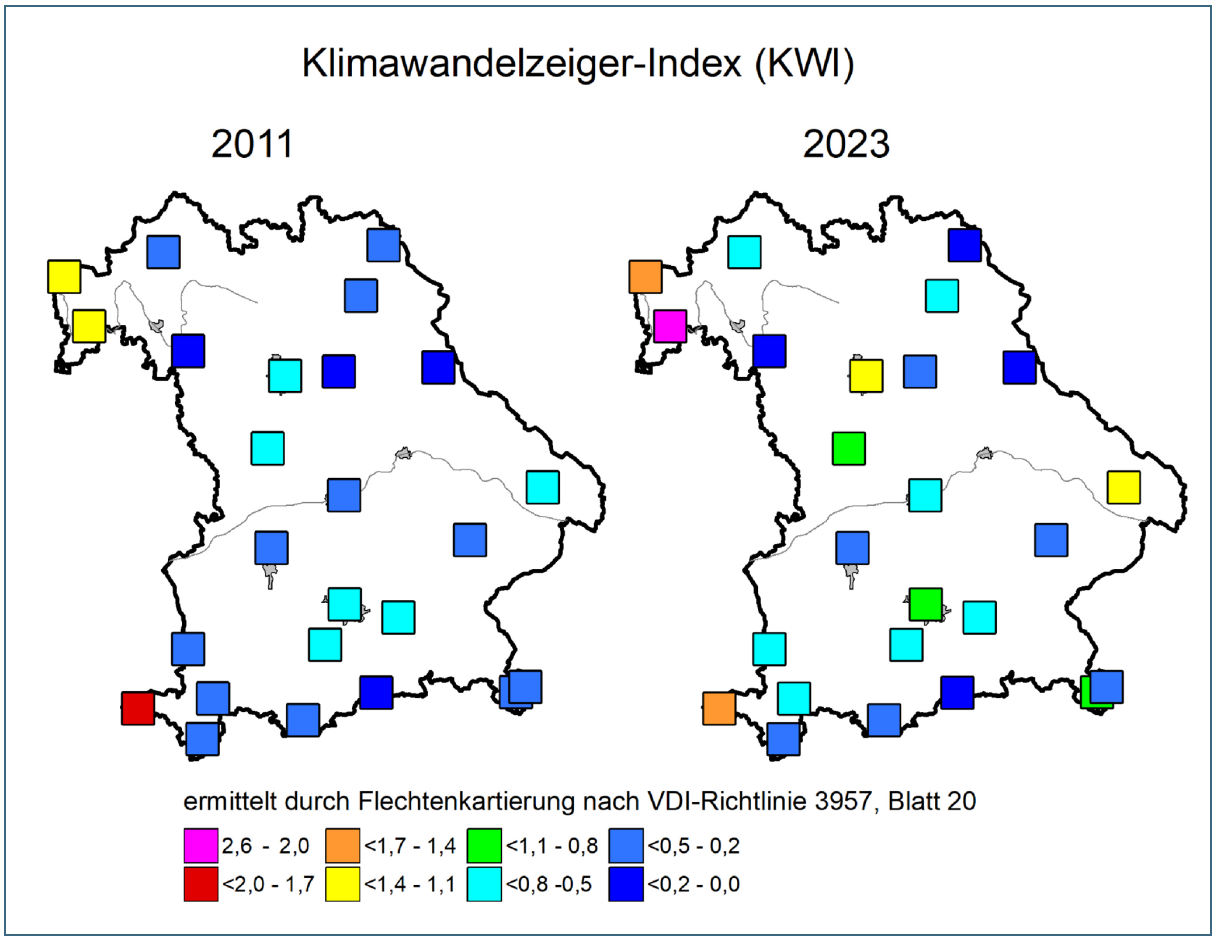


Abb. 18: Entwicklung des Klimawandelzeiger-Index (KWI) von 2011 bis 2023 aus der Kartierung der Flechten von Baumstämmen

Der Zusammenhang des Klimawandelzeiger-Indexes mit den langjährigen Temperaturdaten zeigt einen mittleren Pearson-Korrelationskoeffizienten von r = 0,52 (Abb. 19). Ein stärkerer Zusammenhang ist nicht zu erwarten, da weitere Aspekte des Klimas wie die jahreszeitliche Verteilung von Temperatur und Niederschlägen eine Rolle für die Flechtenverbreitung spielen. Auch ist bekannt, dass die klimawandelzeigenden Flechtenarten sich bundesweit von Westen und Süden her ausbreiten. So kann davon ausgegangen werden, dass westliche Landesteile unter lokalklimatisch günstigen Bedingungen früher von den Indikatorarten besiedelt werden als solche, die weiter im Osten liegen.

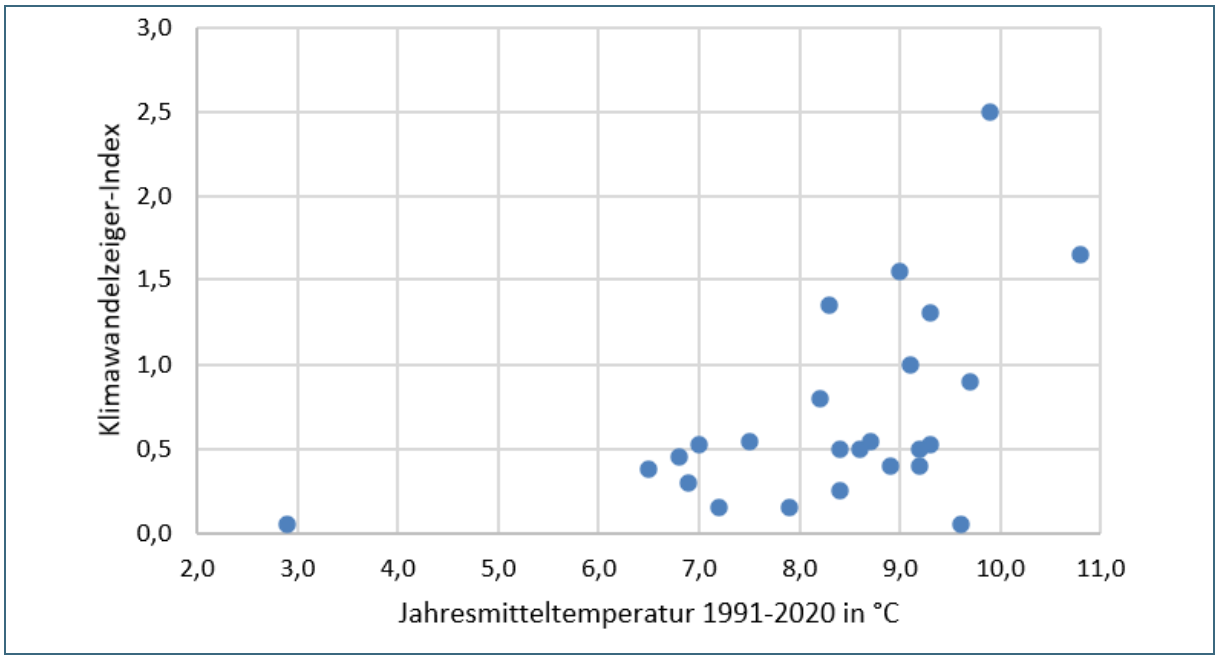


Abb. 19: Zusammenhang des Klimawandelzeiger-Indexes mit den langfristigen Jahresmitteltemperaturen (DWD; vgl. Anhang 1)

3.2 Effekte des Stadtklimas auf Flechten

Die untersuchten Städte liegen in unterschiedlichen Naturräumen und unterscheiden sich hinsichtlich ihres Großklimas.

Stadt	Temperatur in °C Jahresmittel 1991-2020	Niederschlag in mm Jahresmittel 1991-2020
Aschaffenburg	10,7	665
Nürnberg	9,8	600
München	10,1	940

Tab. 8:
Langfristige Temperatur- und Niederschlagsdaten der untersuchten Städte (Quelle: DWD)

Somit liegen in München mit vergleichsweise hohen Niederschlägen günstige Voraussetzung für das Flechtenwachstum vor. Es sollte nun für die drei Städte geprüft werden, inwieweit der Effekt der städtischen Wärmeinsel die Flechtenvegetation verändert. Die Erfassung der Flechtendaten wurde im Methodenteil erläutert.

3.2.1 Identifikation von Indikatorarten zum Nachweis von Stadtklimawirkungen

Aus den kartierten Daten wurden Flechtenarten identifiziert, die für das Biomonitoring des Stadtklimas geeignet sind. Dabei wurde zunächst der Blick auf das Wasserangebot städtischer Lebensräume gerichtet. Flechten sind nur stoffwechselaktiv, wenn genügend Wasser in Form von Regen, Nebel oder Tau vorhanden ist, so dass der Flechtenkörper (Thallus) einen ausreichenden Wassergehalt hat. In diesem Fall wird Biomasse aufgebaut und die Flechte wächst. Bleibt das Wasser aus, trocknet die Flechte aus und geht in einen Ruhezustand über, der nach Beschel (1955) als „Zustand latenten Lebens“ bezeichnet wird. Bei hoher Flächenversiegelung mit raschem Wasserabfluss und resultierender Überwärmung kann in Stadtgebieten z. B. der morgendliche Taufall ausbleiben und die relative Luftfeuchtigkeit niedriger sein als im Umland. Beides führt zu längeren Trockenzeiten der Flechten. Als Folge wird ihre Zahl stark reduziert. Nur wenige, relativ trockentolerante Arten können diesen Bedingungen weitgehend standhalten.

So wurde die Flächenversiegelung vor Ort in der Umgebung der kartierten Trägerbäume notiert und in Kategorien eingeteilt. Es wurde geprüft, welche Arten in den untersuchten Städten bei hoher Versiegelung höhere Frequenzen im Aufnahmegitter erreichen als bei geringer Versiegelung, wie sie beispielsweise in Grünanlagen oder im städtischen Umland anzutreffen ist. Umgekehrt war von Interesse, welche Arten bei geringer Versiegelung höhere Frequenzen erreichen. Hier wurden nur die häufigeren Arten betrachtet, die in einer der Nutzungskategorien eine mittlere Frequenz > 0,1 erreichten. Arten mit niedrigeren Frequenzen < 0,1 werden hier nicht betrachtet, weil sie für die vorliegende Fragestellung kaum relevant sind. Die Datensätze der Kategorie 3b (Rand einer verkehrsberuhigten Nebenstraße oder eines Radwegs oder kleiner Abstandsgrünstreifen; Versiegelungsgrad in der näheren Umgebung der Bäume gering bis mäßig (< 50 %)) wurden für die Darstellung in Tab. 9 nicht verwendet, da die Kategorie 3b eine Mittelstellung zwischen den beiden Kategorie-Gruppen einnimmt.

Bei hoher Versiegelung erreichten nur wenige Arten höhere Frequenzen als auf Flächen mit geringer Versiegelung (Tab. 9). Dies waren *Phaeophyscia nigricans*, *Phaeophyscia orbicularis*, *Physcia adscendens* und *Xanthoria parietina*. Hingegen zeigte eine größere Anzahl von häufigeren Taxa ein gegenläufiges Verhalten. Sie erreichten auf Bäumen, die auf gering versiegelten Flächen stehen, höhere Frequenzen. Dazu gehören neben sieben weiteren Arten vor allem *Parmelia sulcata* und *Physcia tenella*. Die günstigeren mikroklimatischen Bedingungen ermöglichen das Gedeihen der Flechten.

An beiden Enden der Skala können folglich Arten gefunden werden, die sich für ein Stadtklima-Biomonitoring eignen.

Die Einstufung von *Physcia tenella* als urbanophobe Art ist zunächst überraschend, sind deren ökologischen Ansprüche doch sehr ähnlich jenen der als urbanotolerant klassifizierten *Physcia adscendens* (N-Wert 7 nach Wirth 2010 versus N-Wert 8 bei der letztgenannten Art). Der Grund für die trotzdem verschiedene Einnischung dürfte am unterschiedlichen Konkurrenzverhalten liegen. *Physcia adscendens* vermag sich bei hohem Eintrag von Stickstoffverbindungen gegenüber *P. tenella* durchzusetzen und dichte Dominanzbestände an Bäumen auszubilden. Die unter solchen Bedingungen offenbar deutlich konkurrenzschwächere *Physcia tenella* tritt dagegen erst unter weniger extremen Bedingungen stärker in Erscheinung.

Tab. 9: Identifizierung von häufigeren Flechtentaxa, die in Aschaffenburg, Nürnberg und München in stark versiegelten Stadtbereichen unterschiedliche Frequenzen erreichen als auf unversiegelten Grünflächen und im Umland

Taxon	mittl. Frq Kat.1,2,3a (hohe Versiegelung)	mittl. Frq Kat.4,5,6 (geringe Versiegelung)	Differenz
Phaeophyscia nigricans	2,17	1,07	1,10
Phaeophyscia orbicularis	4,08	3,18	0,90
Physcia adscendens	2,86	2,25	0,61
Xanthoria parietina	1,42	0,97	0,45
Candelaria concolor	1,84	1,70	0,14
Candelariella reflexa s. str.	0,46	0,32	0,14
Physcia dubia	0,15	0,03	0,12
Physcia caesia	0,14	0,04	0,10
Physconia grisea	0,71	0,64	0,08
Candelariella xanthostigma	0,39	0,47	-0,07
Polycauliona polycarpa	0,08	0,17	-0,09
Lepraria incana agg.	0,23	0,33	-0,10
Phlyctis argena	0,04	0,16	-0,13
Melanelixia glabratula	0,08	0,22	-0,14
Lecidella elaeochroma	0,07	0,22	-0,15
Hyperphyscia adglutinata	0,29	0,47	-0,18
Polycauliona candelaria-Gr.	0,03	0,21	-0,18
Amandinea punctata	0,28	0,53	-0,25
Punctelia subrudecta	0,19	0,46	-0,27
Melanelixia subaurifera	0,05	0,33	-0,28
Punctelia jeckeri	0,15	0,44	-0,29
Candelariella reflexa s. lat.	2,09	2,40	-0,31
Melanohalea elegantula	0,10	0,44	-0,34
Melanohalea exasperatula	0,29	0,81	-0,52
Physcia tenella	1,91	2,56	-0,64
Parmelia sulcata	0,55	1,37	-0,82

Erläuterung der Tabelle: mittl. Frq.: mittlere Häufigkeit der Flechten in einem 10-Felder-Messgitter an Bäumen der genannten Nutzungskategorien (Kat. 1: geschlossene Bebauung, zentrumsnah; 2: Rand einer stark befahrenen Straße und hohe Versiegelung; 3a: Rand einer verkehrsberuhigten Nebenstraße und Versiegelung > 50%; nicht berücksichtigt: 3b: Rand einer stark befahrenen Straße und Versiegelung < 50%; 4: kleinere Grünanlage, Park oder Friedhof; 5: größere Grünanlage, Park oder Friedhof; 6: Referenz Umland); gelistet sind nur die häufigeren Arten mit einer Frequenz > 0,1 in einer der Spalten 1 und 2. Orangetöne: Taxon ist in stark versiegelten Stadtbereichen häufiger; Blautöne: Taxon ist auf unversiegelten Grünflächen und im Umland häufiger; Weiß: kein nachweisbarer Unterschied.

Im vorliegenden Projekt ist die Datenbasis mit Flechtendaten von nur 459 Bäumen relativ gering. Daher wurden die hier als Indikatoren identifizierten Arten mit denen anderer Projekte verglichen. In einer Arbeit im hessischen Wiesbaden und im rheinland-pfälzischen Mainz wurde gefunden, dass die Vertreter der Gattungen *Phaeophyscia* und *Hyperphyscia* bis in stark versiegelte Stadtgebiete vordringen (Windisch et al. 2018). Ein ähnliches Bild zeigen Untersuchungen in nordrhein-westfälischen Städten Düsseldorf und Mettmann, wo die Flechtenarten *Phaeophyscia nigricans* und *Phaeophyscia orbicularis* sich ebenfalls als urbanotolerant erwiesen (VDI-Richtlinienausschuss, mündlich, Norbert Stapper, September 2024). Nach aktuellen Kenntnissen kann ihre Frequenz im Messgitter von Bäumen deutschlandweit zur Bioindikation von Stadtklimawirkungen herangezogen werden.

Weiterhin sind die Flechtenarten, die stark versiegelte Bereiche von Städten meiden, zur Indikation von Stadtklimaeffekten geeignet. Da dies aufgrund der Physiologie der Flechten die meisten Arten betrifft, ist die Artenzahl der möglichen Indikatoren hier höher. In der Praxis relevant sind besonders die in Städten häufigeren und im Gelände gut identifizierbaren Arten freistehender Laubbäume. Für die weitere Auswertung der vorliegenden Arbeit werden urbanotolerante und urbanophobe Flechtenarten definiert (Tab. 10). Die Einteilung gibt den aktuellen Diskussionsstand im VDI-Richtlinienausschuss wieder, zu dem die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit beigetragen haben. Weiter urbanophobe Arten der Projektstädte sind in Tab. 10 unten angegeben, wurden jedoch folgend nicht ausgewertet.

