



finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



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



Bayerisches Landesamt für Umwelt
Dr. Jutta Köhler



Fraxinus GbR, Büro für Bioindikation
Prof. Dr. Ute Windisch

Projektlaufzeit: 2022-2024



Ziele des gesamten Flechtenprojektes

➤ landesweites Flechten-Biomonitoring

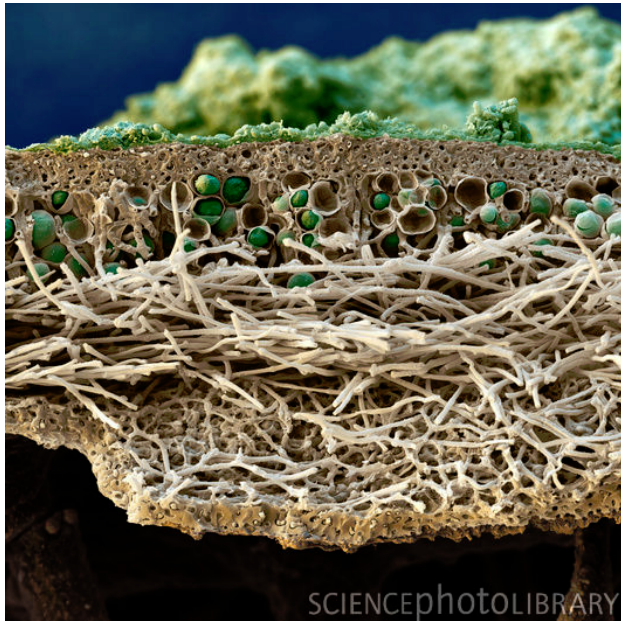
- Wirkungen des lokalen Klimawandels
Fortführung der Dauerbeobachtung (1996, 2011, 2023)
- zeitliche Entwicklung der Luftgüte
Fortführung der Dauerbeobachtung (1996, 2011, 2023)

➤ Stadtklima-Biomonitoring mit Flechten

- Untersuchungen in drei bayerischen Städten zu Stadtklimawirkungen auf Flechten
- Entwicklung einer Methode in Abstimmung mit einer Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) zur Erfassung der Wirkungen von Stadtklima (Richtlinie VDI 3957 Blatt 22)



Physiologische Eigenschaften des Bioindikators Flechte



Querschnitt Blattflechte:

Parmelia sulcata, REM-Aufnahme

- Symbiose aus zwei Biota:
Pilz und photosynthetisch aktiver Partner
- passive Aufnahme und Abgabe von Wasser
in Form von Regen, Nebel oder Tau
- bleibt die Wasserversorgung aus, wird der
Stoffwechsel gedrosselt (Zustand „latenten
Lebens“)
- mit dem Wasser werden auch Nähr- und
Schadstoffe aufgenommen



Methoden

➤ landesweites Flechten-Biomonitoring

- Wirkungen des lokalen Klimawandels

Richtlinie VDI 3957 Blatt 20

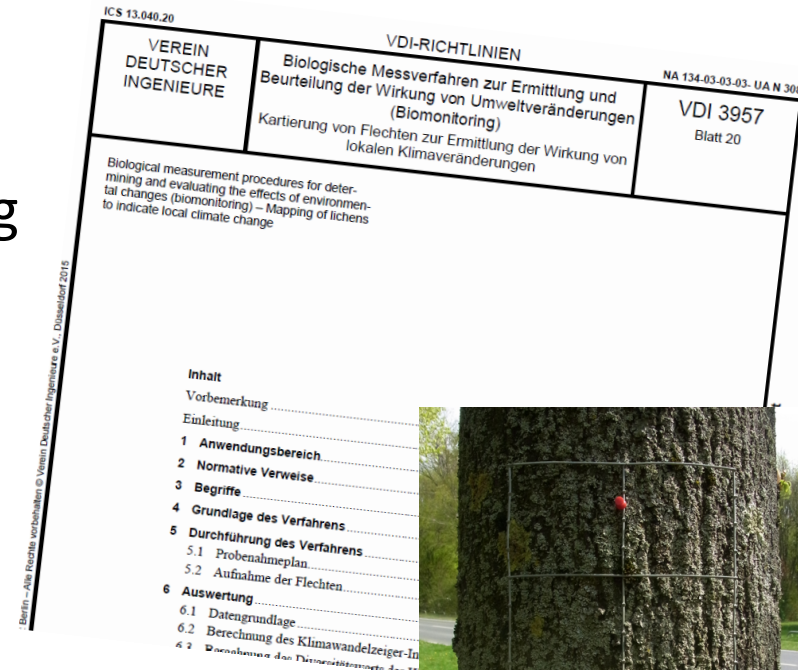
- zeitliche Entwicklung der Luftgüte

Richtlinie VDI 3957 Blatt 13

➤ Stadtklima-Biomonitoring mit Flechten

- Untersuchungen in drei bayerischen Städten zu Stadtklimawirkungen auf Flechten

Richtlinie VDI 3957 Blatt 22 (in Entwicklung)





