

Flechten als Bioindikatoren für Umweltbelastungen

FACHBERATUNG UMWELTWIRKUNGEN
Dr. Harald Bartholmeß Schachtelhalmweg 48 70599 Stuttgart

Tel.: 0711/4567285 Fax: 0711/4567286

Mobil: 0172/4633677

Mail: 1086-706@online.de

Internet: www.umweltwirkungen.de

Kartierung der Flechtenvegetation nach VDI 3957, Blatt 13 (Dez. 2005)

1 Grundlagen des Verfahrens

Flechten als Indikatoren der Luftgüte

Die epiphytische Flechtenvegetation wird seit vielen Jahren in der praktischen Luftreinhaltung im Rahmen von Umweltverträglichkeitsuntersuchungen, Immissions-Wirkungskatastern oder in der Regional-/Stadtplanung, erfolgreich zur Ermittlung und Abgrenzung von belasteten Gebieten sowie zur langfristigen Dokumentation von Veränderungen in der Umweltbelastung eingesetzt [1, 2, 3]. Flechten eignen sich für diesen Zweck besonders gut, weil sie trotz ihrer enormen Widerstandsfähigkeit gegenüber natürlichen Umwelteinflüssen äußerst empfindlich auf die durch den Menschen verursachten Veränderungen ihres Lebensraumes reagieren. Sie werden sowohl von wirkungsrelevanten Schadstoffen in der Luft als auch von den am Standort herrschenden ökologischen Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit usw.) beeinflusst. Gegenüber chemisch-physikalischen Messmethoden, bei denen die Konzentration eines Schadstoffes in einem bestimmten Zeitraum ermittelt wird, zeigen sie die durch Luftschadstoffe hervorgerufenen langfristigen pflanzenschädigenden Gesamtwirkungen am untersuchten Standort an.

Auf chronische, leichte Einwirkungen von Luftschadstoffen reagieren die Flechten zunächst mit unsichtbaren Schädigungen, z.B. Stoffwechselveränderungen. Die Folge ist eine verminderte Vitalität und Konkurrenzkraft, wobei die einzelnen Flechtenarten unterschiedlich stark reagieren. Empfindliche Arten werden dadurch allmählich aus Flechtengemeinschaften verdrängt. Bei höheren Immissionsbelastungen treten dann aber auch schnell sichtbare Schädigungen auf, die bis zum Absterben führen können.

Die Kartierung der an Bäumen vorkommenden Flechten gibt rasch und mit relativ geringem Aufwand einen Überblick über die lufthygienische Situation des untersuchten Gebietes. Zur Erfassung der natürlichen und anthropogenen Veränderungen der Umweltbedingungen mit Hilfe der Flechten benötigt man aber standardisierte Methoden, mit denen sich über einen längeren Zeitraum vergleichbare Datenreihen erheben lassen.

Ein hierfür geeignetes Verfahren stellt die in VDI-Richtlinie 3957, Blatt 13 (Entwurf Mai 2004) [4], beschriebene "Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für die Luftgüte" dar. Sie ist die auf die Verhältnisse von Mitteleuropa abgestimmte Flechtenkartierungsmethode, die auf dem Vorschlag für eine europaweit einheitliche Methode basiert [5]. Eine ebenfalls auf diesem Vorschlag aufbauende Richtlinie existiert auch in Italien [6].

Zur Erfassung von Veränderungen des Bestandes an Flechten bzw. des Ausmaßes der Luftverschmutzung wird im „Leitfaden – Indikatoren im Rahmen einer LOKALEN AGENDA 21“ [7] ebenfalls auf die Kartierungsmethode nach VDI-Richtlinie, verwiesen. Im folgenden sollen deshalb die wichtigsten Schritte dieser Methode beschrieben werden.

Grundlage des Verfahrens

Diese Richtlinie beschreibt die standardisierte Vorgehensweise für die Durchführung und Auswertung einer Flechtenkartierung. Die Richtlinie baut auf der Tatsache auf, dass die Vielfalt epiphytischer Flechten durch Luftschadstoffe beeinflusst wird. Das Ausmaß der Umweltbelastung in einem Untersuchungsraum wird hierbei anhand der Vielfalt epiphytischer Flechten, ausgedrückt durch die Anzahl der Arten und ihre Häufigkeit (Frequenz) in einer definierten Kartierungsfläche bzw. durch einen hieraus zu errechnenden Diversitätswert, ermittelt.