Tab. 10: Einteilung häufiger Flechtenarten aufgrund ihrer Fähigkeit, Stadtklimaeffekte zu tolerieren

Urbanotolerante Flechtenarten	Urbanophobe Flechtenarten
Phaeophyscia nigricans Phaeophyscia orbicularis	Hypogymnia physodes Parmelia saxatilis/serrana/ernstiae Parmelia sulcata Phlyctis argena Physcia tenella Punctelia jeckeri Punctelia subrudecta für die bayerischen Projektstädte weitere mögliche urbanophobe Indikatorarten Amandinea punctata Candelariella reflexa s. lat. Melanelixia subaurifera Melanohalea elegantula Melanohalea exasperatula

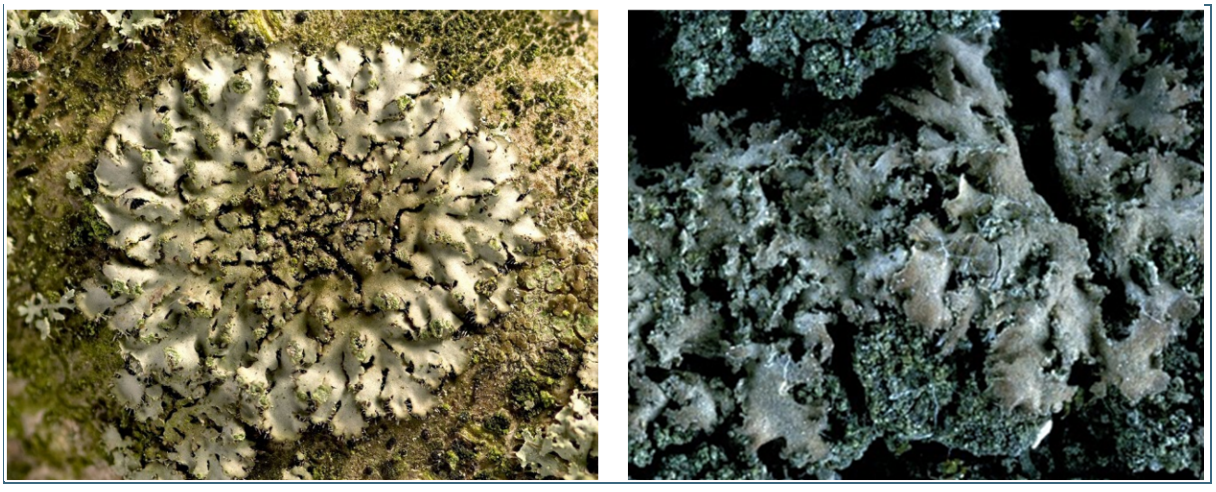


Abb. 20: Tolerant gegenüber städtischen Belastungsfaktoren: Urbanotolerante Blattflechtenarten *Phaeophyscia orbicularis* (links) und *Phaeophyscia nigricans* (rechts)



Abb. 21: Meiden stark versiegelte Bereiche von Städten: Urbanophobe Blattflechtenarten *Physcia tenella* und *Parmelia sulcata*

Bei einem Anstieg der mittleren Frequenzen im Messgitter von urbanotoleranten Flechtenarten nimmt die Frequenz der urbanophoben Arten tendenziell ab (Abb. 22). Hohe Schwankungen und ein Pearsonscher Korrelationskoeffizient von r = -0,4 deuten auf einen nur mittlerer Zusammenhang hin, der generell bei Umweltuntersuchungen aufgrund zahlreicher Umwelteinflüsse zu erwarten ist.

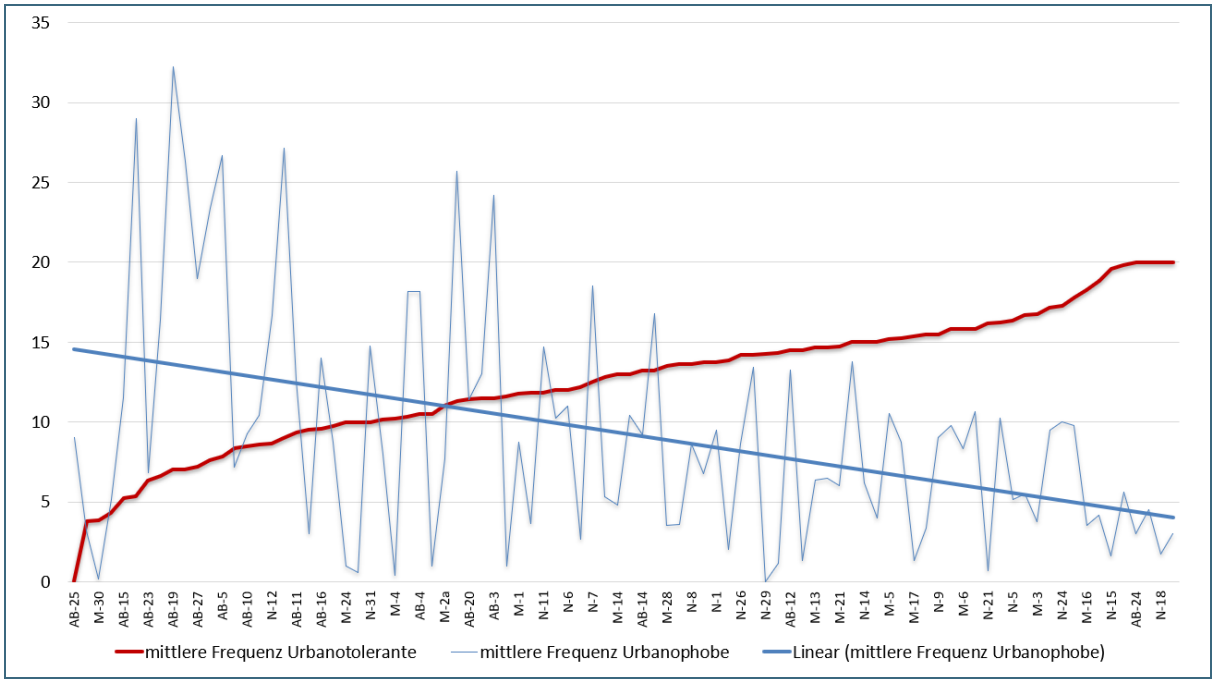


Abb. 22: Mittlere Frequenzen urbanotoleranter und urbanophober Flechtenarten; Untersuchung von Flechten im 10-Felder-Messgitter an Trägerbäumen auf homogenen Teilflächen in Aschaffenburg (AB), Nürnberg (N) und München (M)

3.2.2 Flechten-Kenndaten für die Projektstädte

Die mittleren Flechten-Frequenzsummen pro Teilfläche wurden für die drei Projektstädte nach Nutzungskategorien geordnet und dargestellt (Abb. 23). Die beiden urbanotoleranten Arten (*Phaeophyscia nigricans, Ph. orbicularis*) erreichten in der Nutzungskategorie 2 (Rand einer stark befahrenen Straße und hohe Versiegelung) die höchsten Frequenzen, während sie in der Nutzungskategorie 6 (Referenz Umland) niedrigere Frequenzen erreichten. Die Unterschiede zwischen den Kategorien 3a, 3b, 4 und 5 sind hinsichtlich der mittleren Frequenzsumme jedoch minimal und statistisch nicht relevant; lediglich gegenüber den Kategorien 1 und 2 ergeben sich geringe Unterschiede. Bei den urbanophoben Flechtenarten zeigt sich wieder ein gegenläufiges Bild. Auf den Flächen der Kategorie 1-3, die stark versiegelt sind, ist ihre Frequenz niedrig. Sie steigt an, wenn die Bäume auf weniger versiegelten Flächen, in Grünanlagen oder im städtischen Umland (Kategorien 4 bis 6) stehen. Auffällig ist, dass sowohl bei den urbanotoleranten als auch bei den urbanophoben Arten kein Unterschied zwischen den Kategorien 4 und 5 feststellbar ist. Nach dem vorliegenden Datensatz spielt die Ausdehnung von Grünflächen bzw. Parks keine signifikante Rolle für das Vorkommens dieser Arten.

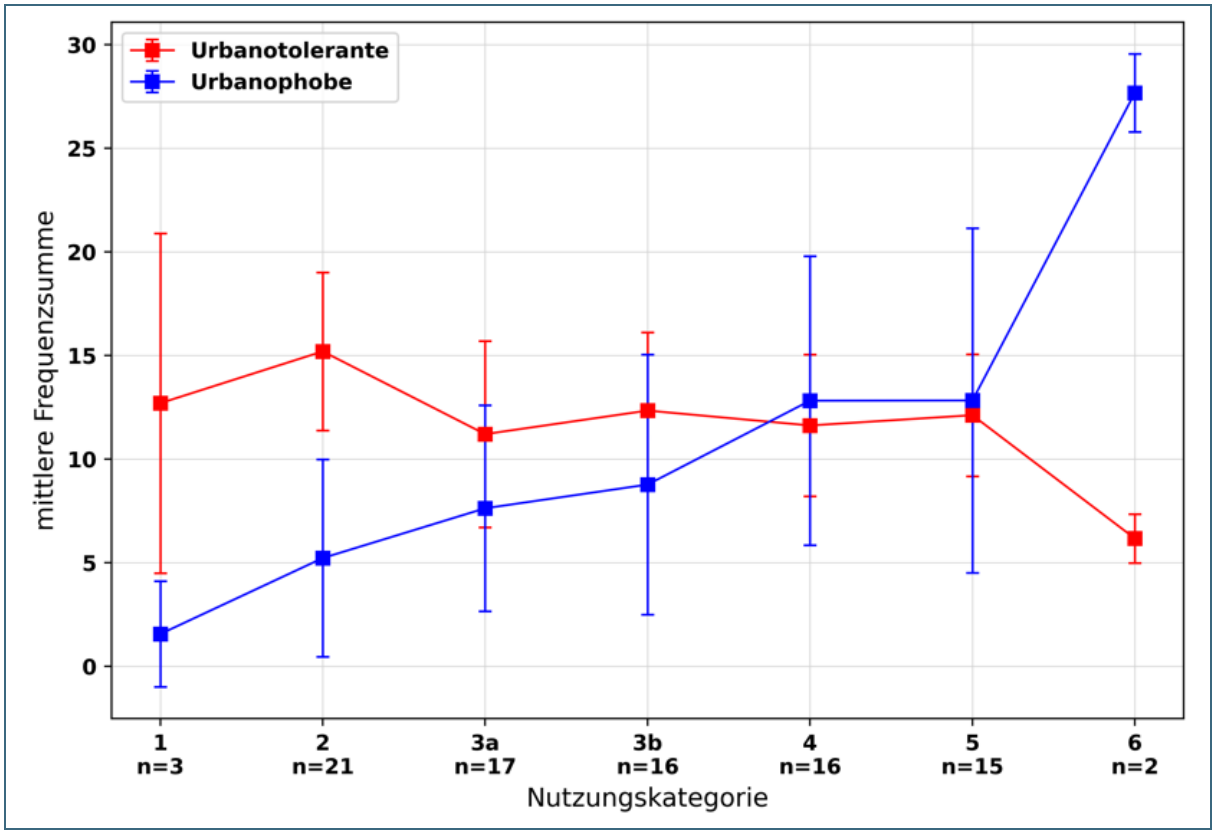


Abb. 23: Mittlere Frequenzsumme pro homogener Teilfläche für urbanotolerante und urbanophobe Flechtenarten, geordnet nach Nutzungskategorien; Datenkollektiv aus Aschaffenburg, Nürnberg und München; (Kat. 1: geschlossene Bebauung, zentrumsnah; 2: Rand einer stark befahrenen Straße und hohe Versiegelung; 3a: Rand einer verkehrsberuhigten Nebenstraße und Versiegelung > 50%; 3b: Rand einer stark befahrenen Straße und Versiegelung < 50%; 4: kleinere Grünanlage, Park oder Friedhof; 5: größere Grünanlage, Park oder Friedhof; 6: Referenz Umland)

Es folgt eine Betrachtung der Städte Aschaffenburg, Nürnberg und München getrennt voneinander (Abb. 24). In die Boxplots gehen die Frequenzsummen (aufsummierte Häufigkeit der Indikatorarten) jedes Baumes ein, um auch die Streuung der Werte darzustellen.

In Aschaffenburg ist das gefundene gegenläufige Verhalten der beiden Gruppen in den Boxplots deutlich zu erkennen. Die beiden Arten der Urbanotoleranten erreichen in Aschaffenburg in den Nutzungskategorien mit starker Versiegelung (2, 3a) eine hohe mittlere Frequenzsumme, während die Urbanophoben angesichts der höheren Artenzahl in dieser Gruppe (neun Arten) bei starker Versiegelung nur niedrige Werte erreichen. Daten für die Kategorie 6 (Referenz Umland) liegen nur für Aschaffenburg vor, wo auf den gering versiegelten Flächen AB-6 (Nordfriedhof) und AB-26 (Sportgelände BSC, Schweinheim) insgesamt zwölf Bäume untersucht werden konnten, die nach der letzten Flechtenkartierung eine hohe Luftgütestufe erreicht hatten (Vorbeck et al. 2016). Beide Flächen weisen offensichtlich eine stadtklimatisch günstige Situation auf, die durch hohe Frequenzen der urbanophoben Arten angezeigt wird.
In Aschaffenburg konnten zentrumsnah bei geschlossener Bebauung keine Trägerbäume gefunden werden. Dies könnte auch in anderen Städten ein Engpass werden, indem dort aufgrund intensivster Flächennutzung keine Bäume vorhanden sind und daher kaum Daten für solche Standorte erhoben werden können.

In Nürnberg zeigen die urbanotoleranten Arten eine Tendenz zu rückläufigen Frequenzsummen bei ansteigenden Kategorien. Die Urbanophoben hingegen zeigen in den Grünanlagen und Parks (Kategorie 4 und 5) erwartungsgemäß höhere Frequenzsummen. Im Umland (Kategorie 6) konnten keine Referenzdaten erhoben werden, da keine geeigneten Bäume auf Flächen zur Verfügung standen, die die Anforderungen für eine Referenzfläche erfüllen (mindestens mäßige Luftgüte laut der letzten Flechtenkartierung). Auch wenn die letzte Flechtenkartierung von Nürnberg schon lange zurückliegt (Windisch und Vorbeck 1998), lag hier eine höhere lufthygienische Belastung vor als in den beiden anderen Städten. Während Aschaffenburg und München nach den letzten Flechtenkartierungen Luftgütestufen nach VDI 3957 Blatt 13 bis zu „sehr hohe Luftgüte“ (blau) erreichten, konnte in Nürnberg als beste Kategorie nur „mäßige Luftgüte“ (gelb) erreicht werden (vgl. Tab. 1).

Die Situation in München stellt sich wieder anders dar. An den untersuchten Trägerbäumen wurde eine nicht nach Nutzungskategorien differenzierbare Frequenz der Urbanotoleranten gefunden. Die Urbanophoben zeigen bei aufsteigender Kategorie zumindest eine Tendenz zu höheren mittleren Frequenzsummen. Für die Kategorie 6 konnten keine Flächen gefunden werden, die den Anforderungen an eine Referenzfläche genügen.
Weiter zeigen die Daten für Nürnberg und München, dass an den Bäumen der Kategorie 1 (zentrumsnah, geschlossene Bebauung, ungünstige Wuchsbedingungen werden angenommen) die Urbanotoleranten zumindest vorgefunden wurden, während die Urbanophoben nahezu vollständig fehlen.

In dieser Betrachtung wurden die Flechtenfrequenzen bei unterschiedlicher Nutzung und Versiegelung im Umkreis der Trägerbäume ausgewertet. Die Baumstandorte können zentrumsnah im engen Einflussbereich der städtischen Wärmeinsel stehen, oder, möglicherweise bei gleicher Nutzungskategorie, weiter vom Zentrum entfernt und unter mikroklimatisch günstigeren Bedingungen. Daher folgt ein Abgleich mit den Daten aus Stadtklimamodellen, bei denen auch die Temperatur berücksichtigt wird.