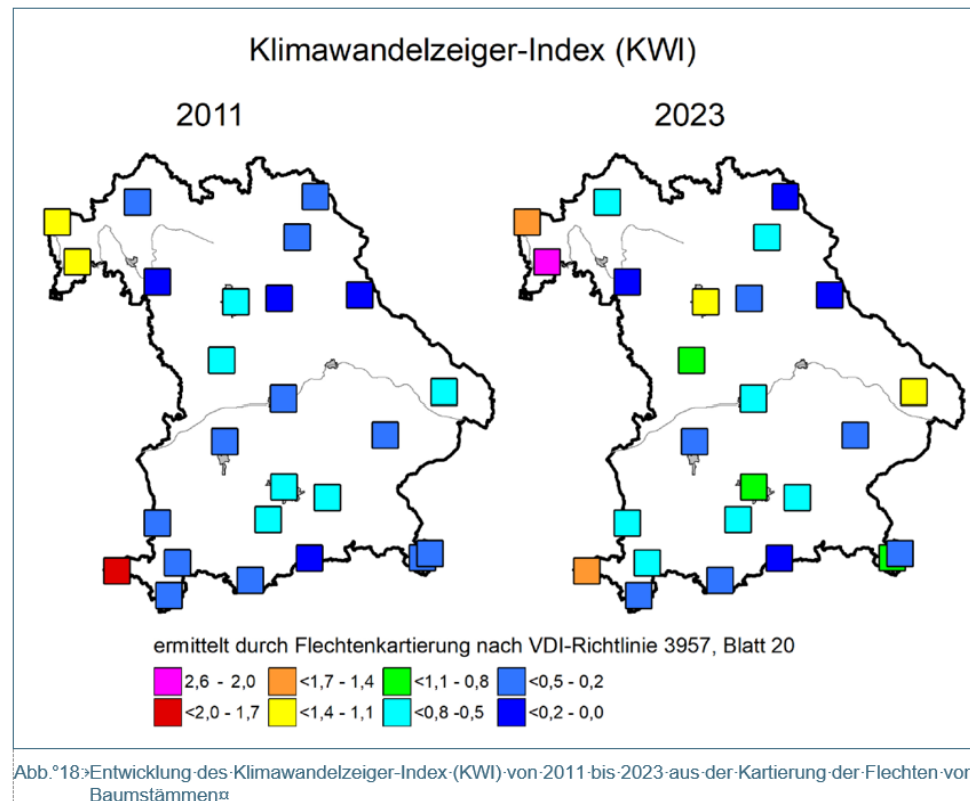
Ergebnisse

landesweites Flechten-Biomonitoring: Klimawandel-Wirkungen



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

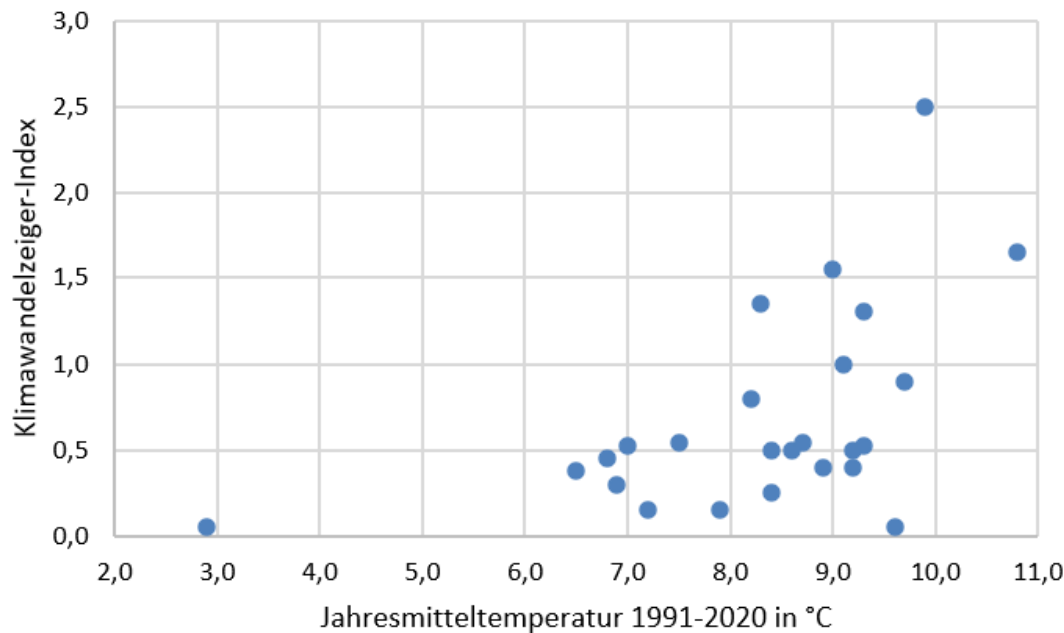
Anstieg des KWI im landesweiten
Mittel um 0,23 seit 2011





Ergebnisse

landesweites Flechten-Biomonitoring: **Klimawandel-Wirkungen**



Einflüsse:

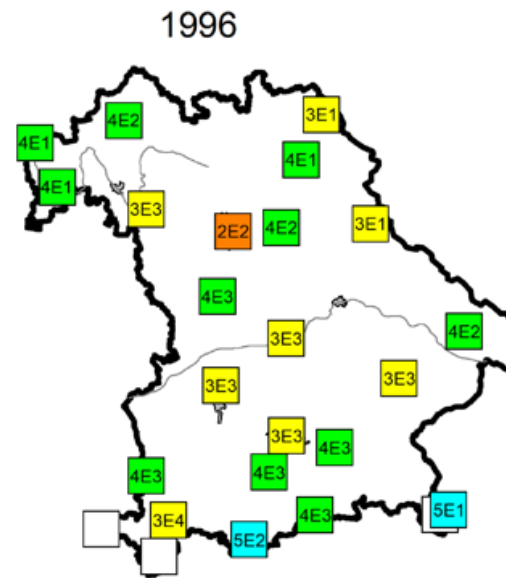
- Jahresmitteltemperaturen ($r = 0,52$)
- Jahreszeitliche Verteilung von Temperatur und Niederschlägen
- Ausbreitungspfade der Arten

Ergebnisse

landesweites Flechten-Biomonitoring:

Entwicklung der Luftgüte

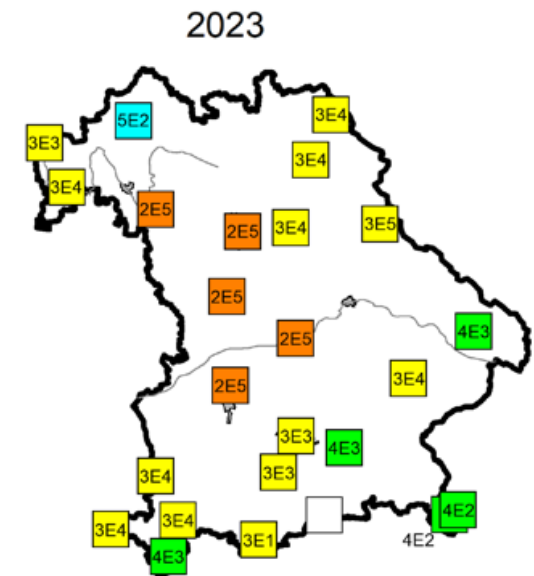
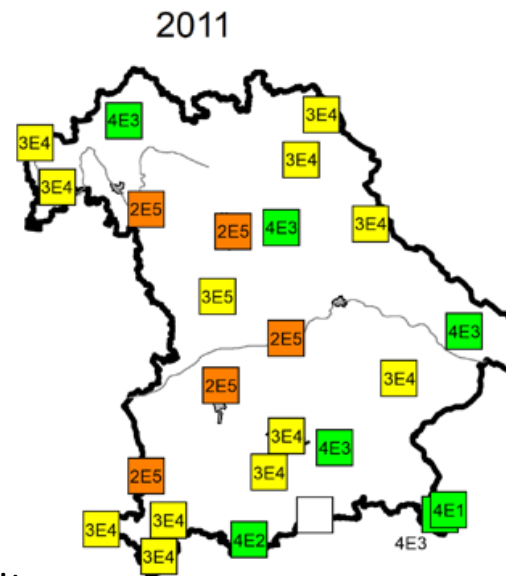
- von 1966 bis 2011 hat die Luftgüte nachgelassen
- Von 2011 bis 2023 keine wesentliche Änderung
- Eutrophierung mindert Flechtendiversität



Luftgüteindex (LGI)

ermittelt durch Flechtenkartierung nach VDI-Richtlinie 3957, Blatt 13 (2023)

Bewertung der Luftgüte	Einfluss eutrophierender Luftverunreinigungen	
5	sehr hohe Luftgüte	E5 sehr stark
4	hohe Luftgüte	E4 stark
3	mäßige Luftgüte	E3 mäßig
2	geringe Luftgüte	E2 gering
1	sehr geringe Luftgüte	E1 sehr gering
	keine Daten	



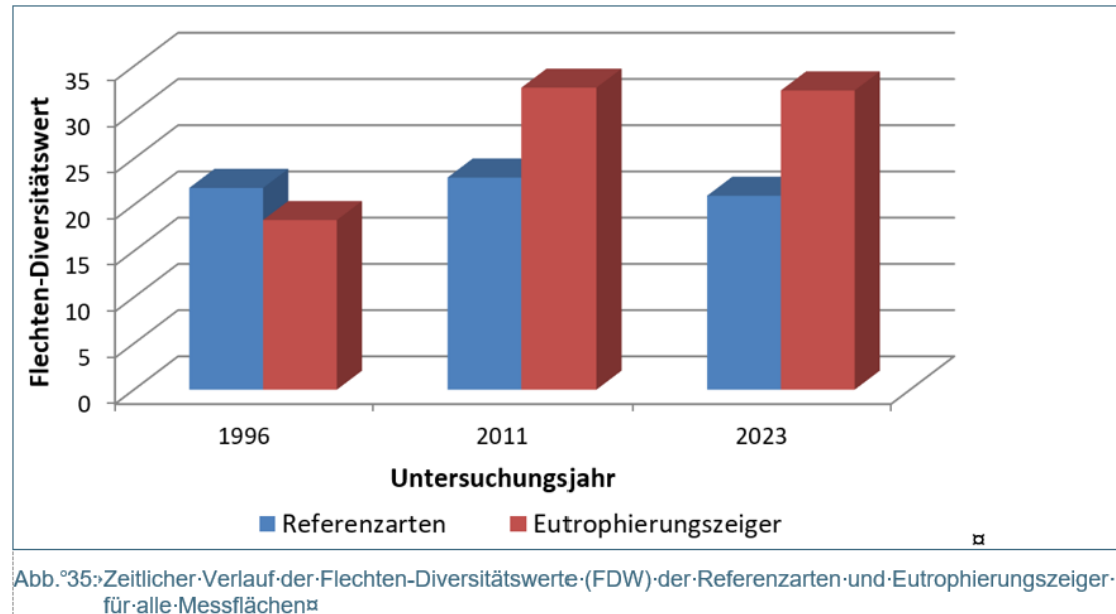


Ergebnisse

landesweites Flechten-
Biomonitoring:

Entwicklung der
Luftgüte

- von 1966 bis 2011 hat die Luftgüte nachgelassen
- Von 2011 bis 2023 keine wesentliche Änderung
- Eutrophierung mindert Flechtendiversität





Ergebnisse

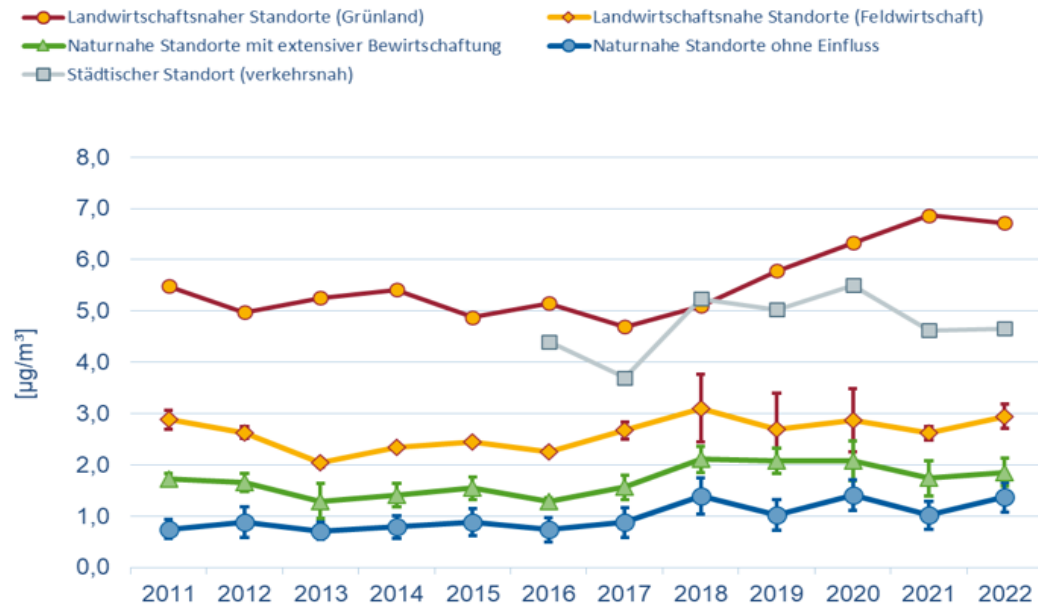
Entwicklung der Luftschadstoff- Konzentrationen

- Rückgang NO_2 und PM_{10}
- Leichter Anstieg von Ammoniak seit 2016

hohe Empfindlichkeit der Flechten für NH_3
Critical Level von $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$

weiträumig überschritten

Jahresmittel der NH_3 -Konzentrationen an naturnahen und landwirtschaftsnahen Standorten 2011 bis 2022, am städtischen Standort von 2016 bis 2022



Quelle: LfU 2025



finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



Bayerisches Landesamt für
Umwelt



Ergebnisse

landesweites Flechten-
Biomonitoring:

Naturschutzfachliche Daten („Beiprodukt“)

- 239 Taxa wurden erfasst
- davon auf Roter Liste der Flechten Bayerns (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019):
 - 15 Arten RL-Kat. 1 (vom Aussterben bedroht)
 - 15 Arten RL-Kat. 2 (stark gefährdet)



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



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

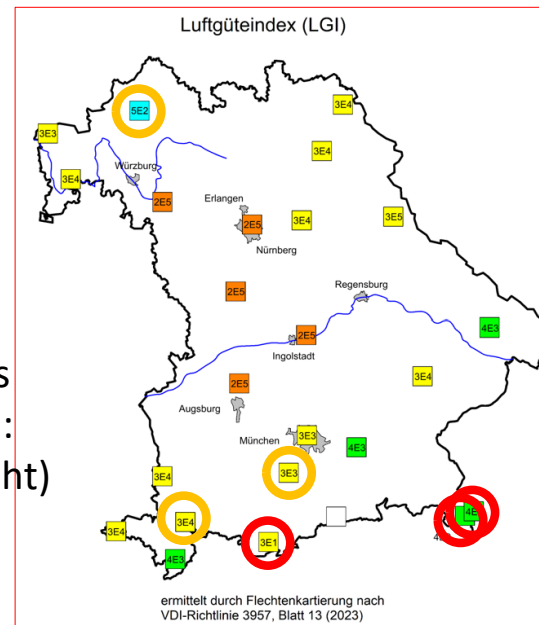


Abb. 10: *Anaptychia ciliaris* — in Bayern stark gefährdet

- 4 Arten in RL-Kat. 1+2
- 5-11 Arten in RL-Kat. 1+2



Wie reagieren Flechten auf typische Kennzeichen des Stadtklimas?



- Stark versiegelte Stadtzentren haben im Vergleich zum Umland
 - eine **niedrigere relative Luftfeuchte**, bedingt durch rascher abfließendes Wasser und höhere Lufttemperaturen
 - **geminderten Taufall**, bedingt durch höhere nächtliche Temperaturen
 - eine erhöhte Luftschadstoffkonzentration

- Die **verminderte Wasserverfügbarkeit** verkürzt die Zeit, in der die Flechten stoffwechselaktiv sind und Biomasse aufbauen können. Die meisten Flechtenarten können sich nicht entwickeln.
- Die wenigen relativ trockenheitstoleranten Arten haben an lufttrockeneren Wuchsorten Konkurrenzvorteile gegenüber der Mehrzahl der Feuchtebedürftigen.



Ergebnisse

Stadtklima-Biomonitoring

- Auswahl der Städte
Aschaffenburg, Nürnberg, München
- Identifikation von Indikatorarten
mit Projektdaten und Abstimmung
mit Daten anderer Städte (VDI-AG)
- Abgleich mit Daten aus
Klimaanalyse-Modell
- Handlungsempfehlungen

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



Ergebnisse

Stadtklima-Biomonitoring

- Auswahl der Städte
Aschaffenburg, Nürnberg, München
- Identifikation von Indikatorarten
mit Projektdaten und Abstimmung
mit Daten anderer Städte (VDI-AG)
- Abgleich mit Daten aus
Klimaanalyse-Modell
- Handlungsempfehlungen