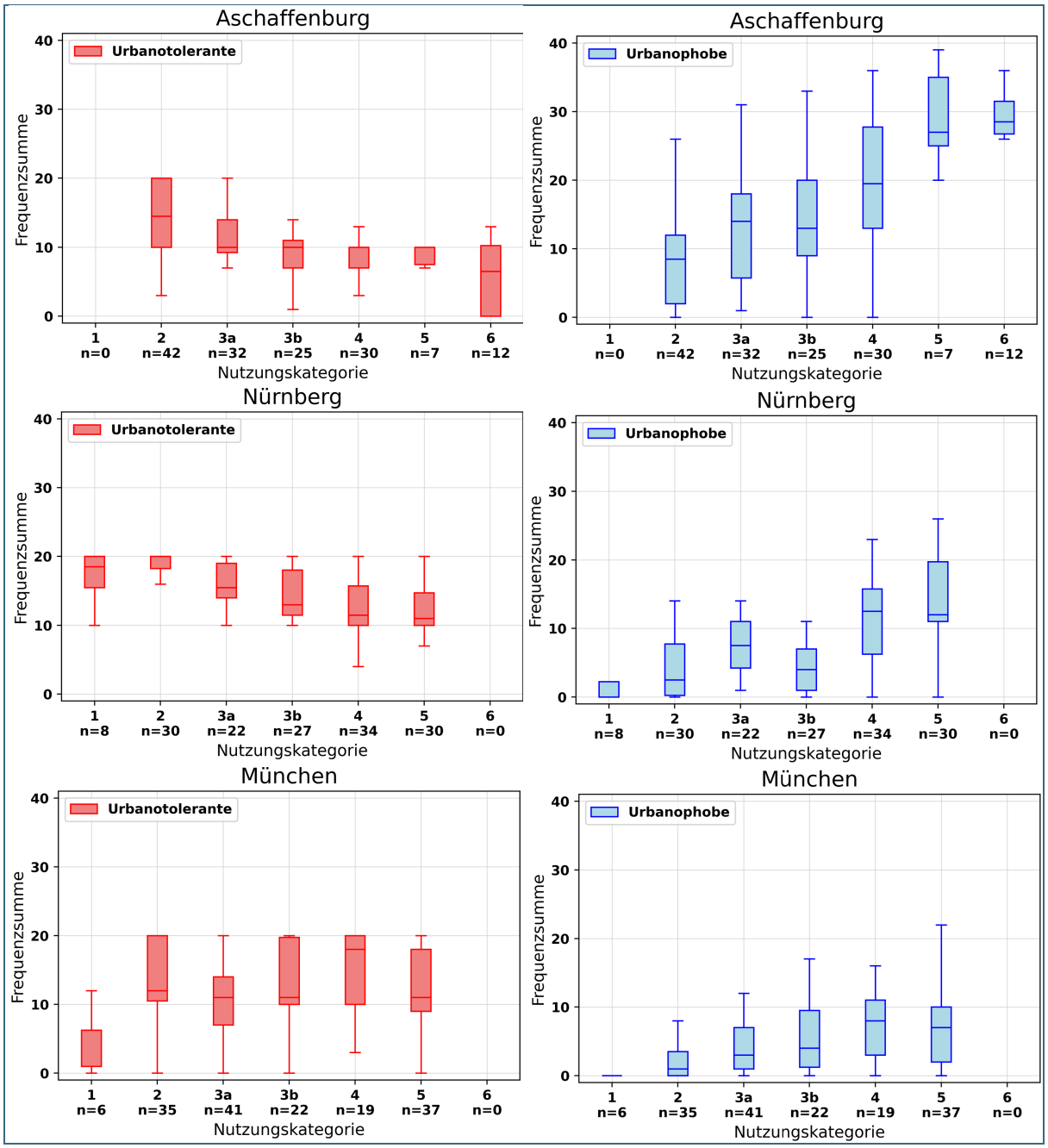


Abb. 24: Boxplots der Frequenzsummen pro Baum für die Urbanotoleranten (*Phaeophyscia orbicularis*, *Phaeophyscia nigricans*), sowie für urbanophoben Arten, geordnet nach Nutzungskategorien; (Kat. 1: geschlossene Bebauung, zentrumsnah; 2: Rand einer stark befahrenen Straße und hohe Versiegelung; 3a: Rand einer verkehrsberuhigten Nebenstraße und Versiegelung > 50%; 3b: Rand einer stark befahrenen Straße und Versiegelung < 50%; 4: kleinere Grünanlage, Park oder Friedhof; 5: größere Grünanlage, Park oder Friedhof; 6: Referenz Umland)

3.2.3 Abgleich mit Daten aus einem Klimaanalyse-Modell

Der Zusammenhang der städtischen Überwärmung und den Flechtenfrequenzen wurde geprüft. Dazu wurden Vergleichsdaten herangezogen, die vom LfU als landesübergreifende Klimaanalysekarte herausgegeben wurden (Geo-Net 2022). In der Klimaanalysekarte wird unter anderem die modellierte Wärmebelastung der bayerischen Stadtgebiete für einen Sommertag dargestellt. Für die vorliegende Arbeit wurden die bodennahen Lufttemperaturen in 2 m Höhe um 04:00 Uhr morgens der Variante „Bestandssituation“ (Referenzzeitraum 1985-2015) verwendet. Frühmorgens ist die maximale

nächtliche Abkühlung erreicht. Bei einer erhöhten 04:00-Uhr-Temperatur kann ein Ausbleiben des morgendlichen Taufalls und eine niedrige relative Luftfeuchtigkeit zu längeren Trockenzeiten der Flechten führen.

Auf den hier flechtenkartierten Messflächen liegen die 04:00-Uhr-Temperaturen in Aschaffenburg zwischen 16 und 21,5 °C und in Nürnberg zwischen 15,6 und 20,1 °C. Niedrigere Werte wurden für München berechnet, wo sie mit 13,0 und 18,9 °C angegeben werden.

Die mittleren Frequenzen der beiden urbanotoleranten Arten zeigen einen leichten Anstieg bei zunehmender 04:00-Uhr-Temperatur, was dafür spricht, dass diese Flechtenarten-Gruppe die überwärmten Stadtgebiete toleriert und zumindest bis zur Temperatur von 21 °C höhere Frequenzen erreichen kann (Abb. 25, oben). Für höhere 04:00-Uhr-Temperaturen kann hier keine Aussage getroffen werden.

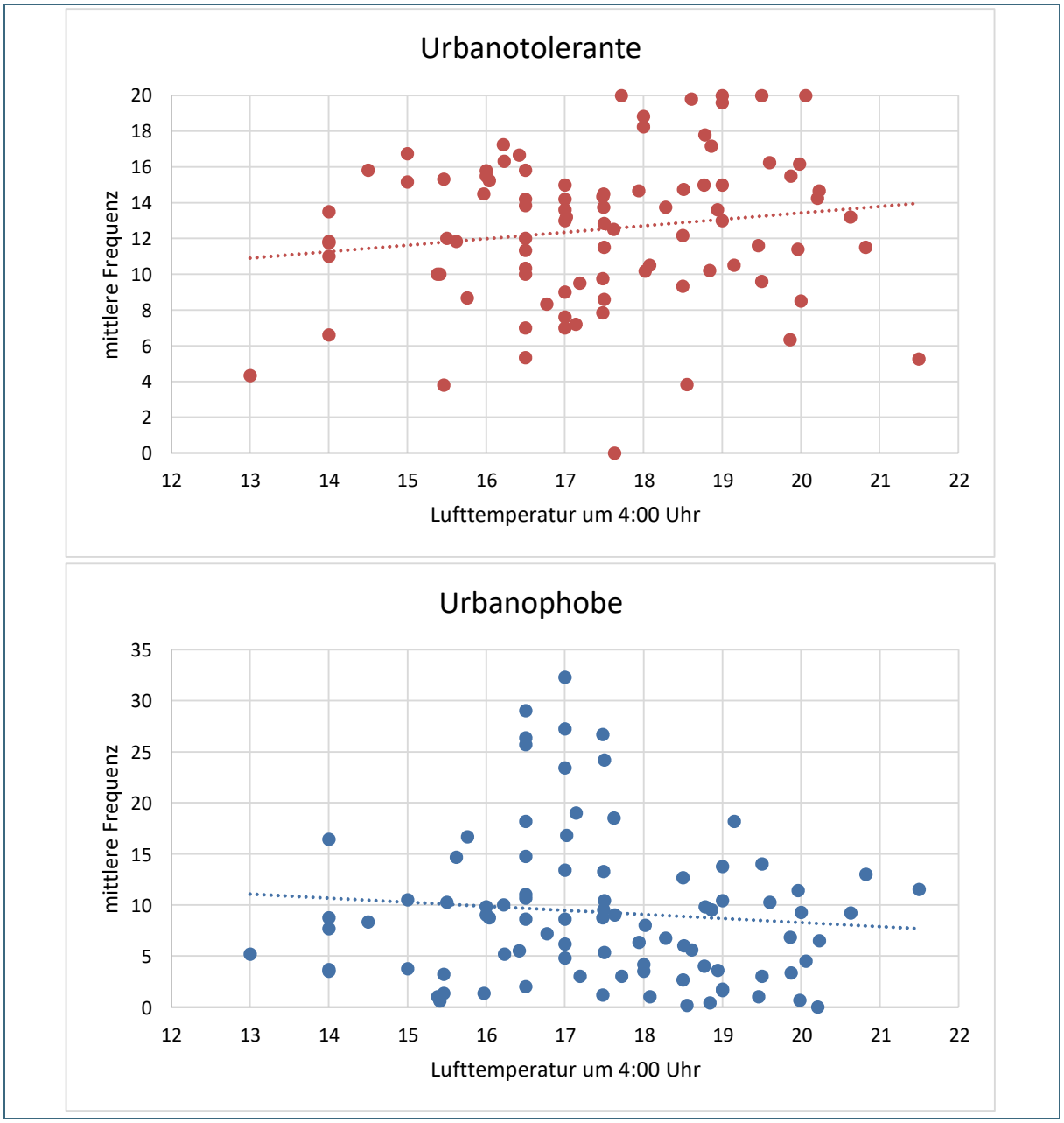


Abb. 25: Mittlere Frequenzen der urbanotoleranten sowie der urbanophoben Flechtenarten in Aschaffenburg, Nürnberg und München entlang des Gradienten der Lufttemperatur in 2 m über dem Boden um 4:00 Uhr morgens; Temperaturdatenmodell aus Geo-Net (2022)

Die urbanophoben Arten verhalten sich gegenläufig (Abb. 25, unten). Mit steigenden 04:00-Uhr-Temperaturen sinken die mittleren Frequenzen leicht. Für beide Kurven sind die Korrelationskoeffizienten ausgesprochen niedrig, so dass bei dieser Stichprobenzahl von nur 30 Messflächen pro Stadt nur Tendenzen gezeigt werden können.

Die Stadt Aschaffenburg weist in der Klimaanalysekarte (Abb. 28) rot dargestellte Flächen aus. Dargestellt werden im Modell berechnete 04:00-Uhr-Temperaturen über 21 °C, die eine potentielle sommerliche Hitzebelastung durch ausbleibende nächtliche Abkühlung anzeigen (Geo-Net 2022). Die urbanotoleranten Arten (in den Abb. 28 und in der Detail-Abb. 29 als graue Balken dargestellt) zeigen keine auffälligen Muster. Die urbanophoben Arten hingegen (als weiße Balken dargestellt) erreichen in den nordwestlichen, östlichen und südöstlichen Außenbereichen der Stadt erkennbar höhere mittlere Frequenzen und zeigen die stadtklimatische Bedeutung dieser parkähnlichen Gebiete für die Stadt Aschaffenburg. Diese Gütezeiger dringen über die Aschaffenburger Fasanerie (Messfläche AB-17 im Osten) relativ weit ins Stadtzentrum vor (Abb. 29) und belegen die auf die Flechten wirksamen Effekte der nächtlichen Abkühlung. Noch im Bereich der Parkanlage „Großmutterwiese“, der westlichen Spitze der Fasanerie (Messfläche AB-19), wird die positive stadtklimatische Situation durch die Flechten angezeigt. Etwa 400 m weiter westlich zum Stadtzentrum hin, im Grünzug Hofgarten/Schöntal (Messflächen AB-15, AB-16), ist dieser Effekt schon deutlich gemindert, was auch die höheren 04:00-Uhr-Temperaturen anzeigen.

In Nürnberg wird zwar nur eine kleinere rot dargestellte Fläche starker Wärmebelastung angezeigt, aber ausgedehnte Stadtgebiete sind, erkennbar durch orange gefärbte Flächen mit 04:00-Uhr-Temperaturen über 20 °C, ebenfalls durch nächtliche Hitzeperioden gefährdet. Urbanotolerante Arten (als graue Balken dargestellt) finden sich mit höheren Frequenzen im gesamten Stadtgebiet, während die urbanophoben Arten (weiße Balken) nur in bestimmten Außenbereichen der Stadt höhere Frequenzen erreichen. Es sind dies Messflächen im Norden der Stadt im Volkspark Marienberg (N-2, N-31) mit Nähe zu den Wäldern nordöstlich Nürnbergs. Weiterhin finden sich die Gütezeiger zentrumsnah in der südöstlichen Außenstadt im Volkspark Duzendteich (N-7) und weit im Süden der Stadt „Am Wiesengrund“ bei Worzeldorf (N-11, N12). Für alle drei genannten Gebiete zeigen auch die bodennahen 04:00-Uhr-Lufttemperaturen mit modellierten Werten zwischen 16 und 17 °C eine im Vergleich zu weiten Teilen der Stadt deutliche nächtliche Abkühlung an.



Abb. 26: Nürnberg – Volkspark Duzendteich als Beispiel für eine städtische Grünfläche mit deutlicher nächtlicher Abkühlung

Die errechneten sommerlichen Nachttemperaturen von München sind zwar weniger erhöht als in Nürnberg und Aschaffenburg, zeigen aber ebenfalls den Wärmeinseleffekt der Stadt an (Abb. 31). Wie in Nürnberg erreichen die urbanotoleranten Arten (grau dargestellte Balken) bis auf wenige Messflächen im ganzen Untersuchungsgebiet höhere Frequenzen. Die Frequenzen der urbanophoben Arten (weiße Balken) steigen in den laut Klimaanalysekarte mikroklimatisch begünstigten Stadtgebieten wie dem Englischen Garten (Messflächen M-1, M-2a), dem Ostfriedhof (M-6, Abb. 27) und dem Grüngürtel am Bavariaring (M-9) leicht an, bleiben jedoch hinter den Erwartungen zurück. Lediglich im Westen der Stadt im Nymphenburger Schlosspark (M-12) erreichen die urbanophoben Arten deutlich höhere Frequenzen.

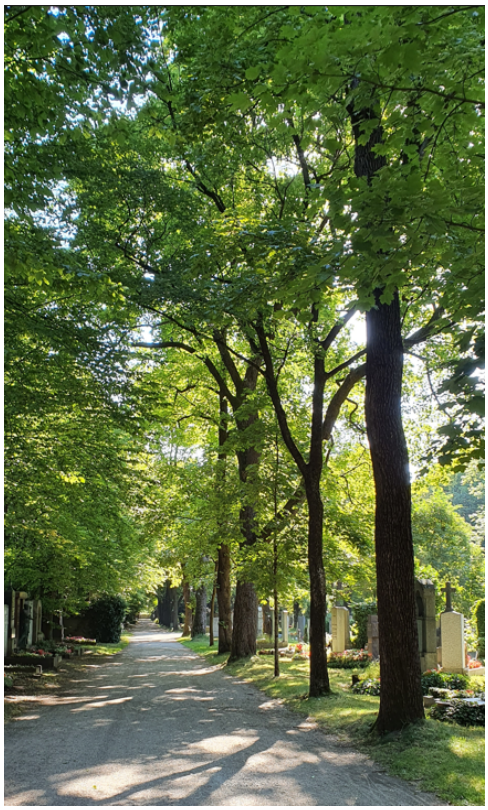


Abb. 27:
München – Ostfriedhof als Beispiel mikroklimatisch begünstigter städtischer Gebiete

Hier wurden die Parameter Flächenversiegelung und modellierte bodennahe 04:00-Uhr-Lufttemperatur betrachtet und mit den Flechtendaten verglichen. Es gibt jedoch noch weitere Aspekte des Stadtklimas, wie die Anreicherung von Luftschadstoffen, die auf die sensitiven Flechten wirken. So bleibt festzustellen, dass die Ergebnisse der Flechtenkartierung sicherlich nur zum Teil mit den hier betrachteten Parametern zu erklären sind. Es werden weitere Analysen und nach Möglichkeit eine Erweiterung des Datenumfangs empfohlen.

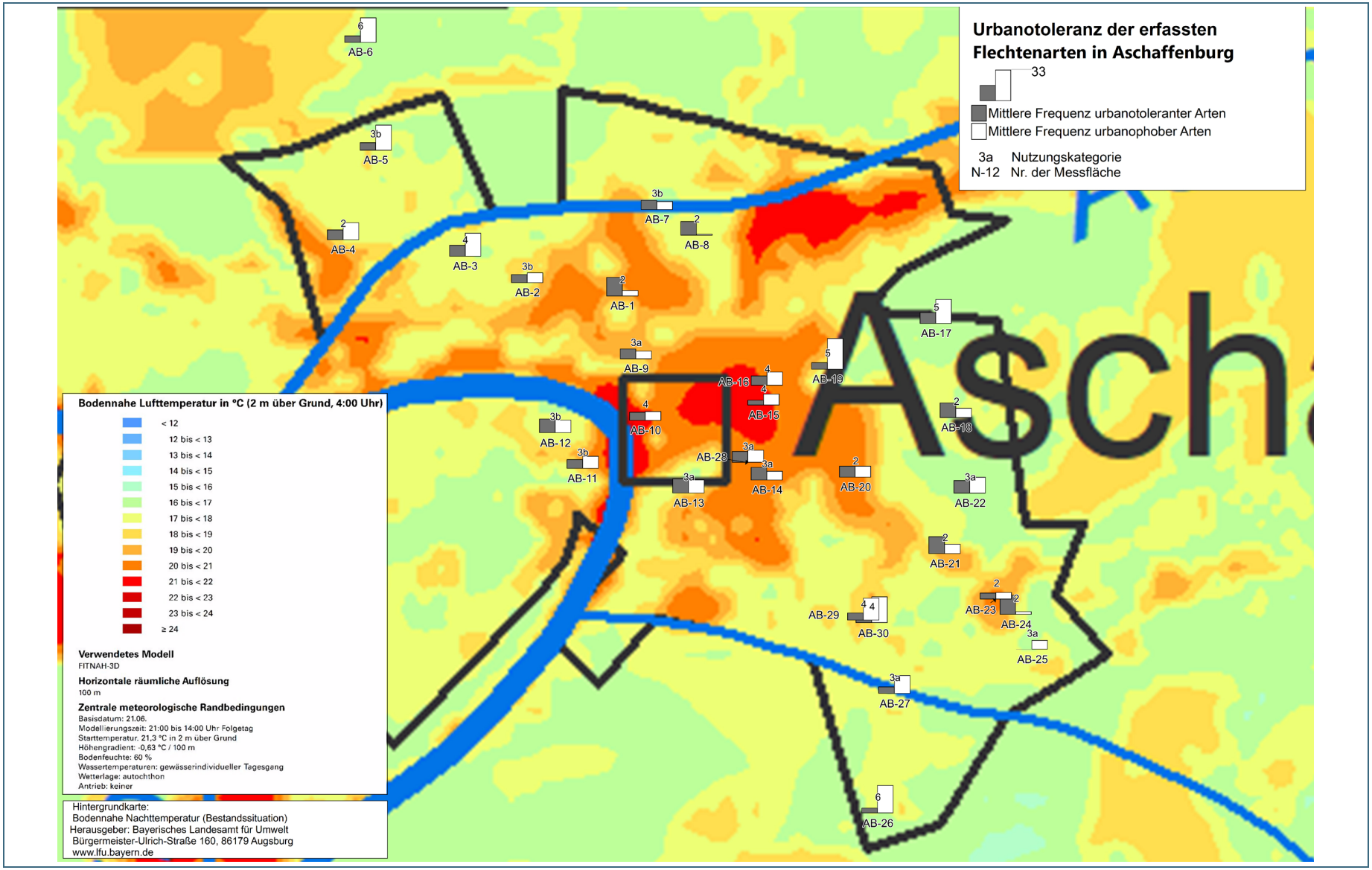


Abb. 28: Aschaffenburg - Mittlere Frequenzen der urbanotoleranten und der urbanophoben Arten vor dem Hintergrund der bodennahen 04:00- Uhr-Temperaturen