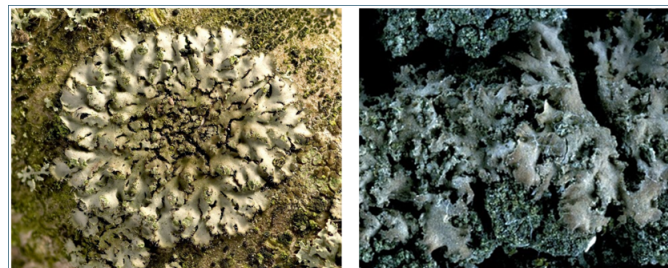


Abb. 20: Tolerant gegenüber städtischen Belastungsfaktoren: Urbanotolerante Blattflechtenarten *Phaeophyscia orbicularis* (links) und *Phaeophyscia nigricans* (rechts)

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



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

Ergebnisse

Stadtklima-Biomonitoring

- Auswahl der Städte
Aschaffenburg, Nürnberg, München
- Identifikation von Indikatorarten
mit Projektdaten und Abstimmung
mit Daten anderer Städte (VDI-AG)
- Abgleich mit Daten aus
Klimaanalyse-Modell
- Handlungsempfehlungen

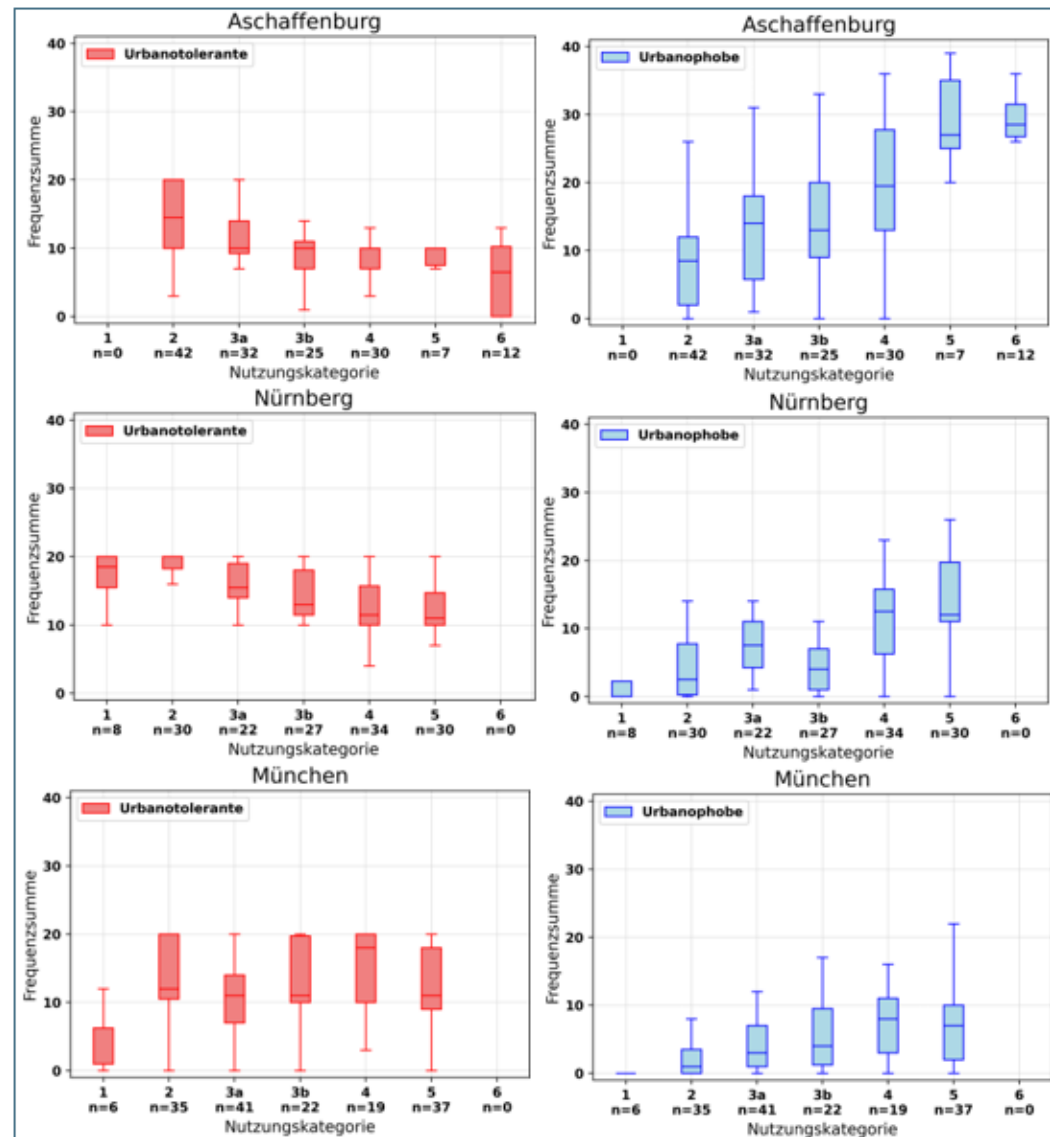


Abb. 24: Boxplots der Frequenzsummen pro Baum für die Urbanotoleranten (*Phaeophyscia orbicularis*, *Phaeophyscia nigricans*), sowie für urbanophoben Arten, geordnet nach Nutzungskategorien; (Kat. 1: geschlossene Bebauung, zentrumsnah; 2: Rand einer stark befahrenen Straße und hohe Versiegelung; 3a: Rand einerverkehrsberuhigten 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)