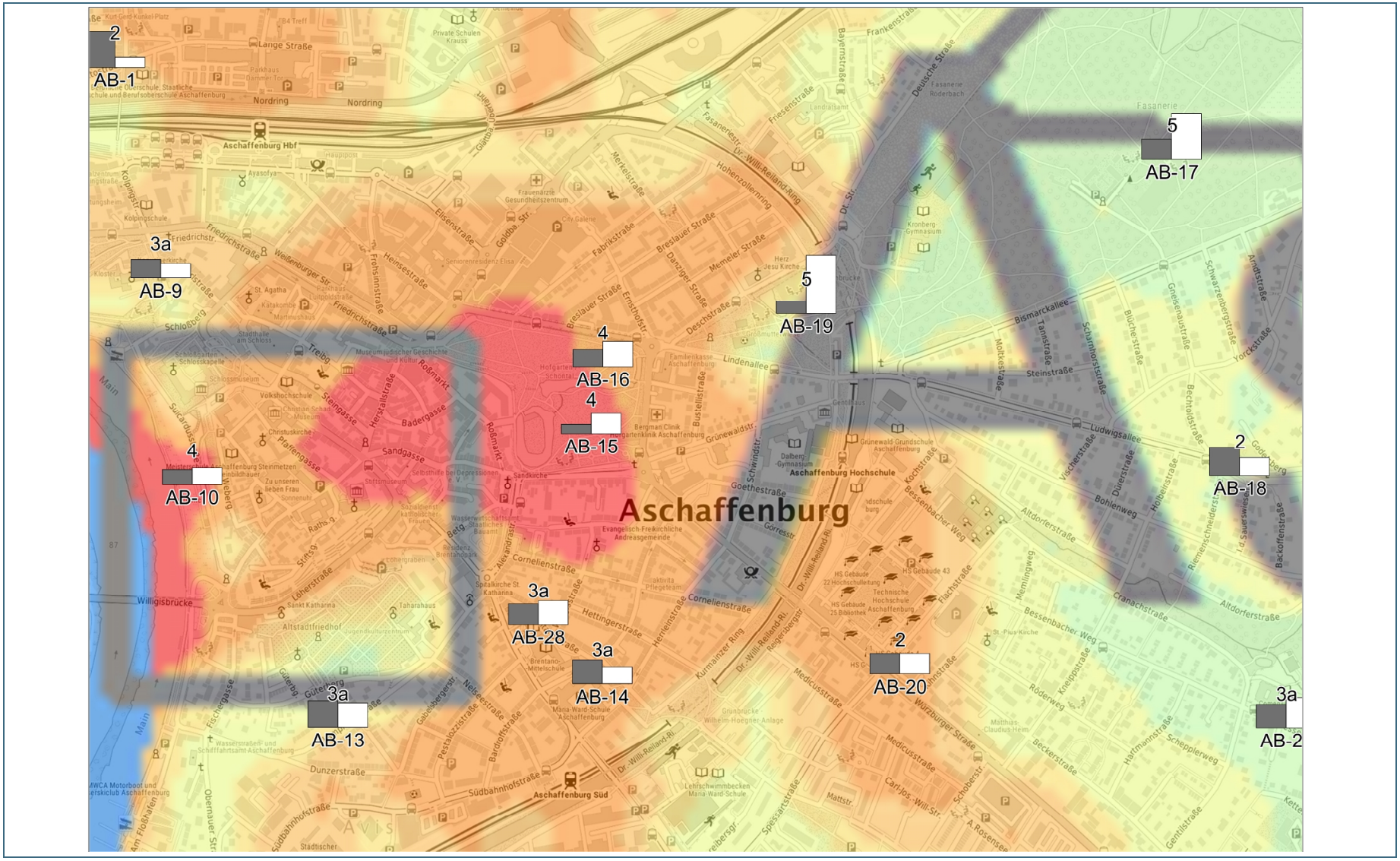


Abb. 29: Aschaffenburg – Ausschnitt aus Abb. 13 (Hintergrundkarte: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2024)

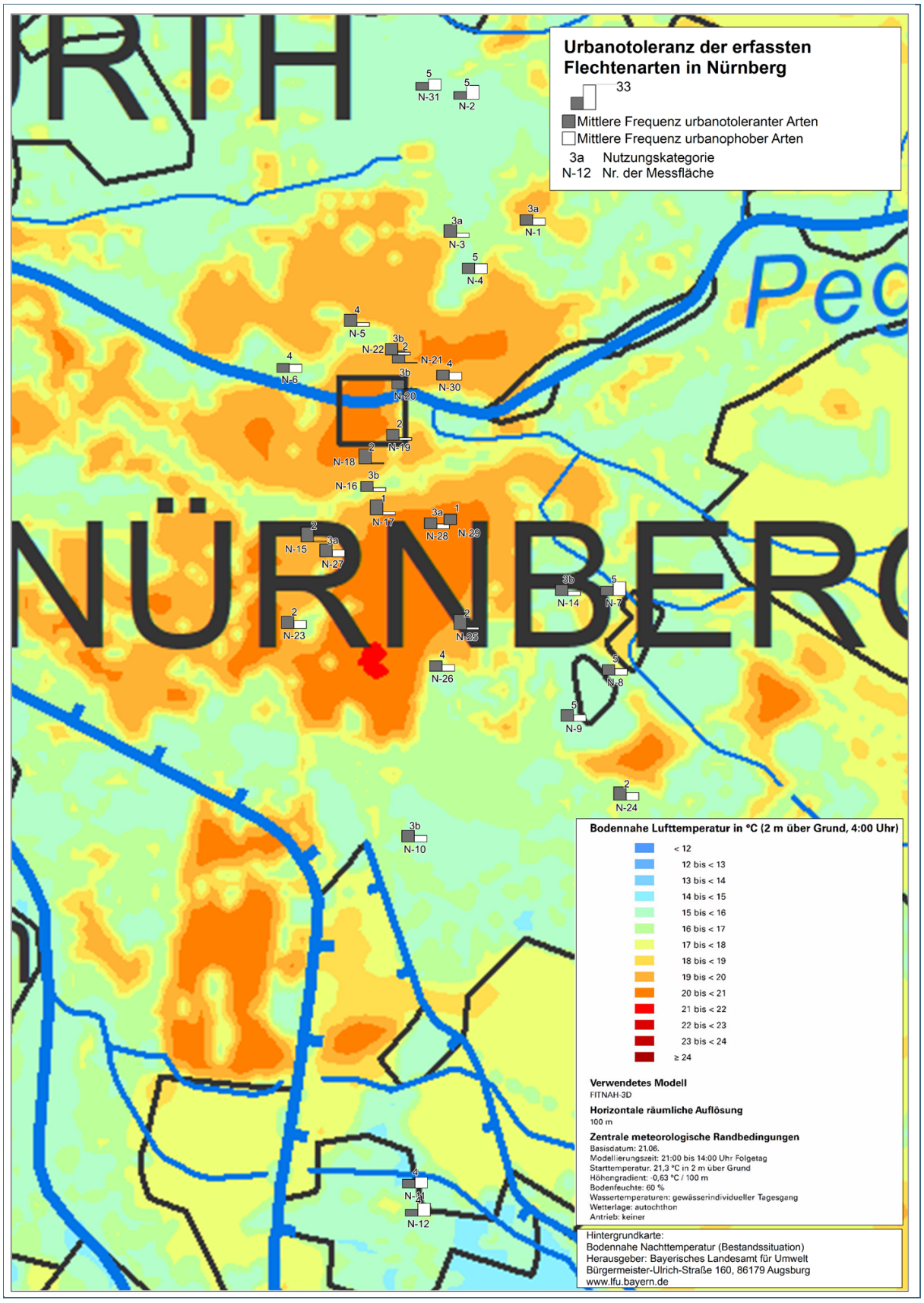


Abb. 30: Nürnberg - Mittlere Frequenzen der urbanotoleranten und der urbanophoben Arten vor dem Hintergrund der bodennahen 04:00-Uhr-Temperaturen

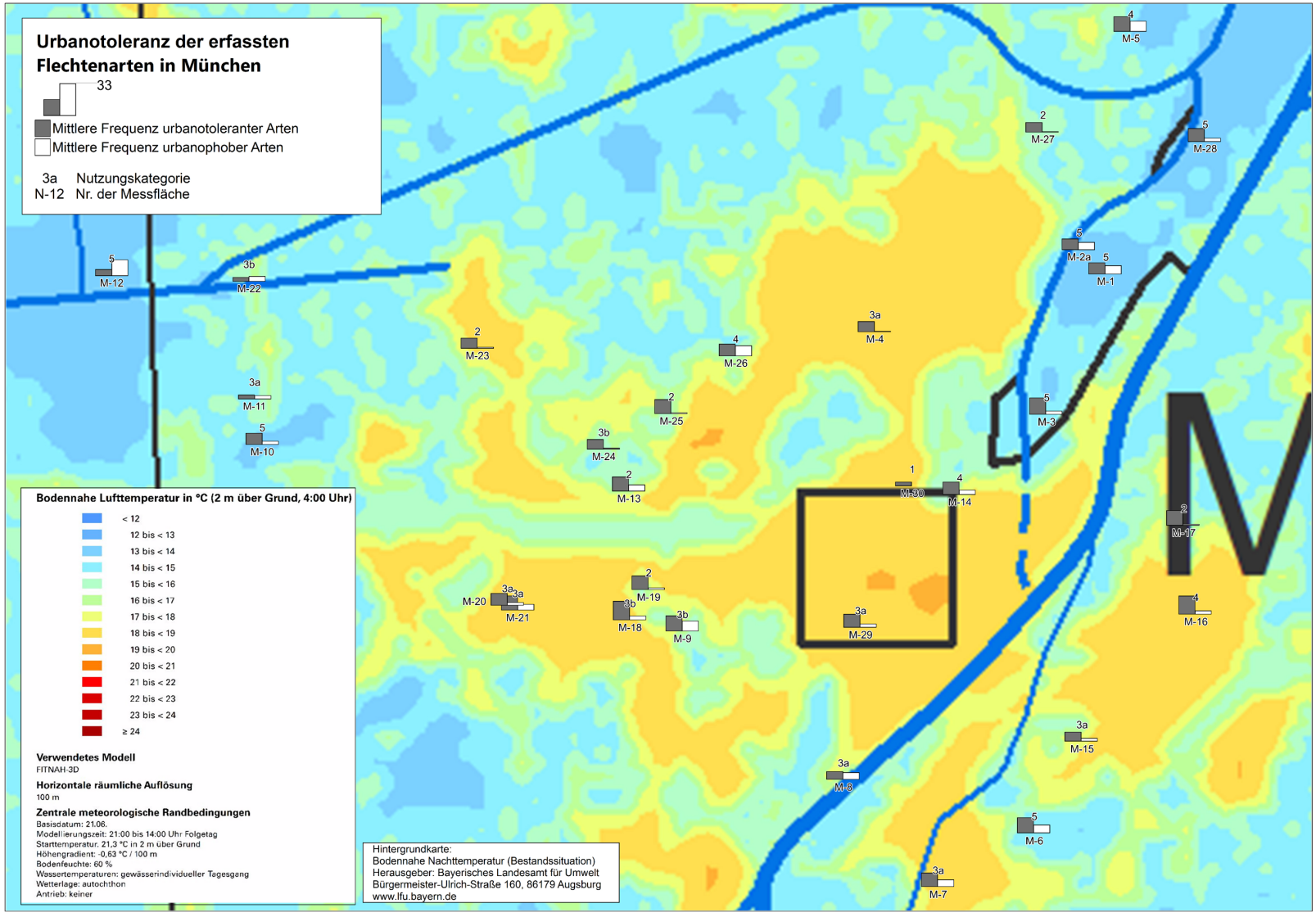


Abb. 31: München - Mittlere Frequenzen der urbanotoleranten und der urbanophoben Arten vor dem Hintergrund der bodennahen 04:00-Uhr-Temperaturen

3.2.4 Handlungsempfehlungen

Allgemeine Empfehlungen lassen sich für alle Städte aussprechen, die so wie die Projektstädte Aschaffenburg, Nürnberg und München aufgrund ihrer Flächenausdehnung eine Wärmeinsel ausbilden. Zu einer erfolgreichen stadtklimatischen Verbesserung tragen Maßnahmen bei, die eine Überhitzung städtischer Flächen verhindern können (Tab. 11). Die enge Zusammenarbeit zahlreicher Akteure ist erforderlich, um die Lebensqualität für den Menschen in urbanen Räumen nachhaltig zu erhalten. Letztendlich wirken sich erzielte Erfolge auch günstig auf die Flechten aus, denn die meisten Arten (Urbanophobe) finden in den Hitzeinseln der Städte keine Überlebensmöglichkeiten.

Tab. 11: Handlungsempfehlungen zur Verbesserung des Stadtklimas

Thema	Ziel	Maßnahmen
Lufttemperatur	Absenkung der Temperatur, insbesondere an sommerlichen Strahlungstagen	Einsatz reflektierender Baumaterialien mit geringer Wärmespeicherung Pflanzung hitze- und trockenresistenter Straßenbäume (Schattenspender)
Wasser	Förderung der nächtlichen Abkühlung, insbesondere in sommerlichen Hitzeperioden	Rückhalt von Regenwasser in der Stadt „Schwammstadt“ (Versickerungsflächen, Wasserflächen, Grauwassernutzung) Erhalt sowie Erweiterung der Zahl unversiegelter Flächen (Grünanlagen, Parks, Gärten, Friedhöfe, etc.) Begrünung von Straßen, Dächern und Fassaden zur Erhöhung der Verdunstungskühlung
Luftschadstoffe	Reduktion der Luftschadstoffkonzentration	Begrenzung des motorisierten Verkehrs; Förderung des ÖPNV, des Radverkehrs und des elektrifizierten Verkehrs
Luftzirkulation	Luftaustausch und Offenhaltung von Kaltluftströmen	Stadtplanerische Maßnahmen zum Erhalt und zur Schaffung von Durchlüftungsschneisen und Kaltluftströmen
Monitoring	Identifizierung kritischer Zonen	Überwachung von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftqualität und Ableitung von Maßnahmen, insbesondere in den kritischen Sommertagen Biomonitoring zur Darstellung und weiteren Erforschung der Wirkungen des Stadtklimas auf Lebewesen

3.3 Flechten-Luftgüte seit 1996

Es liegen Luftgüteindizes für die Untersuchungen aus 1996, 2011 und 2023 vor, die nach einer Methode des Vereins Deutscher Ingenieure erhoben und ausgewertet wurden (VDI 3957 Blatt 13, 2023). Die Kartierung von Flechten zur Dokumentation der Luftgüte erfolgte an 24 von insgesamt 25 Messflächen. An der Messfläche 282 am Wendelstein können nach der vorliegenden Kartierungsmethode keine Daten für die Luftgüte nach VDI erfasst werden. Aufgrund der geografischen Höhe befinden sich hier keine standardisierten Trägerbäume.

Der durch die Flechtendiversität in einem Messgitter am Mittelstamm von Bäumen ermittelte Luftgüteindex (LGI) belegt die Effekte biologisch wirksamer Luftverunreinigungen und den Einfluss eutrophierender Verbindungen. Zu den biologisch wirksamen Luftverunreinigungen zählen säurebildende Luftschadstoffe (wie Schwefeldioxid und Stickstoffoxide) sowie Stäube verschiedener Partikelgrößen, an die Schwermetalle oder organische Schadstoffe gebunden sein können. Zu den eutrophierenden Verbindungen gehören die pflanzen-(und flechten-)verfügbaren Mineralstickstoffe Ammonium/Ammoniak und Nitrat.

3.3.1 Aktuelle Flechten-Luftgüte

Die Luftgütestufen der aktuellen Flechtenkartierung liegen im Bereich 2 (geringe Luftgüte, orange) bis 5 (sehr hohe Luftgüte, blau) (Abb. 32). Die günstigste Luftgütestufe wurde nur an einer Messfläche (Nr. 17, Bad Kissingen in Unterfranken, blau) erreicht. Eine hohe Luftgüte (grün) wiesen fünf Messflächen mit Schwerpunkt im Bayerischen Wald und der Voralpen und Alpen auf. Der überwiegende Teil der untersuchten Flächen ergab eine mäßige Luftgüte (gelb).

Großräumig ungünstig stellt sich die lufthygienische Situation in den mittelfränkischen und nordschwäbischen Landesteilen dar, die nur eine geringe Luftgüte (orange) erreichten. Eine Hauptursache für diese ungünstige Bewertung lässt sich durch den zweiten Teil des Luftgüteindexes erklären. Das Suffix (z. B. E4) lässt eine Beurteilung der Wirkung eutrophierender Luftverunreinigungen zu. Alle Messflächen der Luftgütestufe 2 (geringe Luftgüte, orange) tragen den Eutrophierungsindex E5, was einen sehr starken Einfluss eutrophierender Verbindungen belegt. Zu diesen zählen reaktive Stickstoffverbindungen wie Ammoniak, Ammonium oder Nitrat, die gasförmig, gelöst oder partikelgebunden eingetragen werden können. Eine übermäßige Beaufschlagung mit eutrophierenden Verbindungen wirkt sich negativ auf die meisten Flechten aus, da sie im Gegensatz zu Höheren Pflanzen weder Wurzeln noch eine schützende Wachsschicht (Cuticula) besitzen und gelöste Stoffe und Gase über ihre gesamte Oberfläche aufnehmen. Die meisten Flechten sind an nährstoffarme Standorte adaptiert und so werden Entgiftungsmechanismen bei einem Überangebot mit Nährstoffionen rasch überlastet.

In der vorliegenden Untersuchung finden sich bei hoher und sehr hoher Luftgüte keine Eutrophierungsindizes, die über Stufe 3 (mäßiger Einfluss eutrophierender Luftverunreinigen) liegen.

Ein Vergleich der Flechten-Eutrophierungsindizes mit der Karte des Ammonium- und Nitrateintrag in 2020 (Abb. 33) lassen keinen offensichtlichen Zusammenhang erkennen. Zunächst ist festzustellen, dass beide Themenkarten aufgrund der unterschiedlichen Positionierung der Messpunkte kaum vergleichbar sind. Der mittlere Westen des Landes zeigt keine erhöhten gemessenen Stickstoffeinträge, jedoch sind dort die Flechten-Eutrophierungsindizes mit „E5“ durchgängig sehr hoch.
Dagegen wurden im Süden des Freistaats einer der höchsten Stickstoffeinträge (124_Sylvensteinsee) gemessen, die Flechten der nächstgelegenen Messfläche in Mittenwald (Nr. 295, ca. 25 km südwestlich) zeigen hingegen sehr geringe Eutrophierungswirkungen „E1“ an. Da beide Messflächen im Einflussbereich der Alpen und auf unterschiedlicher Meereshöhe liegen, kann hier kleinräumig eine unterschiedliche N-Deposition vorliegen.

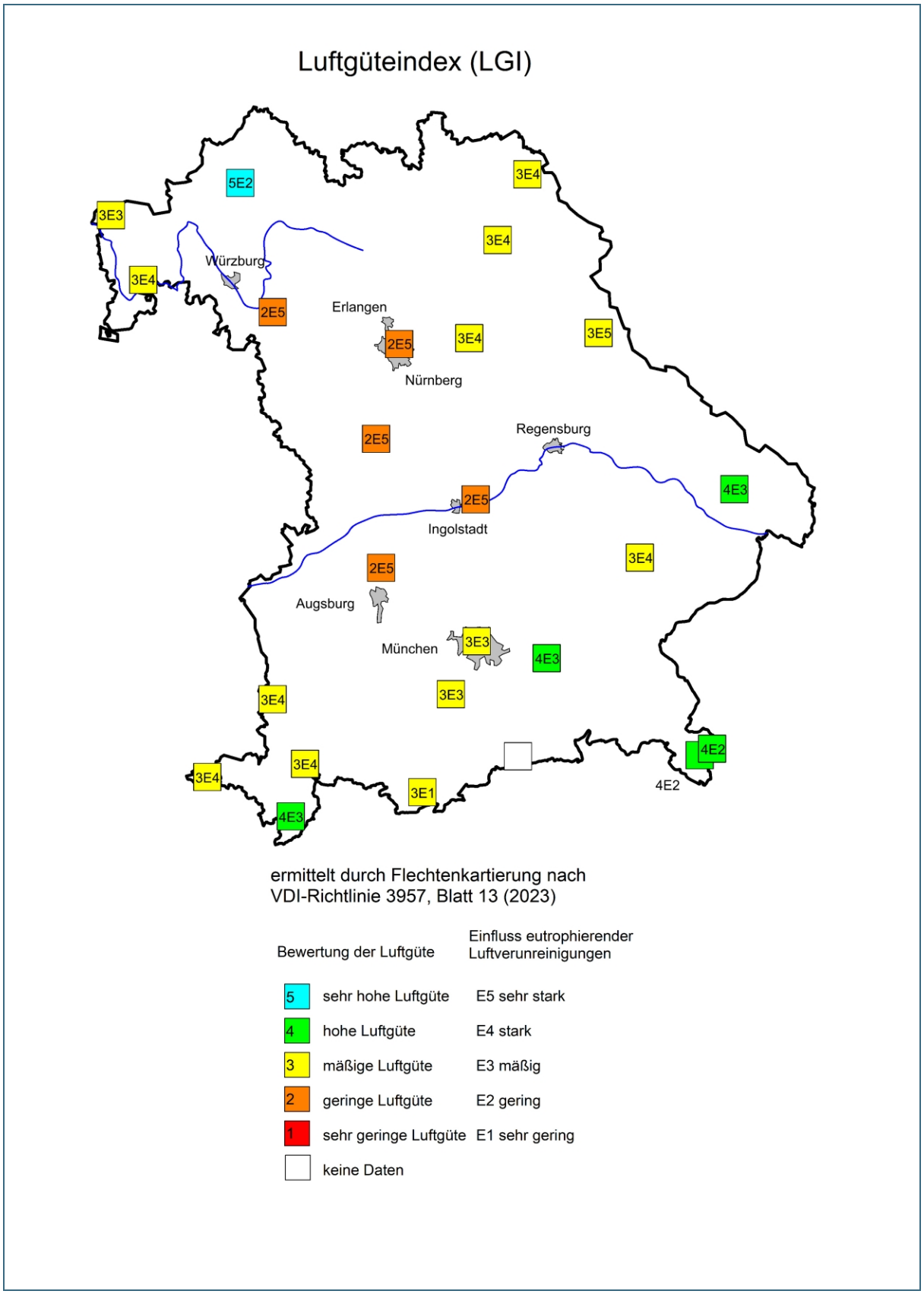


Abb. 32: Luftgütekarte 2023

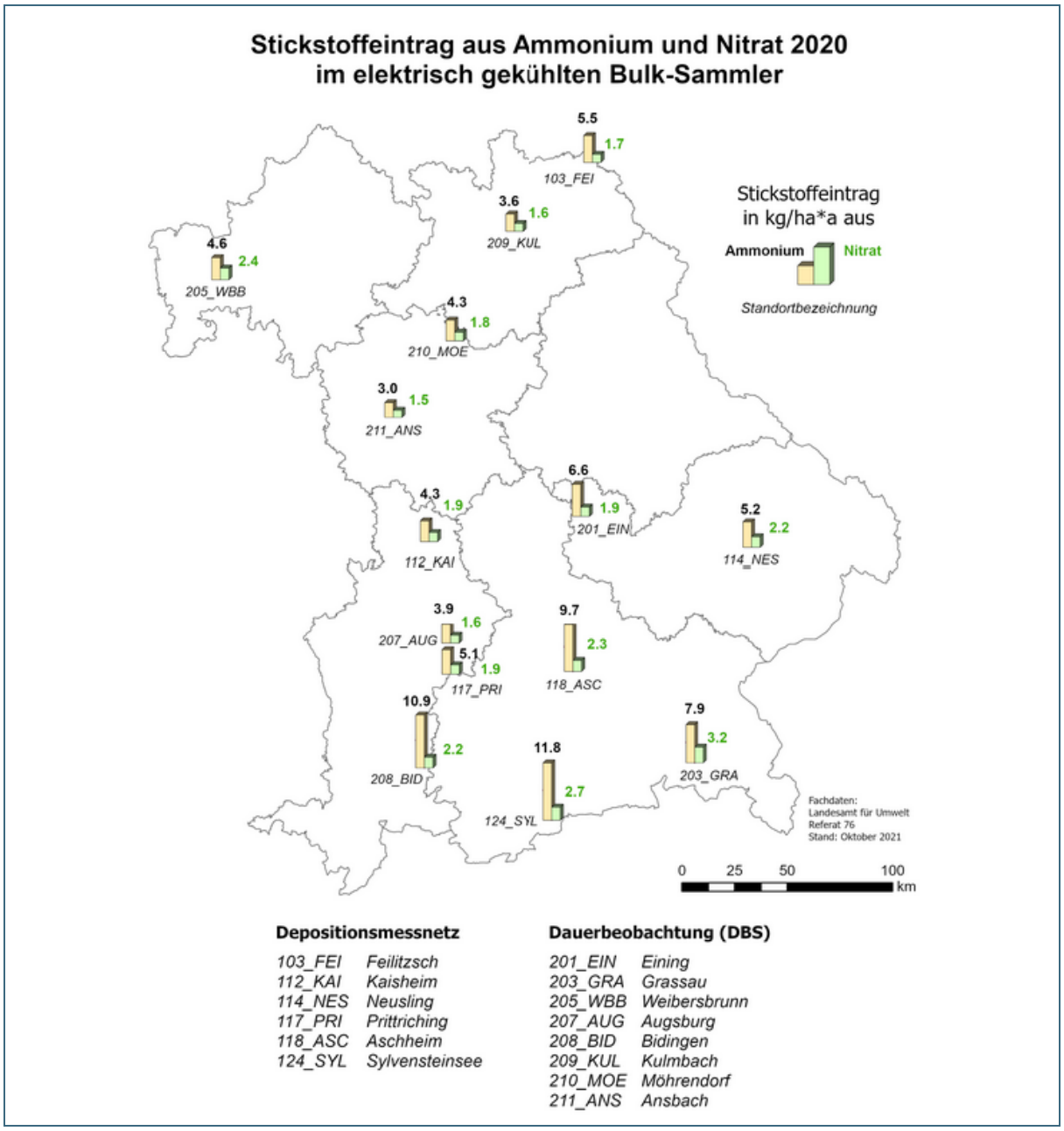


Abb. 33: Stickstoffeintrag aus Ammonium und Nitrat 2020 in Bayern (LfU 2021)

Zum Vergleich wurde die Augsburger Flechtenkartierung von Reich und Friedmann (2021) herangezogen. Eine der im vorliegenden Projekt untersuchten Messflächen liegt in Augsburg (Nr. 194) und damit im oben beschriebenen schwäbischen Gebiet mit einer geringen Luftgüte und einem sehr starken Einfluss eutrophierender Luftverunreinigungen (LGI: 2 E5). Dieser Befund ist vergleichbar mit den Ergebnissen der genannten Arbeit. Die Kartierung erfolgte 2017. Auch wenn sie methodische und zeitliche Unterschiede zur vorliegenden Untersuchung aufweist, stimmt ein wesentlicher Befund beider Arbeiten überein: Eutrophierungszeiger (von Reich und Friedmann als Nitrophyten bezeichnet) haben in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen und beeinträchtigen zunehmend die durch Flechten angezeigte Luftqualität.

Aktuelle Ergebnisse aus der landesweiten Flechten-Dauerbeobachtung im nordwestlich angrenzenden Bundesland Hessen zeigen ähnliche Ergebnisse (Windisch et al. 2024). Im Zeitraum 2017 bis

2022 sind die Werte für die Referenzarten nur geringfügig angestiegen, während die Diversitätswerte für Arten, die durch einen übermäßigen Nährstoffeintrag gefördert werden, deutlich zugenommen haben. Hier hat sich in den letzten zehn Jahren die Dominanz der Eutrophierungszeiger gegenüber der der Referenzarten weiter verstärkt. So ist festzuhalten, dass die zunehmenden Wirkungen eutrophierender Immissionen (z. B. Ammoniak und Stickstoffoxide) offenbar einer Verbesserung der lufthygienischen Situation entgegenstehen.

3.3.2 Zeitliche Entwicklung der Flechten-Luftgüte

Die zeitliche Entwicklung der durch Flechten angezeigten Luftgüte seit 1996 wird kartografisch in Abb. 34 und tabellarisch in Tab. 12 dargestellt. Im ersten Betrachtungszeitraum von 1996 bis 2011 hat die Luftgüte in weiten Teilen Bayerns nachgelassen. Im Folgezeitraum von 2011 bis 2023 ist an den meisten Messflächen (18 von 24) keine Änderung der Flechten-Luftgüte mehr eingetreten.

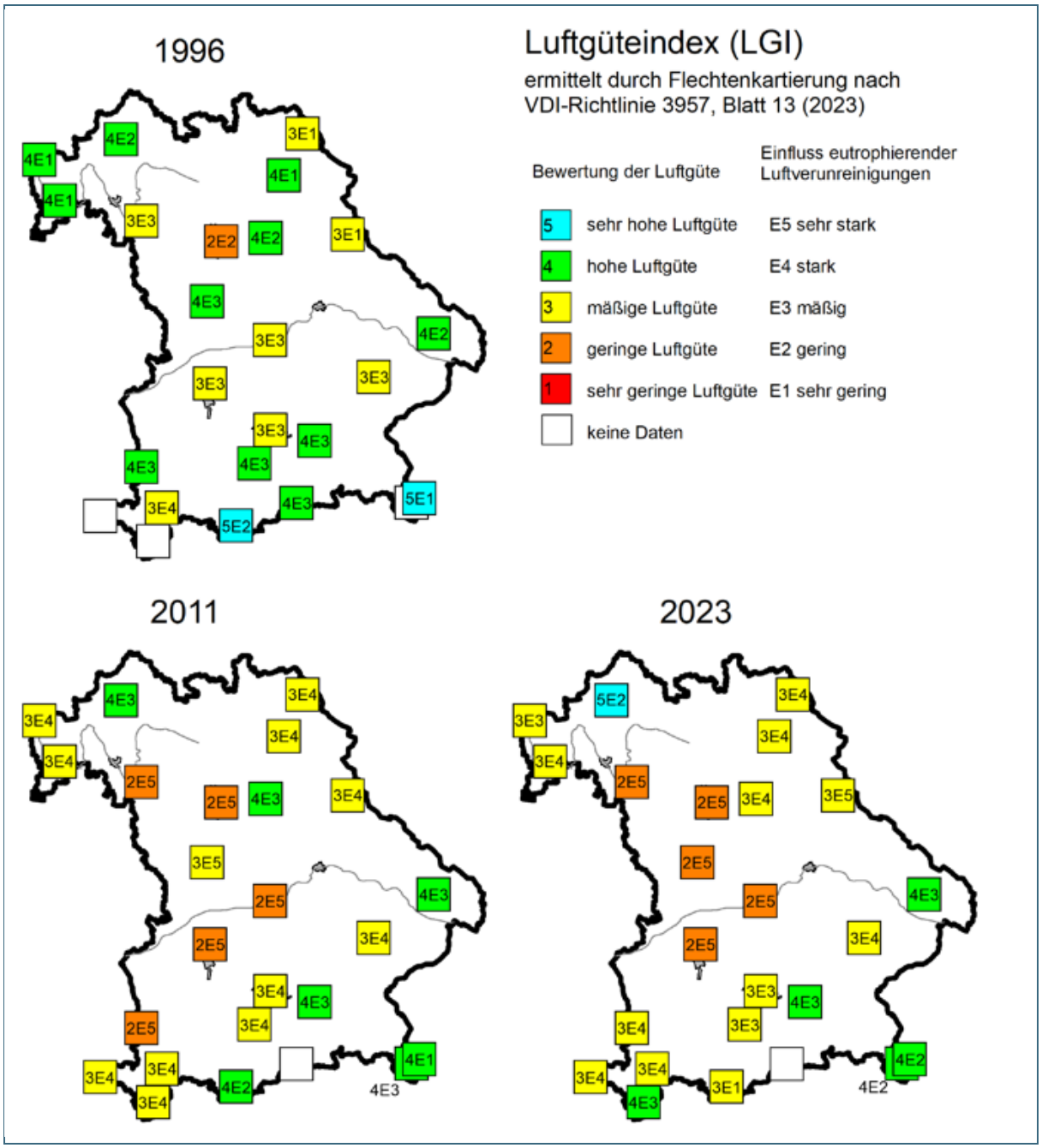


Abb. 34: Entwicklung der Luftgüte von 1996 bis 2023

Verbesserungen um eine Luftgütestufe weisen drei Flächen (17: Bad Kissingen, 247: Memmingen, 905: Oberstdorf) auf, während sich die Luftgüte an drei Flächen heute ungünstiger darstellt als 2011 (96: Pommelsbrunn, 132: Weißenburg, 295: Mittenwald-Buckelwiesen). Alle Messflächen der Luftgütestufe 2 (geringe Luftgüte, orange) tragen den Eutrophierungsindex E5, was einen sehr starken Einfluss eutrophierender Verbindungen belegt.