Ergebnisse

Stadtklima-Biomonitoring

Abgleich mit Daten aus
Klimaanalyse-Modell
FITNAH-3D

Karte
Aschaffenburg

Hintergrund: modellierte
04:00 Uhr-Temperaturen
in 2 m über Grund

Darstellung:
Urbanotoleranz der
zuvor identifizierten
Flechtenarten

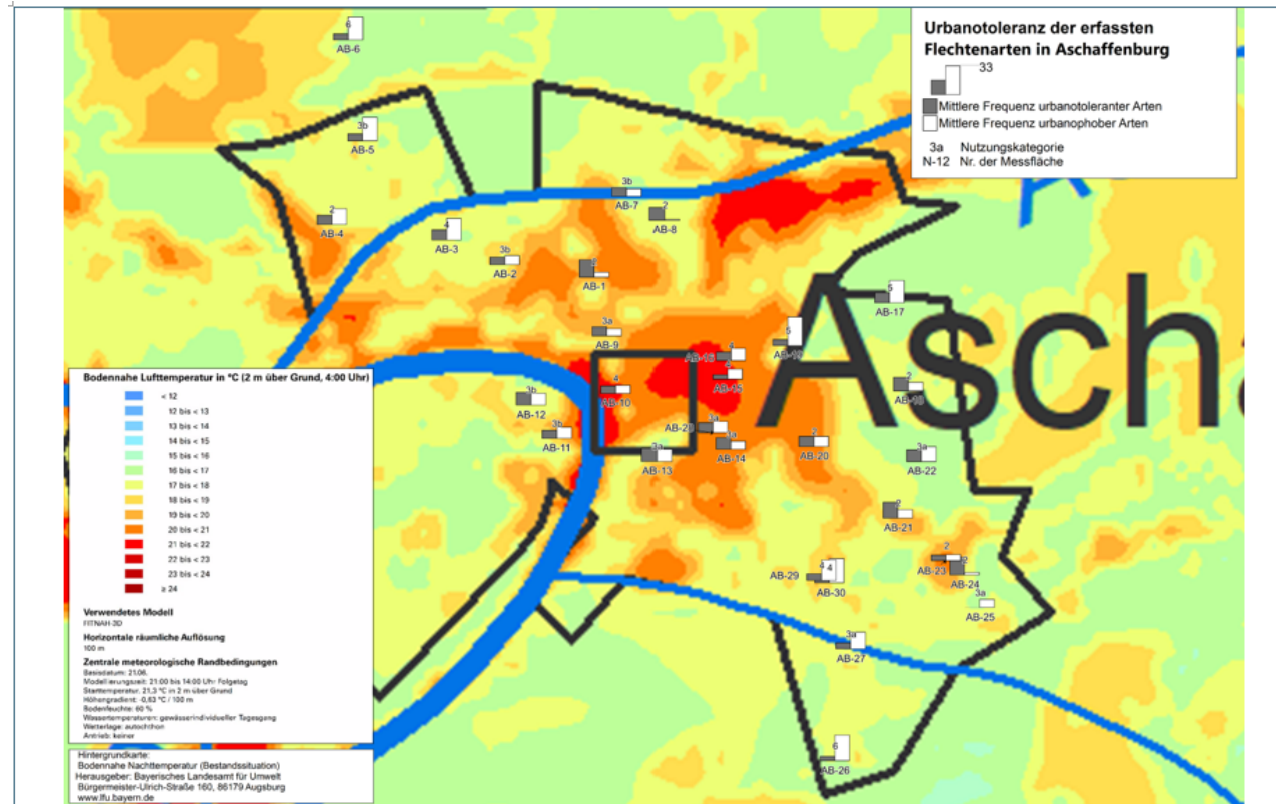


Abb. 28: Aschaffenburg - Mittlere Frequenzen der urbanotoleranten und der urbanophoben Arten vor dem Hintergrund der bodennahen 04:00-Uhr-Temperaturen