Tab. 12: Zeitliche Entwicklung des flechtenbasierten Luftgüteindexes (LGI) an den untersuchten bayerischen Messflächen (Legende: siehe Abb. 6 auf Seite 23)

Messfläche Nr.	Name	LGI 1996	LGI 2011	LGI 2023	Entwicklung LGI 2011-2023
17	Bad Kissingen	4.E2	4.E3	5.E2	+1
26	Selb/Oberfranken-Lauterbach	3.E1	3.E4	3.E4	0
27	Kahl am Main	4.E1	3.E4	3.E3	0
54	Fichtelberg/Oberfr.-Hüttstadl	4.E1	3.E4	3.E4	0
59	Röllbach	4.E1	3.E4	3.E4	0
78	Gollhofen	3.E3	2.E5	2.E5	0
96	Pommelsbrunn-Mittelburg	4.E2	4.E3	3.E4	-1
100	Oberviechtach	3.E1	3.E4	3.E5	0
132	Weißenburg	4.E3	3.E5	2.E5	-1
164	Kösching	3.E3	2.E5	2.E5	0
172	Saldenburg-Entschenreuth	4.E2	4.E3	4.E3	0
194	Augsburg	3.E3	2.E5	2.E5	0
202	Falkenberg, Kr. Rottal-Inn	3.E3	3.E4	3.E4	0
243	Ebersberg-Halbing	4.E3	4.E3	4.E3	0
247	Memmingen	4.E3	2.E5	3.E4	+1
252	Attenkam	4.E3	3.E4	3.E3	0
276	Oy-Mittelberg-Petersthal	3.E4	3.E4	3.E4	0
282	Wendelstein	4E3*	keine Daten	keine Daten	
288	Berchtesgaden/Obersalzberg	5.E1	4.E1	4.E2	0
295	Mittenwald-Buckelwiesen	5.E2	4.E2	3.E1	-1
901	München-Stadt	3.E3	3.E4	3.E3	0
902	Nürnberg	2.E2	2.E5	2.E5	0
903	Schönau am Königssee	keine Daten	4.E3	4.E2	0
904	Sigmarszell-Zeisertsweiler	keine Daten	3.E4	3.E4	0
905	Oberstdorf	keine Daten	3.E4	4.E3	+1

*: tiefer im Tal gelegene Baumgruppe wurde untersucht

Der Luftgüteindex basiert auf Flechten-Diversitätswerten (vgl. Kap. 2.3 Methoden). Betrachtet man die Entwicklung dieser Flechten-Diversitätswerte aller Messflächen (Abb. 35), so sind die Werte für die Referenzarten von 1996 bis 2011 sehr gering angestiegen, was einer Verbesserung in 2011 gegenüber 1996 entsprach, um im Folgezeitraum bis 2023 wieder nachzulassen. Dagegen haben sich die Diversitätswerte für Arten, die durch einen übermäßigen Nährstoffeintrag gefördert werden, von 1996 bis 2011 deutlich erhöht und verbleiben auch bis 2023 noch auf einem hohen Niveau. Die Dominanz der Eutrophierungszeiger gegenüber den Referenzarten belegt, dass die deutlichen Wirkungen eutrophierender Immissionen einer Verbesserung der lufthygienischen Situation entgegenstehen.

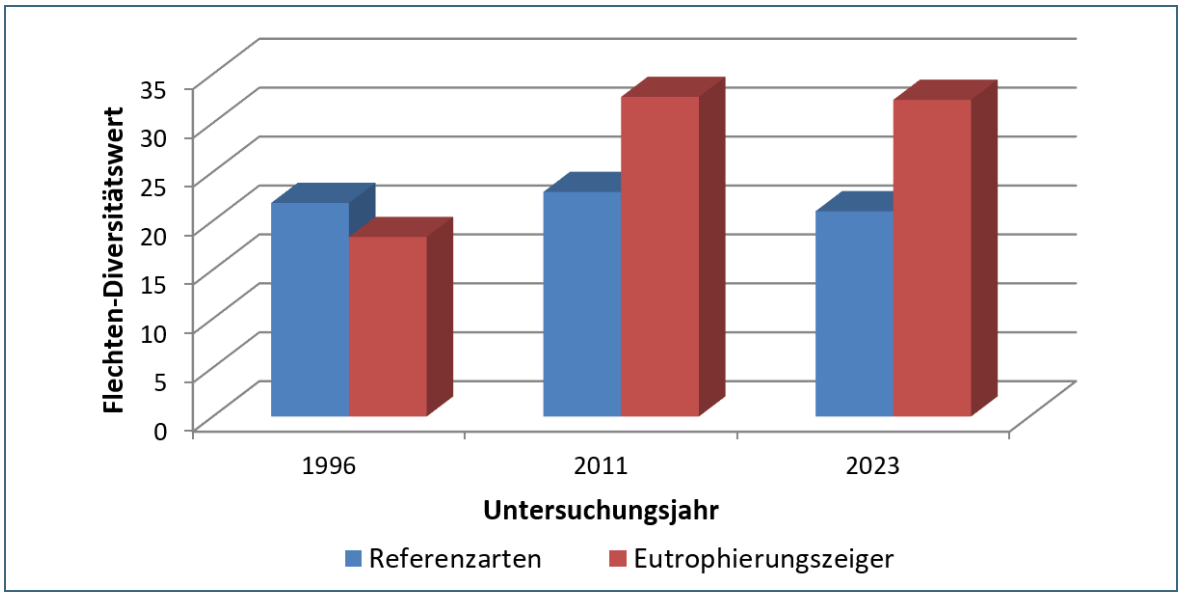


Abb. 35: Zeitlicher Verlauf der Flechten-Diversitätswerte (FDW) der Referenzarten und Eutrophierungszeiger für alle Messflächen

Im lufthygienischen Jahresbericht des LfU werden Trendanalysen von Luftschadstoffen vorgenommen (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2024). Die Stickstoffdioxid-Konzentrationen sind aufgrund von emissionsmindernden Effekten rückläufig (Abb. 36). Besonders deutlich wird dies an den verkehrsnahen Messstationen. Langfristig abnehmende Jahresmittelwerte der Konzentrationen werden auch für die gemessenen Feinstaub-Fraktionen PM_{10} (Abb. 37) und $PM_{2,5}$ festgestellt.

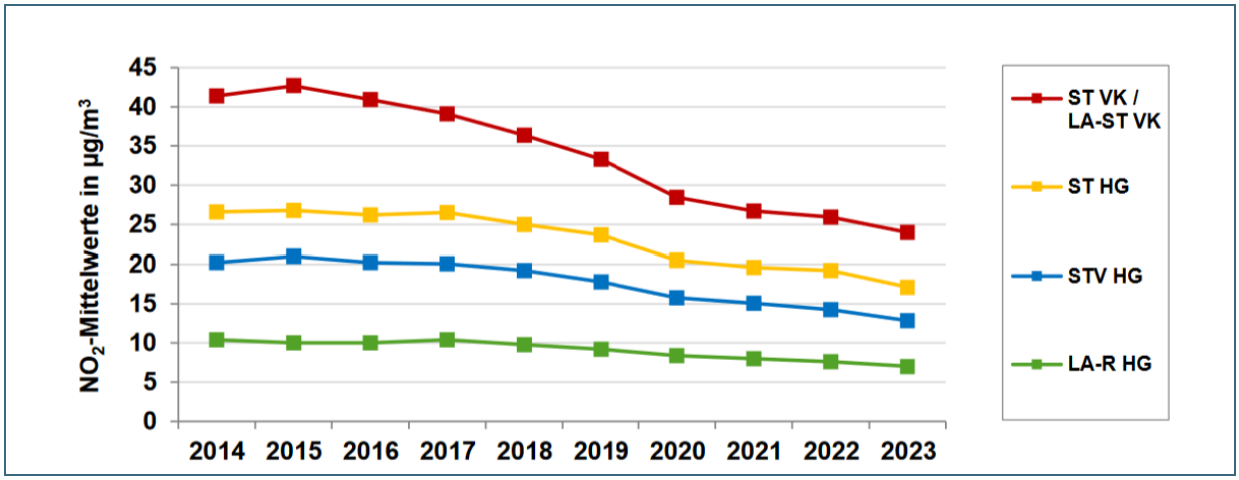


Abb. 36: Stickstoffdioxid (NO_2) – Entwicklung der Konzentrationen in den Belastungsniveaus verkehrsnah (ST VK / LA-ST VK), städtisch (ST HG), vorstädtisch (STV HG) und ländlich (LA-R HG) (LfU 2024)

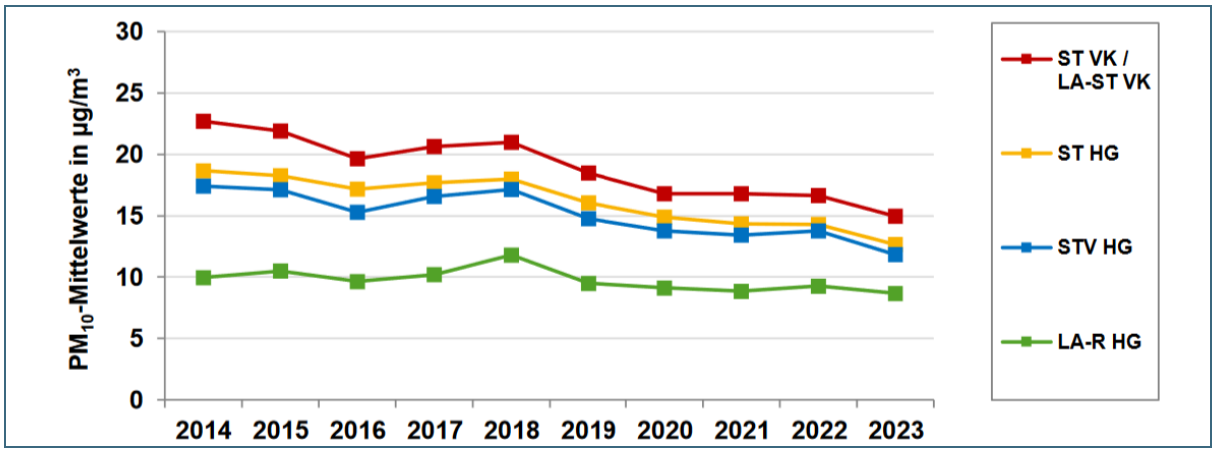


Abb. 37: Feinstaub PM_{10} – Entwicklung der Konzentrationen in den Belastungsniveaus verkehrsnah (ST VK / LA-ST VK), städtisch (ST HG), vorstädtisch (STV HG) und ländlich (LA-R HG) (LfU 2024)

Die über Niederschlagsmessungen des Bayerischen Landesamtes für Umwelt dokumentierten Stickstoffeinträge zeigen, dass für Nitrat ein abnehmender Trend zu verzeichnen ist. Hingegen zeigt der Ammonium-Stickstoff im Beobachtungszeitraum nach einer stabilen Phase in den Jahren 2008 bis 2012 wieder einen leichten Anstieg (LfU 2025).

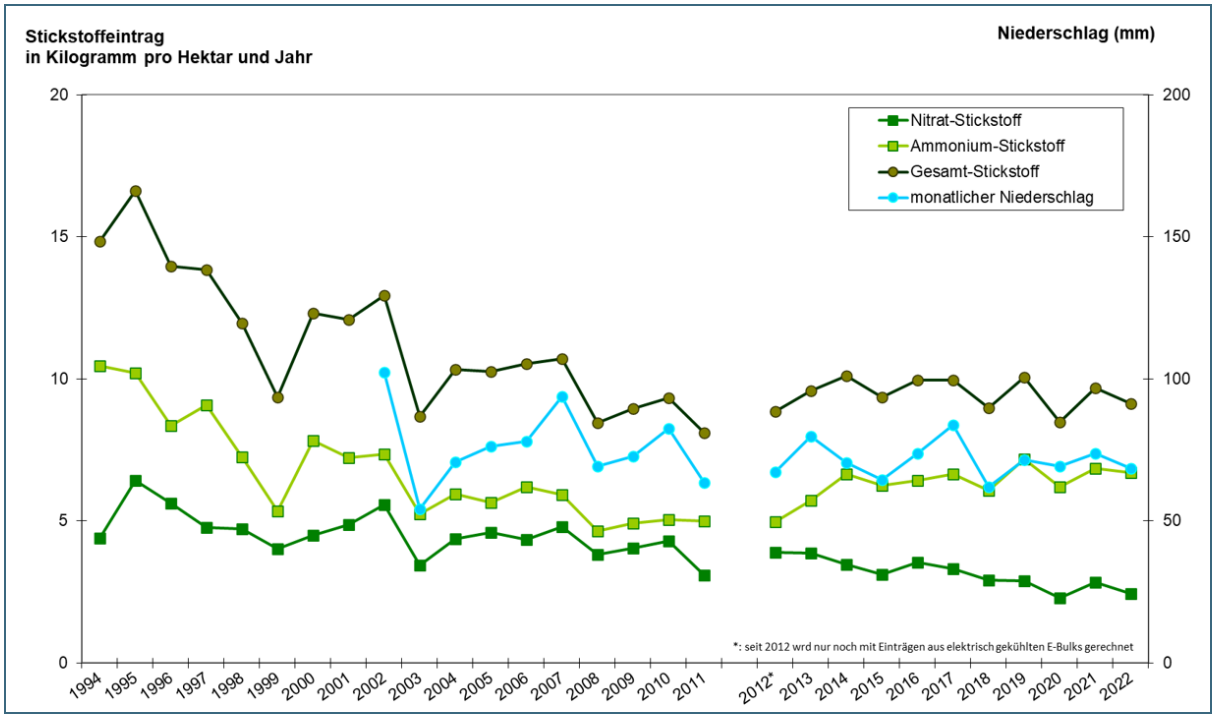


Abb. 38: Zeitlicher Verlauf des Stickstoffeintrags im Niederschlag an ausgewählten Messstellen in Bayern (LfU 2025)

Langjährige Messungen der atmosphärischen Ammoniak-Konzentration an verschiedenen Messstellen durch das Bayerische Landesamt für Umwelt liegen seit 2006 vor. Die neueren Ergebnisse seit 2011 zeigt Abb. 39. Danach steigen die Messwerte seit 2016 leicht an. Die höchsten Werte werden an den landwirtschaftsnahen Standorten und verkehrsnah in Städten erreicht. Hingewiesen wird auch auf den Ferntransport von Ammoniak in weit entfernte Gebiete (LfU 2025). Für eutrophierungsempfindliche Ökosysteme gilt eine Beeinträchtigung durch bewirtschaftete Flächen als wahrscheinlich.

Die Genfer Luftreinhaltekommission empfiehlt die international anerkannten Grenzwerte des UNECE-CLTRP (UNECE (2017) für eine atmosphärische Konzentration (Critical Levels) in Höhe von 1 µg/m³ für Flechten, die zu den bezüglich Ammoniak empfindlichen Arten gehören. Diese Konzentrationen werden an den gemessenen Standorten in Bayern nach Abb. 39 in den letzten Jahren selbst an naturnahen Standorten überschritten.

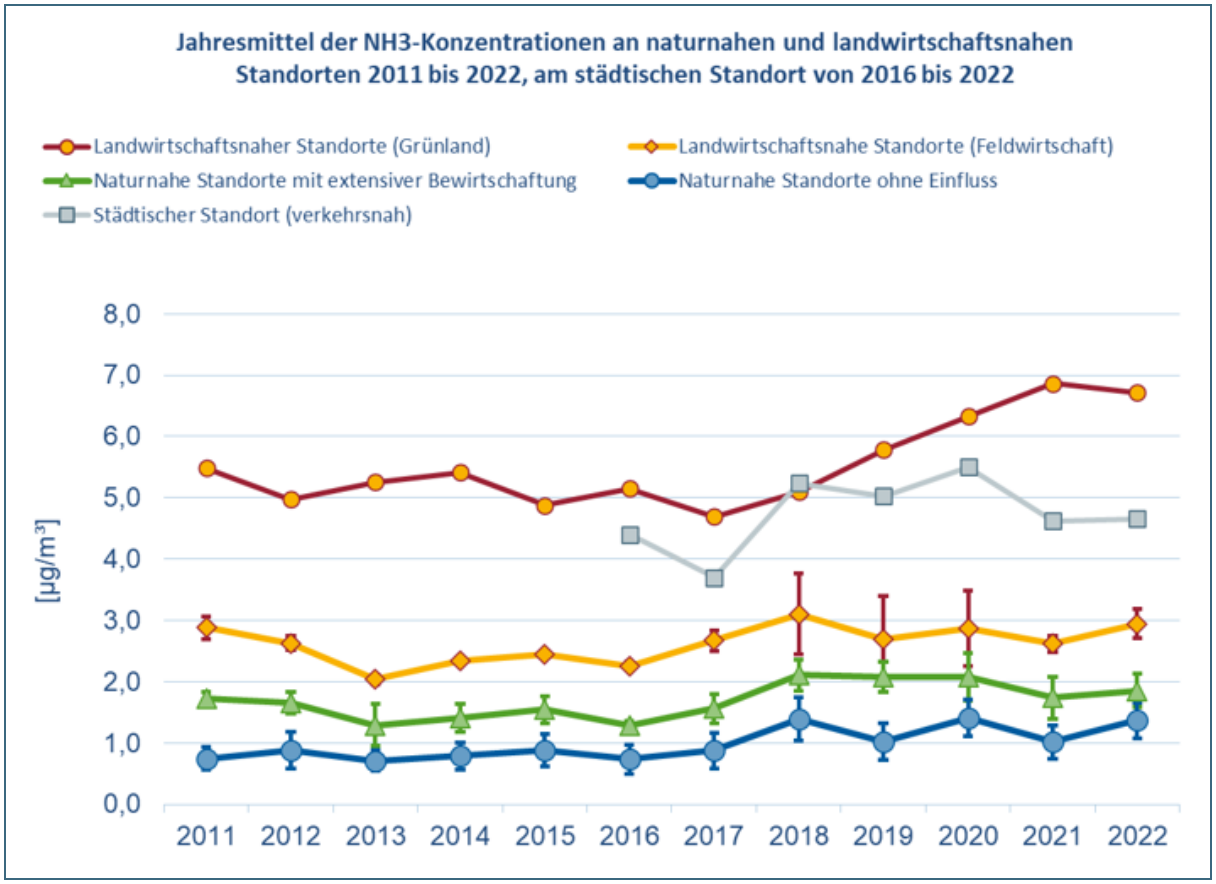


Abb. 39: Zeitlicher Verlauf der atmosphärischen Ammoniak-Konzentration an ausgewählten Messstellen in Bayern (LfU 2025)

Es bleibt festzuhalten, dass die Flechten trotz der Erfolge in der Luftreinhaltung der letzten Jahrzehnte derzeit keine zunehmende Luftgüte anzeigen. Als Grund dafür wird angenommen, dass die Empfindlichkeit der Flechten gegenüber eutrophierenden Verbindungen, allen voran Ammoniak, eine alles andere überlagernde Belastung dieser sensitiven Bioindikatoren darstellt. Die Flechten können stellvertretend für eutrophierungsempfindliche Ökosysteme (z. B. Moore) als Bioindikatoren dienen.