Ergebnisse

Stadtklima-Biomonitoring

Ableich mit Daten aus
Klimaanalyse-Modell
FITNAH-3D

Karte

Aschaffenburg

Hintergrund: modellierte
04:00 Uhr-Temperaturen in
2 m über Grund

Darstellung (Detail):
Urbanotoleranz der zuvor
identifizierten
Flechtenarten

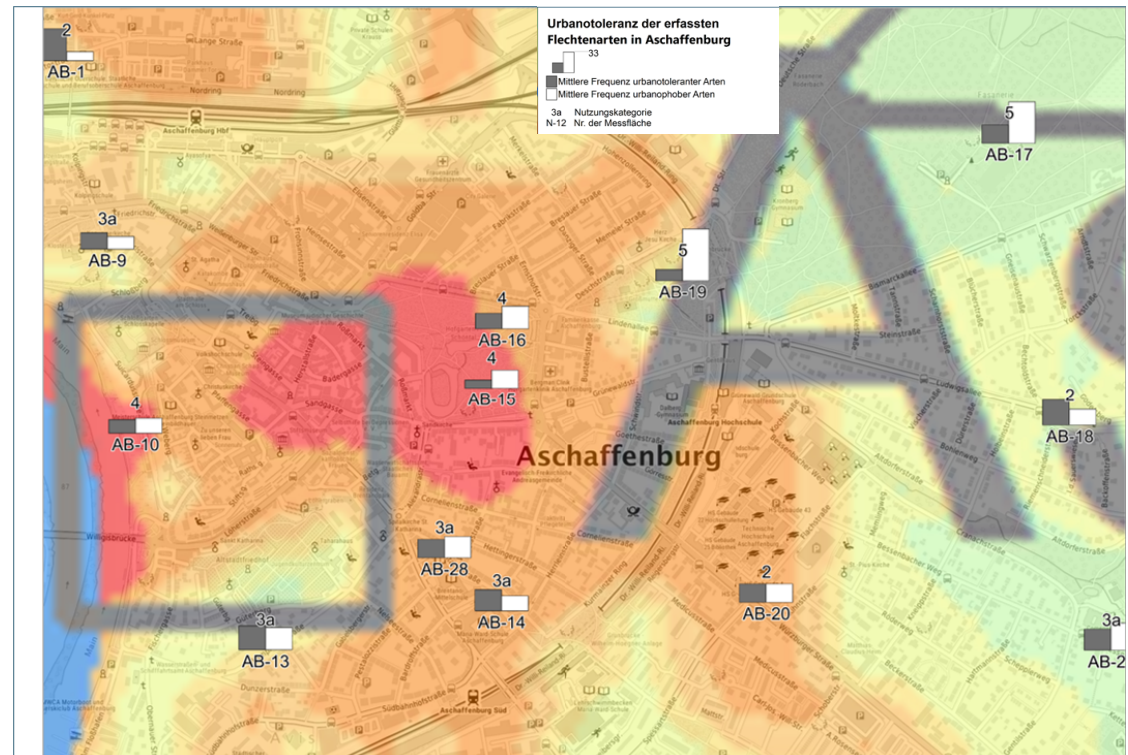


Abb. 29: Aschaffenburg – Ausschnitt aus Abb. 13 (Hintergrundkarte: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2024)

Ergebnisse

Stadtklima-Biomonitoring

Nürnberg

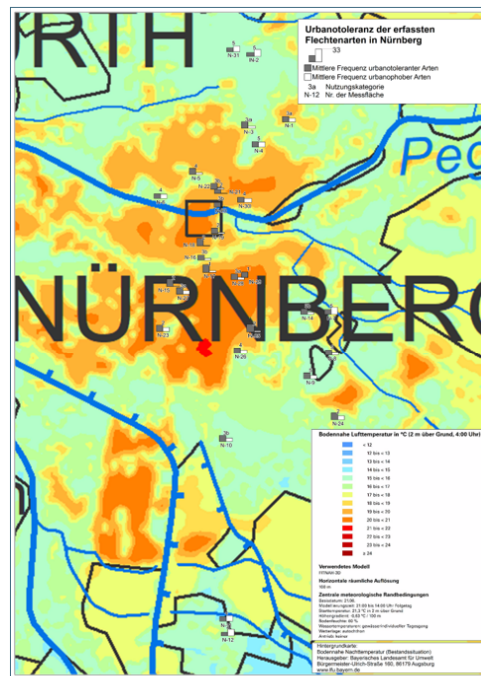


Abb. 30: Nürnberg - Mittlere Frequenzen der urbanotoleranten und der urbanophoben Arten vor dem Hintergrund der bodennahen 04:00-Uhr-Temperaturen

München

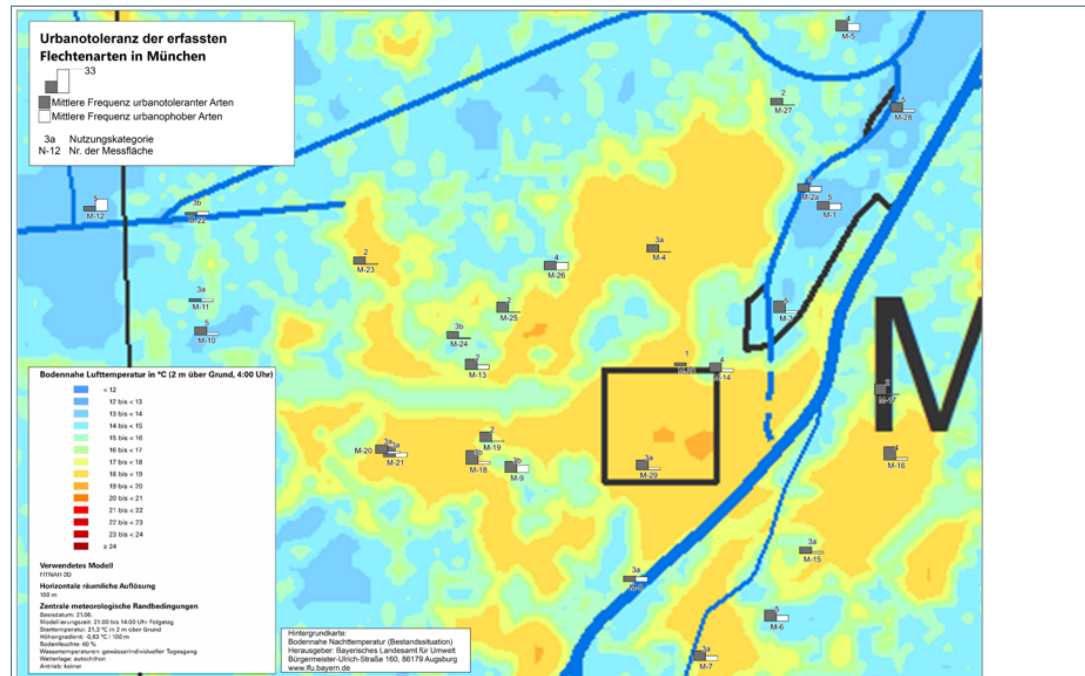


Abb. 31: München - Mittlere Frequenzen der urbanotoleranten und der urbanophoben Arten vor dem Hintergrund der bodennahen 04:00-Uhr-Temperaturen



Ergebnisse

Stadtklima-Biomonitoring - Zusammenfassung

- Flechtendaten für Aschaffenburg, Nürnberg von 459 Trägerbäumen, verteilt auf 30 Messflächen pro Stadt
- zwei Gruppen von Indikatorarten wurden identifiziert: Urbanophobe, Urbanotolerante
- Diversitätswerte der Indikatoren vor allem in Aschaffenburg und Nürnberg mit Nutzungsstärke und modellierten 04:00-Uhr-Temperaturen in Zusammenhang
- weitere Faktoren zur Erklärung der Daten zu erforschen