4 Literaturverzeichnis

Bayerisches Landesamt für Statistik (Hrsg.): GENESIS-Online (Bayern).
Daten abgerufen am 14.11.2022

Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2019): Rote Liste und Gesamtartenliste der Flechten (Lichenes), flechtenbewohnenden und flechtenähnlichen Pilze Bayerns. Bearbeiter: W. v. Brackel. Augsburg: 124 S.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2025): Stickstoffeintrag aus Ammonium und Nitrat 2020 im elektrisch gekühlten Bulk-Sammler. Ergebnisse – Eutrophierung und Versauerung. In Vorbereitung.
https://www.lfu.bayern.de/luft/schadstoffe_luft/eutrophierung_versauerung/ergebnisse/pic/ammonium_nitrat_2020.jpg

Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2024): Lufthygienischer Jahresbericht 2023. UmweltSpezial.
https://www.lfu.bayern.de/luft/immissionsmessungen/lufthygienische_berichte/index.htm

Beschel, R. (1955): Individuum und Alter bei Flechten. Phyton (Austria): 60-68.

Dreiser, C., Samimi, C. (2000): Klimagutachten der Stadt Aschaffenburg mit Klimafunktionskarte. Nürnberg: Plan^2

DWD – Deutscher Wetterdienst (o. J.): Vieljährige Mittelwerte zu den DWD-Stationen.
https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/vielj_mittelwerte.html

Geo-Net Umweltconsulting GmbH (2022): Landesweite Schutzgutkarte Klima/Luft für die Landschaftsrahmenplanung. Abschlussbericht. Hrsg.: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) in Kooperation mit dem Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (StMWi).
https://www.lfu.bayern.de/natur/schutzgutkarten/klima_luft/klimaanalysekarten/index.htm

Munzi, S., Correia, O., Silva, P., Lopes, N., Freitas, C., Branquinho, C., Pinho, P. (2014): Lichens as ecological indicators in urban areas: beyond the effects of pollutants. Journal of Applied Ecology (51): 1750-1757.

Printzen, C., Brackel, W. von, Bültmann, H., Cezanne, R., Dolnik, C., Dornes, P., Eckstein, J., Eichler, M., John, V., Killmann, D., Nimis, P. L., Otte, V., Schiefelbein, U., Schultz, M., Stordeur, R., Teuber, D., Thüs, H. (2023). Die Flechten, flechtenbewohnenden und flechtenähnlichen Pilze Deutschlands – Stand 31.03.2023.
https://blam-bl.de/24-blam/neuigkeiten/131-neuigkeiten-3.html

Reich, F., Friedmann, A. (2021): Immissionsbezogene Flechtenkartierung in Augsburg: Ein Vergleich der Jahre 1985, 2008 und 2017. Berichte der Bayerischen Botanischen Gesellschaft 91: 77-94.

Schmitz, U., Stapper, N.J., Stevens, M., Wirooks, L., Diestelhorst, O., Busch, J. (2021): Klimafolgenmonitoring Landeshauptstadt Düsseldorf 2020 - Untersuchungen der Auswirkungen des Klimawandels auf ausgewählte Gruppen der Tier- und Pflanzenwelt. Hrsg.: Umweltamt der Stadt Düsseldorf.

StMUV - Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2021). Klima-Report Bayern 2021. Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten.
https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/stmuv_klima_012.htm

Sukopp, H., Wurzel, A. (1995): Klima- und Florenveränderungen in Stadtgebieten. Angewandte Landschaftsökologie 4 (95): 103-130.

UNECE (2017): Manual for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels. Chapter 3: Mapping critical levels for vegetation. Coordinating Centre for Effects, Umweltbundesamt Germany. https://www.umweltbundesamt.de/manual-on-methodologies-criteria-for-modelling-2024

Van Herk, C.M., Aptroot, A., van Dobben, H.F. (2002): Long-term monitoring in the Netherlands suggests that lichens respond to global warming. Lichenologist (34): 141-154.

VDI 3957 Blatt 13 (2023): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen mit Flechten (Biomonitoring). Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für Luftgüte. In: *VDI/DIN Handbuch Reinhaltung der Luft*.

VDI 3957 Blatt 20 (2017): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen (Biomonitoring). Kartierung von Flechten zur Ermittlung der Wirkung von lokalen Klimaveränderungen. In: *VDI/DIN Handbuch Reinhaltung der Luft*.

Vorbeck, A., Windisch, U., Peichl, L. (1997): Landesweite immissionsbezogene Flechtenkartierung in Bayern. Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung 9:1-6. https://www.lfu.bayern.de/klima/klimabeobachtung/beobachtung_bayern/phaenologie/doc/flechten_bayern_1996_website_lfu.pdf

Vorbeck, A., Windisch, U. (1999): Kartierung der epiphytischen Flechtenvegetation in Bamberg. Beurteilung der Luftqualität und Hinweise für den Artenschutz. Gutachten im Auftrag des Amtes für Umwelt-, Brand- und Katastrophenschutz der Stadt Bamberg.

Vorbeck, A., Windisch, U. (2000): Flechtenkartierung München. Eignung von Flechten als Bioindikatoren für verkehrsbedingte Immissionen. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bayerischen Landesamtes für Umwelt.

Vorbeck, A., Windisch, U., Eichler, M., Cezanne, R. (2016): Flechtenkartierung Aschaffenburg 2015. Bewertung der lufthygienischen Situation und Bioindikation des Klimawandels. Gutachten im Auftrag des Amtes für Umwelt- und Verbraucherschutz der Stadt Aschaffenburg

Windisch, U., Vorbeck, A. (1998): Kartierung der epiphytischen Flechtenvegetation zur Beurteilung der Luftqualität in Nürnberg. Gutachten im Auftrag des Chemischen Untersuchungsamtes Nürnberg.

Windisch, U., Vorbeck, A., Eichler, M., Cezanne, R. (2011): Untersuchung der Wirkung des Klimawandels auf biotische Systeme in Bayern mittels Flechtenkartierung. Publikationen zum Thema Luftreinhaltung des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit. 92 Seiten https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_all_00098.htm

Windisch, U., Pungin, A., Tremp, H. (2018): Wirkungsermittlung von Stadtklima-effekten auf Biota anhand des Bioindikators Flechte in Wiesbaden und Mainz. Abschlussbericht in Kooperation des Fachzentrums Klimawandel und Anpassung des HLNUG und des Grün- und Umweltamtes der Landeshauptstadt Mainz.

Windisch, U., Vorbeck, A. (2019): Flechtenkartierung Coburg 2018. Lufthygienische Bewertung im Stadtgebiet von Coburg anhand einer Flechtenkartierung nach VDI 3957, Blatt 13, Anhang A. Gutachten im Auftrag der Stadt Coburg, des Zweckverbands für Abfallwirtschaft in Nordwest-Oberfranken, der Gemeinden Ahorn und Weitramsdorf

Windisch, U., Eichler, M., Cezanne, R. (2024): Dauerbeobachtung von Flechten 2022 in Hessen sowie 2020 in den Städten Wetzlar und Gießen. Hessisches Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (HLNUG) (Hrsg.).

Wirth, V. (2010): Ökologische Zeigerwerte von Flechten - erweiterte und aktualisierte Fassung. Herzogia (23 (2)): 229–248.

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

Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK) der Technischen Universität München
https://www.zsk.tum.de

5 Anhang

Anhang 1: Liste der Messflächen der landesweiten Untersuchung

Anhang 2: Liste der Messflächen der Stadtklima-Untersuchung

Anhang 3: Liste der gefundenen Flechtenarten

Anhang 4: Berechnungsbeispiel des Luftgüteindex (LGI)

5.1 Anhang 1: Liste der Messflächen der landesweiten Untersuchung

Nr.	Name	Nr. DWD-Station	mittlere Höhe in m ü. NHN	Temperatur Jahresmittel 1991-2020	Niederschlag Jahresmittel 1991-2020
17	Bad Kissingen	2597	282	9,3	666
26	Selb/Oberfranken-Lauterbach	4548	609	7,2	743
27	Kahl am Main	2480	107	10,8	674
54	Fichtelberg/Oberfr.-Hüttstadl	1357	657	7	1151
59	Röllbach	3319	239	9,9	687
78	Gollhofen	5149	308	9,6	618
96	Pommelsbrunn-Mittelburg	3975	522	8,4	886
100	Oberviechtach	3739	596	7,9	740
132	Weißenburg	5440	422	9,1	667
164	Kösching	2700	417	9,2	696
172	Saldenburg-Entschenreuth	4354	456	8,3	1103
194	Augsburg	232	416	8,9	749
202	Falkenberg, Kr. Rottal-Inn	1332	472	9,2	813
243	Ebersberg-Halbing	1103	592	8,7	1035
247	Memmingen	3244	615	8,4	962
252	Attenkam	217	672	8,6	1141
276	Oy-Mittelberg-Petersthal	3857	872	7,5	1584
282	Wendelstein	5467	1.832	2,9	1699
288	Berchtesgaden/Obersalzberg	110	950	6,8*	keine Daten
295	Mittenwald-Buckelwiesen	3307	981	6,9	1424
901	München-Stadt	3379	515	9,7	940
902	Nürnberg	3668	314	9,3	601
903	Schönau am Königssee	361	616	8,2	1504
904	Sigmarszell-Zeisertsweiler	4704	507	9	1521
905	Oberstdorf	3730	806	6,5	1669

Erläuterung zur Messfläche 288 (Berchtesgaden): *Temperaturwerte sind aus dem Zeitraum 1999-2010

5.2 Anhang 2: Liste der Messflächen der Stadtklima-Untersuchung

laufende Nr.	Nr. Messfläche	Ortsbezeichnung
1	AB-01	Ottostraße
2	AB-02	Friedhof Damm
3	AB-03	Park am Galgenbuckel
4	AB-04	Maybachstraße
5	AB-05	Herrenwaldstraße
6	AB-06	Nordfriedhof
7	AB-07	Boppstraße / Inselstraße
8	AB-08	Schillerstraße
9	AB-09	Kapuzinerplatz
10	AB-10	Am Floßhafen
11	AB-11	Kleine Schönbuschallee
12	AB-12	Friedrich-Dessauer-Gymnasium
13	AB-13	Lamprechtstraße
14	AB-14	Brentanoplatz
15	AB-15	Hofgarten Süd
16	AB-16	Hofgarten Nord
17	AB-17	Fasanerie
18	AB-18	Ludwigsallee
19	AB-19	Großmutterwiese
20	AB-20	Flachstraße / Würzburger Straße
21	AB-21	Würzburger Straße / Carglass
22	AB-22	Würzburger Straße / Bessenbacher Weg
23	AB-23	Würzburger Straße / Edeka
24	AB-24	Würzburger Straße / Burger King
25	AB-25	Schurzstraße
26	AB-26	Sportgelände BSC
27	AB-27	Barmergasse
28	AB-28	Brentanostraße
29	AB-29	Friedhof Schweinheim
30	AB-30	Josef-Zeller-Anlage
31	N-01	Schoppershof Elbinger / Merseburger Straße
32	N-02	Volkspark Marienberg
33	N-03	Am Stadtpark / Virchowstraße
34	N-04	Stadtpark
35	N-05	Vestnertorgraben
36	N-06	Pegnitzause / Hallerwiese
37	N-07	Dutzendteich Nord
38	N-08	Dutzendteich Süd
39	N-09	Dutzendteich Silbersee
40	N-10	Julius-Loßmann-Straße
41	N-11	Ecke am Wiesengrund / An der Radrunde
42	N-12	Ecke am Wiesengrund / Marpergerstraße

laufende Nr.	Nr. Messfläche	Ortsbezeichnung
43	N-14	Bayernstraße gegenüber Volksfestplatz
44	N-15	Landgrabenstraße gegenüber Melanchthonstraße
45	N-16	Südstadtpark
46	N-17	Aufseßplatz
47	N-18	Frauentorgraben
48	N-19	Königstorgraben
49	N-20	an der Pegnitz beim blauen Reiter
50	N-21	Laufer Schlagturm Willstätter Gymnasium
51	N-22	Webersplatz
52	N-23	Gibitzenhofstraße
53	N-24	Karl-Schönleben-Straße
54	N-25	Frankenstraße
55	N-26	Grünanlage Hasenbuck bei der Luthereiche
56	N-27	Humboldtstraße West
57	N-28	Humboldtstraße bei Herz-Jesu-Kirche
58	N-29	Schützenstraße
59	N-30	Cramer-Klett-Park
60	N-31	Volkspark Marienberg beim Weiher
61	M-01	Englischer Garten Hochzeitsbrücke
62	M-02a	Englischer Garten Werneckwiese
63	M-03	Englischer Garten Carl-Theodor-Straße
64	M-04	Josephsplatz
65	M-05	Nordfriedhof
66	M-06	Ostfriedhof
67	M-07	Heilig-Kreuz-Kirche
68	M-08	Wittelsbacher Straße
69	M-09	Bavariaring
70	M-10	Hirschgarten
71	M-11	Hirschgartenallee
72	M-12	Nymphenburgpark
73	M-13	Arnulfstraße
74	M-14	Hofgarten
75	M-15	Sieboldstraße
76	M-16	Friedhofen Haidhausen
77	M-17	Prinzregentenstraße
78	M-18	Theresienhöhe
79	M-19	Bavariaring nördlich Theresienwiese
80	M-20	Gollierplatz
81	M-21	bei St. Rupert
82	M-22	Nördliche Auffahrtsallee
83	M-23	Nymphenburger Straße West
84	M-24	Marsstraße
85	M-25	Nymphenburger Straße Ost
86	M-26	Maßmannpark

laufende Nr.	Nr. Messfläche	Ortsbezeichnung
87	M-27	Ungererstraße
88	M-28	Betzwiese im Englischen Garten
89	M-29	Klosterhofstraße
90	M-30	Wittelsbacher Platz

Erläuterung: AB: Aschaffenburg, N: Nürnberg, M: München

5.3 Anhang 3: Liste der gefundenen Flechtenarten

Nr.	Taxon	Rote Liste Bayern	Klima-wandel-zeiger	Eutrophie-rungs-zeiger
1	Acrocordia gemmata (Ach.) A. Massal.	3		
2	Agonimia tristicula (Nyl.) Zahlbr.	*		
3	Alyxoria varia (Pers.) Ertz & Tehler	V		
4	Amandinea punctata (Hoffm.) Coppins & Scheid.	*		
5	Anaptychia ciliaris (L.) Flot.	2		
6	Anisomeridium polypori (Ellis & Everh.) M. E. Barr	*		
7	Arthonia ligniaria Hellb.	neu		
8	Arthonia radiata (Pers.) Ach.	*		
9	Arthopyrenia salicis A. (Massal.	R		
10	Athallia cerinella (Nyl.) Arup, Frödén & Søchting	V		x
11	Athallia cerinelloides (Erichsen) Arup, Frödén & Søchting	3		x
12	Athallia holocarpa (Hoffm.) Arup, Frödén & Søchting	D		x
13	Athallia pyracea (Ach.) Arup, Frödén & Søchting	*		x
15	Bacidia igniarii (Nyl.) Oxner	1		
16	Bacidia rubella (Hoffm.) A. Massal.	V		
17	Bacidina modesta (Vain.) S. Ekman	D		
18	Bacidina neosquamulosa (Aptroot & Herk) S. Ekman	D	x	
19	Biatora beckhausii (Körb.) Tuck.	2		
20	Biatora efflorescens (Hedl.) Räsänen	G		
21	Biatora globulosa Fr.	3		
22	Biatoridium monasteriense Körb.	2		
23	Bilimbia sabuletorum (Schreb.) Arnold	*		
24	Blastenia coralliza (Arup & Åkelius) Arup, Søchting & Frödén	D		
25	Blastenia herbidella (Nyl.) Servít	3		
26	Bryoria fuscescens (Gyelnik) Brodo & D. Hawksw.	3		
27	Buellia griseovirens (Sm.) Almb.	*		
28	Calicium adspersum Pers.	2		
29	Calicium salicinum Pers.	3		
30	Calicium viride Pers.	3		
31	Caloplaca cerina (Hedw.) Th. Fr.	3		
32	Caloplaca chlorina (Flot.) H. Olivier	*		
33	Caloplaca monacensis (Lederer) Lettau	1		
34	Caloplaca obscurella (Körb.) Th. Fr.	*		
35	Caloplaca turkuensis (Vain.) Zahlbr.	D		
36	Candelaria concolor (Dicks.) Stein	*		x
37	Candelaria pacifica M.Westb. & Arup.	*		x
38	Candelariella aurella (Hoffm.) Zahlbr.	*		x
39	Candelariella reflexa s. lat. (Nyl.) Lettau	–		x
40	Candelariella reflexa s. str. (Nyl.) Lettau	D		x
41	Candelariella viae-lacteae G. Thor & V. Wirth	R		
42	Candelariella vitellina (Hoffm.) Müll. Arg.	*		x
43	Candelariella xanthostigma (Ach.) Lettau	*		