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



Ergebnisse

Stadtklima-Biomonitoring - Handlungsempfehlungen

Die meisten Flechtenarten meiden die flächenversiegelten, überwärmten Stadtzentren. Daraus lassen sich allgemeine Handlungsempfehlungen ableiten:

- Maßnahmen zur Absenkung der Lufttemperatur: Rückhalt von Wasser in der Stadt („Schwammstadt“), etwa durch unversiegelte Grünflächen, umsetzen
- Verringerung der Konzentration von Luftschadstoffen
- stadtplanerische Maßnahmen zur verbesserten Durchlüftung der Innenstädte ergreifen
- besonders belastete, kritische Stadtgebiete durch ein Monitoring überwachen



finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



Bayerisches Landesamt für
Umwelt



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Die Präsentation ist ein Auszug:

Windisch, U., Eichler, M., Cezanne, R. 2024: Klimabiomonitoring mit Flechten in Bayern.

Landesweite Bewertung der lokalen Wirkungen des Klimawandels und der
lufthygienischen Situation sowie Stadtklima-Biomonitoring. UmweltSpezial.

Hrsg.: Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg.





Quellen

- VDI 3957 Blatt 13 (2023): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation). Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für Luftgüte. Berlin: Beuth-Verlag.
- VDI 3957 Blatt 20 (2017): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Umweltveränderungen (Bioindikation). Kartierung von Flechten zur Ermittlung der Wirkung von lokalen Klimaveränderungen. Berlin: Beuth-Verlag.
- VDI 3957 Blatt 22 (in Entwicklung): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Umweltveränderungen (Bioindikation). Kartierung von Epiphyten zur Erfassung der Wirkungen von Stadtklima. Berlin: Beuth-Verlag.
- Windisch, U., Vorbeck, A., Eichler, M., Cezanne, R. (2012): 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. verfügbar unter https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_all_00098.htm
- Windisch, U., Pungin, A., Tresp, H. (2018): Wirkungsermittlung von Stadtklimaeffekten 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. verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/klimprax/2018-10-30_Stadtklima-Biomonitoring_WiesMainz.pdf



Anwendungsbereich des Flechten-Stadtklimamonitorings (Diskussionsstand VDI-Arbeitsgruppe vom 18.3.2023)

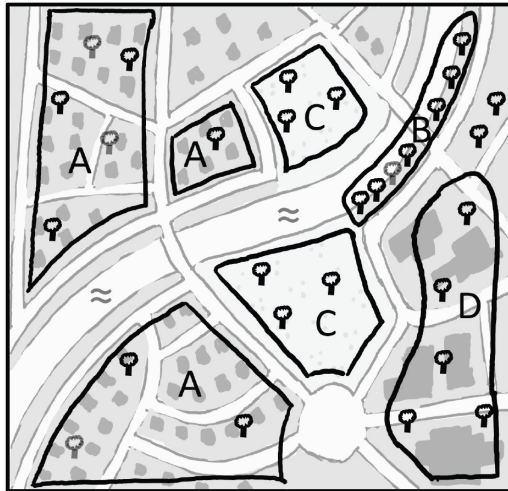
- Nachweis und Dokumentation städtischer Einflussfaktoren auf die belebte Umwelt in Städten; damit inhaltliche Ergänzung zu Stadtklimaanalysen, da mit der Epiphytenkartierung Wirkungen auf Organismen direkt belegt werden
- Kontrolle der Effektivität von städteplanerischen Maßnahmen gegen städtische Überwärmung (z. B. Kaltluftschneisen, Grünanlagen, Dachbegrünungen, etc.)
- Aussage über längere Zeiträume, da die mehrjährigen Epiphyten die Effekte des städtischen Mikroklimas über mehrere Monate und auch über Jahreszeiten hinweg integrieren
- Möglichkeit zur kleinräumigen Differenzierung stadtklimatischer Effekte
- Stärkung stadtklimatischer Belange in kommunalen Planungsprozessen und Abwägungsentscheidungen

Folgende Folien ggf. für Nachfragen....



Vorarbeiten zur Flechtenkartierung im städtischen Gebiet

Schritt 1: Vor-Ort-Identifizierung
von Trägerbaum-Gruppen auf
homogenen Geländeabschnitten



Schritt 2: Zuordnung der Baumgruppen
zu Nutzungskategorien

- 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 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 %)

Schritt 3: Festlegung der Messflächen
und Kartierung der Flechten am
Mittelstamm der Bäume

Pro Kategorie ergeben sich, abhängig von der Verfügbarkeit im Gelände,
3-7 homogene Geländeabschnitte (Messflächen).



Kriterien für die Auswahl drei bayerischer Städte

- größere Stadt: Fläche > 50 qkm und Einwohnerzahl >70.000 EW
- Stadtklimagutachten verfügbar, sowie Daten aus vorangegangenen standardisierten Flechtenkartierungen vorhanden
- aktuell an 30 Messflächen jeweils 4-6 geeignete Flechten-Trägerbäume vorhanden

Ranking	Stadt	Fläche in qkm ^{*1}	Einwohner- zahl vom 31.12.2020 ^{*1}	Flechten- kartierung , letzte	Flechten-Luftgütezone, letzte Kartierung	Anzahl Messflächen, letzte Kartierung	Träger- bäume verfügbar
1	München	310,70	1.488.202	2000 ^{*2}	rot (Stadtzentrum) bis blau (Westen, Nordosten)	91	✓
2	Nürnberg	186,44	515.543	1998 ^{*3}	rot (Altstadt, Bahnhof, etc.) bis gelb (Süden)	44	✓
3	Aschaffenburg	62,45	70.858	2015/2016 ^{*4}	orange (Innenstadt) bis blau (Süden und Südosten)	44	✓

^{*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)