Nr.	Taxon	Rote Liste Bayern	Klima-wandel-zeiger	Eutrophie-rungs-zeiger
44	Catillaria fungoides Etayo & van den Boom	–		
45	Catillaria nigroclavata (Nyl.) J. Steiner	*		x
46	Cetraria pinastri (Scop.) Gray	G		
47	Cetrelia cetrarioides (Duby) W. L. Culb. & C. F. Culb.	3		
48	Cetrelia olivetorum (Nyl.) W. L. Culb. & C. F.	3		
49	Cetrelia monachorum (Zahlbr.) W. L. Culb. & C. F. Culb.	2		
50	Chaenotheca chrysocephala (Ach.) Th. Fr.	V		
51	Chaenotheca ferruginea (Sm.) Mig.	*		
52	Chaenotheca furfuracea (L.) Tibell	V		
53	Chaenotheca phaeocephala (Turner) Th. Fr.	2		
54	Chaenotheca trichialis (Ach.) Th. Fr.	V		
55	Chaenotheca xyloxena Nádv.	G		
56	Chaenothecopsis pusilla (Ach.) A. F. W. Schmidt	3		
57	Chrysothrix candelaris (L.) J. R. Laundon	V		
58	Cladonia coniocraea (Flörke) Spreng.	*		
59	Cladonia digitata (L.) Hoffm.	*		
60	Cladonia fimbriata (L.) Fr.	*		
61	Cladonia pyxidata (L.) Hoffm. s. lat.	–		
62	Coenogonium pineti (Ach.) Lücking & Lumbsch	*		
63	Collema nigrescens (Huds.) DC.	2		
64	Diarthonis spadicea (Leight.) Frisch, Ertz, Coppins & P.F. Cannon	*		
65	Evernia divaricata (L.) Ach.	V		
66	Evernia prunastri (L.) Ach.	*		
67	Fellhanera viridisorediata Aptroot, M. Brand & Spier	D		
68	Flavoparmelia caperata (L.) Hale	*	x	
69	Flavoparmelia soredians (Nyl.) Hale	*	x	
70	Flavoplaca oasis (A. Massal.) Arup, Frödén & Søchting	*		
71	Flavopunctelia flaventior (Stirt.) Hale	3		
72	Frutidella furfuracea (Anzi) M. Westb. & M. Svenss.	*		
73	Fuscidea lightfootii (Sm.) Coppins & P.James	R	x	
74	Graphis scripta (L.) Ach.	V		
75	Gyalecta fagicola (Arnold) Kremp.	2		
76	Gyalecta truncigena (Ach.) Hepp	1		
78	Gyalecta ulmi (Sw.) Zahlbr.	1		
79	Gyalideopsis helvetica van den Boom & Vězda	R		
80	Haematomma ochroleucum (Neck.) J. R. Laundon var. ochroleucum	3		
81	Halecania viridescens Coppins & P. James	*	x	
82	Hyperphyscia adglutinata (Flörke) H. Mayrhofer & Poelt	*		
83	Hypocenomyce scalaris (Ach.) M. Choisy	*		
84	Hypogymnia bitteri (Lynge) Ahti	*		
85	Hypogymnia farinacea Zopf	G		
86	Hypogymnia physodes (L.) Nyl.	*		
87	Hypogymnia tubulosa (Schaer.) Hav.	*		

Nr.	Taxon	Rote Liste Bayern	Klima-wandel-zeiger	Eutrophie-rungs-zeiger
88	Hypotrachyna afrorevoluta (Krog & Swinscow) Krog & Swinscow	*	x	
89	Hypotrachyna revoluta (Flörke) Hale	G	x	
90	Imshaugia aleurites (Ach.) S. L. F. Mey.	*		
91	Jamesiella anastomosans (P. James & Vězda) Lücking, Sérus. & Vězda	*		
92	Lecania croatica (Zahlbr.) Kotlov	D		
93	Lecania cyrtella (Ach.) Th. Fr.	*		
94	Lecania naegelii (Hepp) Diederich & van den Boom	*		
95	Lecanora albella (Pers.) Ach.	3		
96	Lecanora allophana f. allophana (Ach.) Nyl.	3		
97	Lecanora allophana f. sorediata Vain.	–		
98	Lecanora argentata (Ach.) Malme	V		
99	Lecanora barkmaniana Aptroot & Herk	*		
100	Lecanora carpinea (L.) Vain.	*		
101	Lecanora chlarotera Nyl.	*		
102	Lecanora circumborealis Brodo & Vitik.	*		
103	Lecanora compallens Herk & Aptroot	*		
104	Lecanora conizaeoides Cromb.	*		
106	Lecanora expallens Ach.	*		
107	Lecanora fuscescens (Sommerf.) Nyl.	D		
108	Lecanora glabrata (Ach.) Nyl.	D		
110	Lecanora horiza (Ach.) Linds.	R		
111	Lecanora hybocarpa (Tuck.) Brodo	neu	x	
112	Lecanora intumescens (Rebent.) Rabenh.	V		
113	Lecanora pulicaris (Pers.) Ach.	*		
114	Lecanora saligna (Schrad.) Zahlbr.	*		
115	Lecanora subcarpinea Szatala	G		
116	Lecanora symmicta (Ach.) Ach.	*		
117	Lecanora thysanophora R. C. Harris	D		
118	Lecanora varia (Hoffm.) Ach.	3		
119	Lecidea nylanderi (Anzi) Th.Fr.	2		
120	Lecidella elaeochroma (Ach.) M. Choisy	*		
121	Lecidella elaeochroma f. soralifera (Erichsen) D. Hawksw.	–		
122	Lecidella flavosorediata (Vězda) Hertel & Leuckert	*		
123	Lepra albescens var. albescens (Huds.) Hafellner	*		
124	Lepra amara (Ach.) Hafellner	*		
125	Lepraria incana agg. (L.) Ach.	–		
126	Lepraria rigidula (B. de Lesd.) Tønsberg	*		
127	Lepraria vouauxii (Hue) R. C. Harris	*		
128	Leptogium saturninum (Dicks.) Nyl.	2		
129	Melanelixia fuliginosa (Duby) O. Blanco et al.	*		
130	Melanelixia glabra (Schaer.) O. Blanco et al.	G		
131	Melanelixia glabratula (Lamy) Sandler & Arup	*		
132	Melanelixia subargentifera (Nyl.) O. Blanco et al.	2		

Nr.	Taxon	Rote Liste Bayern	Klima-wandel-zeiger	Eutrophie-rungs-zeiger
133	Melanelixia subaurifera (Nyl.) O. Blanco et al.	*		
134	Melanohalea elegantula (Zahlbr.) O. Blanco et al.	*	x	
135	Melanohalea exasperata (De Not.) O. Blanco et al.	3		
136	Melanohalea exasperatula (Nyl.) O. Blanco et al.	*		
137	Micarea peliocarpa (Anzi) Coppins & R.Sant.	*		
138	Mycobilimbia epixanthoides (Nyl.) Hafellner & Türk	G		
139	Nephromopsis chlorophylla (Willd.) Divakar, A. Crespo & Lumbsch	V		
141	Normandina pulchella (Borrer) Nyl.	*		
142	Ochrolechia alboflavescens (Wulfen) Zahlbr.	V		
143	Ochrolechia androgyna (Hoffm.) Arnold s. lat.	3		
144	Ochrolechia arborea (Kreyer) Almb.	G		
145	Ochrolechia microstictoides Räsänen	*		
146	Ochrolechia subviridis (Høeg) Erichsen	2		
147	Ochrolechia turneri (Sm.) Hasselrot	3		
148	Opegrapha niveoatra (Borrer) J. R. Laundon	G		
149	Palicella filamentosa (Stirt.) Rodr. Flakus & Printzen	G		
150	Parmelia ernstiae Feuerer & A. Thell	D		
151	Parmelia saxatilis (L.) Ach. s. lat.	–		
152	Parmelia sulcata Taylor	*		
153	Parmelina pastillifera (Harm.) Hale	G		
154	Parmelina tiliacea (Hoffm.) Hale	*		
155	Parmeliopsis ambigua (Hoffm.) Nyl.	*		
156	Parmeliopsis hyperopta (Ach.) Arnold	*		
157	Parmotrema perlatum (Huds.) M. Choisy	V	x	
158	Peltigera collina (Ach.) Schrad.	2		
159	Peltigera horizontalis (Huds.) Baumg.	3		
160	Pertusaria coccodes (Ach.) Nyl.	V		
161	Pertusaria flavida (DC.) J. R. Laundon	3		
162	Pertusaria pertusa var. pertusa (L.) Tuck	V		
163	Phaeophyscia endophoenicea (Harm.) Moberg	V		
164	Phaeophyscia hirsuta (Mereschk.) Moberg	1		
165	Phaeophyscia nigricans (Flörke) Moberg	*		x
166	Phaeophyscia orbicularis (Necker) Moberg	*		x
167	Phlyctis argena (Spreng.) Flot.	*		
168	Physcia adscendens H. Olivier	*		x
169	Physcia aipolia (Humb.) Fürnr.	2		x
170	Physcia caesia (Hoffm.) Fürnr.	*		x
171	Physcia dubia (Hoffm.) Lettau var. dubia	*		x
172	Physcia stellaris (L.) Nyl.	*		
173	Physcia tenella (Scop.) DC.	*		x
174	Physcia vitii Nádv.	G		
175	Physciella chloantha (Ach.) Essl.	G		x
176	Physconia distorta (With.) J. R. Laundon	3		
177	Physconia enteroxantha (Nyl.) Poelt	*		

Nr.	Taxon	Rote Liste Bayern	Klima-wandel-zeiger	Eutrophie-rungs-zeiger
178	Physconia grisea (Lam.) Poelt	*		x
179	Physconia perisidiosa (Erichsen) Moberg	*		
180	Piccolia ochrophora (Nyl.) Hafellner	*		
181	Placynthiella dasaea (Stirt.) Tønsberg	*		
182	Placynthiella icmalea (Ach.) Coppins & P. James	*		
183	Platismatia glauca (L.) W. L. Culb. & C. F. Culb.	*		
184	Pleurosticta acetabulum (Neck.) Elix & Lumbsch	V		
185	Polycauliona candelaria (L.) Frödén, Arup & Søchting	*		x
186	Polycauliona polycarpa (Hoffm.) Frödén, Arup & Søchting	*		x
187	Polyozosia dispersa (Pers.) S.Y. Kondr., Lőkös & Farkas	*		x
188	Polyozosia dispersa s. lat.	–		x
105	Polyozosia hagenii (Ach.) S.Y.Kondr., Lőkös & Farkas	*		x
109	Polyozosia persimilis (Th. Fr.) S.Y. Kondr., Lőkös & Farkas	*		x
140	Protoparmelia hypotremella Herk, Spier & V. Wirth	*		
189	Protoparmelia oleagina (Harm.) Coppins	D		
190	Pseudevernia furfuracea (L.) Zopf	*		
191	Pseudosagedia aenea (Wallr.) Hafellner & Kalb	*		
192	Pseudoschismatomma rufescens (Pers.) Ertz & Tehler	V		
193	Psoroglaena dictyospora (Orange) H. Harada	R		
194	Punctelia borreri (Sm.) Krog	*	x	
195	Punctelia jeckeri (Roum.) Kalb	*	x	
196	Punctelia subrudecta (Nyl.) Krog	*	x	
197	Pycnora sorophora (Vain.) Hafellner	*		
198	Pyrenula nitida (Weigel) Ach.	3	x	
199	Ramalina europaea Gasparyan, Sipman & Lücking	–		
200	Ramalina farinacea (L.) Ach.	*		
201	Ramalina fastigiata (Pers.) Ach.	1		
202	Ramalina fraxinea (L.) Ach.	2		
203	Ramalina pollinaria (Westr.) Ach.	3		
204	Rinodina capensis Hampe	R		
205	Rinodina colobina (Ach.) Th. Fr.	1		
206	Rinodina efflorescens Malme			.
207	Rinodina griseosoralifera Coppins	G		
208	Rinodina oleae Bagl.	D		x
209	Rinodina pityrea Ropin & H. Mayrhofer	*		x
210	Rinodina pyrina (Ach.) Arnold	3		
211	Rinodina sophodes (Ach.) A.Massal.	1		
212	Ropalospora viridis (Tønsberg) Tønsberg	*	x	
213	Rostania occultatum (Bagl.) Otálora, P.M.Jørg. & Wedin	1		
214	Rusavskia elegans (Link) S. Y. Kondr. & Kärnefelt	*		
215	Sclerophora pallida (Pers.) Y. J. Yao & Spooner	1		
216	Scoliciosporum chlorococcum (Stenham.) Vězda	*		
217	Scoliciosporum sarothamni (Vain.) Vězda	D		
218	Scoliciosporum umbrinum (Ach.) Arnold	*		

Nr.	Taxon	Rote Liste Bayern	Klima-wandel-zeiger	Eutrophie-rungs-zeiger
219	Scutula circumspecta (Vain.) Kistenich, Timdal, Bendiksby & S. Ekman	1		
220	Scythioria phlogina (Ach.) S.Y.Kondr., Kärnefelt, Elix, A.Thell & Hur	D		x
221	Scytinium fragrans (Sm.) Otálora, P.M.Jørg. & Wedin	1		
222	Scytinium lichenoides (L.) Otálora, P.M. Jørg. & Wedin	V		
223	Scytinium teretiusculum (Dicks.) Otálora, P.M. Jørg. & Wedin	2		
224	Solitaria chrysophthalma (Degel.) Arup, Søchting & Frödén	1		
225	Sphinctrina anglica Nyl.	1		
226	Strangospora pinicola (A. Massal.) Körb.	*		
227	Toniniopsis separabilis (Nyl.) Gerasimova & A.Beck	–		
228	Trapeliopsis flexuosa (Fr.) Coppins & P. James	*		
229	Usnea dasopoga (Ach.) Nyl.	V		
230	Usnea hirta (L.) F. H. Wigg.	*		
231	Usnea subfloridana Stirt.	3		
232	Usnea substerilis Motyka	G		
233	Varicellaria hemisphaerica (Flörke) I. Schmitt & Lumbsch	3		
234	Violella fucata (Stirt.) T. Sprib.	*		
235	Xanthomendoza fulva (Hoffm.) Søchting, Kärnefelt & S.Y.	3		
236	Xanthomendoza huculica (S.Y. Kondr.) Diederich	D		x
237	Xanthomendoza ulophyllodes (Räsänen) Søchting, Kärnefelt & S.Y. Kondr.	3		
238	Xanthoparmelia verruculifera (Nyl.) O. Blanco et al.	*		
239	Xanthoria parietina (L.) Th. Fr.	*		x

Erläuterungen:
Rote Liste Bayern: Rote-Liste-Kategorie (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019); Kat. 1: vom Aussterben bedroht, Kat. 2: stark gefährdet, Kat. 3: gefährdet, Kat. G: Gefährdung unbekannten Ausmaßes, Kat. R: wegen Seltenheit gefährdete Arten, Kat. V: Vorwarnliste, D: Daten unzureichend, *: ungefährdet, –: kein Status, neu: Neufund von Eichler und Cezanne.
Klimawandelzeiger: Status nach Richtlinie VDI 3957 Blatt 20 (2017)
Eutrophierungszeiger: Status nach Richtlinie VDI 3957 Blatt 13 (2023)

5.4 Anhang 4: Berechnungsbeispiel Luftgüteindex (LGI)

Fraxinus **Flechtenkartierung Bayern: VDI-Bäume** Datum: ..... Messfläche Nr.:

Kartierung: Ortsbezeichnung: Beispiel

Objekt-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Baum-Nr. in 2011										
Baumart (L:Linde, E:Gem.Esche)	L	L	L	E	E	L	E	E	L	L
Umfang in 1,3 m Höhe (70-250 cm)	80	95	100	98	88	180	210	190	90	92
Exposition der Aufnahmefläche	SW	SW	W	SSW	W	SW	S	W	SW	SW
Wind (bes. geschützt, zugängig)										
Licht (bes. beschattet, unbeschattet)										
Gelände / Geländeexposition	Ebene	Ebene	Ebene	Ebene	Ebene	Ebene	Ebene	Ebene	Ebene	Ebene
Versiegelung im 20 m Umkreis	< 25%	< 25%	< 25%	< 25%	< 25%	< 25%	< 25%	< 25%	< 25%	< 25%
Verkehrsbelastung	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine
Landwirtschaftlicher Einfluss	Acker	Acker	Acker	Acker	Acker	Acker	Acker	Acker	Acker	Acker

Referenzarten										
Buellia griseovirens		4	6	5			8	6		
Flavoparmelia caperata	1	2					1		6	2
Hypogymnia physodes						1			2	
Hypogymnia tubulosa						3				8
Lecanora carpinea	5	2							1	1
Lecanora chlarotera	2	2			6					
Melanelixia glabratula			5				4	4		
Melanelixia subaurifera			2					1		1
Melanohalea exasperatula				8	6					
Parmelia sulcata	4	6	5	1		1			4	
Parmelina tiliacea						10				
Parmotrema perlatum			2							1
Punctelia subrudecta	6	2	3			2			1	1
Flechtendiversitätswert (FDW)	18	18	23	14	12	17	13	11	14	14
mittl. FDW Referenzarten	15,4									
Eutrophierungszeiger										
Candelaria concolor				2	2		6	8	5	
Phaeophyscia orbicularis	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Physcia adscendens	10	10	10	10	10	8	8	10	7	6
Physcia tenella	8	10	10	10	6	10	10	10	10	10
Physconia grisea				3	4					
Xanthoria candelaria-Gr.							2			
Xanthoria parietina	6	8	8	10	10	8	3	2	5	10
Flechtendiversitätswert (FDW)	34	38	38	45	42	36	39	40	37	36
mittl. FDW Eutrophierungsz.	38,5									

Ergebnis nach Auslesen des FDW in der Bewertungsmatrix: Luftgüteindex = 3 E4

Bewertung der Luftgüte:
Mäßige Luftgüte bei starkem Einfluss eutrophierender Luftverunreinigungen



Eine Behörde im Geschäftsbereich

Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