Bei früher eingesetzten Verfahren, bei denen z.B. der Deckungsgrad oder die Vitalität von Flechten geschätzt wurde, ließen sich die Kartierungsdaten mehrerer Flechtenkartierer aufgrund ihrer individuellen Einschätzungen nicht zusammenfassen oder vergleichen. Im Gegensatz dazu stellt die Ermittlung der Häufigkeit eine einfache und objektive Art der Datenerhebung dar. Es ist also möglich, eine Kartierung auch von mehreren Personen durchführen zu lassen, vergleichbare Artenkenntnisse vorausgesetzt, oder verschiedene Kartierungen miteinander zu vergleichen. Diese Methode zeichnet sich somit durch ein hohes Maß an Objektivität, Reproduzierbarkeit und Praktikabilität aus.

Das Prinzip dieser Methode beruht auf der Annahme, dass eine hohe Artenvielfalt im Allgemeinen auf günstige Bedingungen für das Überleben vieler Arten (einschließlich des Menschen) schließen lässt und daher anstrebenswert ist. Es ist jedoch auch denkbar, dass bestimmte spezialisierte Arten durch die intensive Wirkung eines abiotischen Faktors (z.B. Stickstoffverbindungen oder andere Immissionen mit eutrophierender Wirkung) gefördert werden. In diesem Fall muss die alleinige Zunahme dieser speziellen Arten negativ bewertet werden, weil ihre Auslöser Störungen in den Ökosystemen nach sich ziehen (z.B. Eutrophierung). Die Flechtendiversität wird hier also als Indikator für die Belastung der Luft durch Luftverunreinigungen sowohl saurer als auch eutrophierender Art verwendet.

Ersetzung der VDI-Richtlinie 3799, Blatt 1 (1995)

Diese Richtlinie ersetzt die Kartierungsrichtlinie von 1995 ([8]). Die wesentlichen Gründe für die Aktualisierung werden im Folgenden dargestellt (siehe hierzu auch z.B. [9] bis [13]).

Im Verlauf der letzten Jahrzehnte haben sich Art und Konzentration der Luftverunreinigungen gewandelt, was sich auch in einer Veränderung des Arteninventars bei den epiphytischen Flechten niedergeschlagen hat. In der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts (ca. 1970) erreichte die SO₂-Belastung in Mitteleuropa ihren Höhepunkt. Unter diesen Bedingungen gab es auf Bäumen mit von Natur aus sauren Rinden nur sehr wenige säureertragende Arten (Acidophyten) und keine Arten, die auf neutralen Substraten vorkommen (Neutrophyten) und ebenfalls kaum düngungstolerante Arten (Eutrophierungszeiger): Der pH-Wert der Rinden war infolge der sauren Schadgase deutlich unter die vorindustriellen Werte abgefallen und war damit selbst für die meisten Acidophyten und für alle Neutrophyten nicht mehr tolerierbar; die Eutrophierungszeiger litten unter dem gleichen Phänomen und wurden – wie alle übrigen – auch durch die Toxizität des SO₂ zurückgedrängt. Daher war es zu diesem Zeitpunkt nicht sinnvoll, Flechtenkartierungen auf diesen Bäumen vorzunehmen, weil die geringe Artenzahl keine Differenzierung der Immissionsbelastung zuließ.

Auf natürlicherweise neutralen bis subneutralen Rinden kamen dagegen vergleichsweise viele Acidophyten vor, weil der pH-Wert infolge einer immissionsbedingter Rindenversauerung so weit abgesunken war, dass er den Ansprüchen einiger säuretoleranter Arten entsprach. Die Neutrophyten und die Eutrophierungszeiger waren zwar bis auf wenige Arten verdrängt, zusammen kamen aber um 1970 auf neutralen Substraten mehr Arten vor als auf sauren Rinden. Unter diesen Gegebenheiten war es geboten, auf Spitzahorn, Apfelbäumen, Pappeln oder Walnuss-Bäumen zu kartieren, weil hier eine Differenzierung der Belastung noch möglich war.

In Mitteleuropa ging ab den 80iger Jahren des letzten Jahrhunderts die Konzentration der sauren Schadgase in der Luft und folglich an den Baumborken zurück, gleichzeitig verstärkten sich die Auswirkungen luftgetragener Nährstoffverbindungen (vgl. Abb. 1). Demzufolge kam es auf „sauren“ Bäumen zu einer deutlichen Zunahme der Neutrophyten und der Eutrophierungszeiger, weil einerseits der Rinden-pH-Wert wegen nachlassender Säureeinwirkung anstieg, manche N-Verbindungen diesen Prozess noch beschleunigten, indem ihre Anwesenheit den pH-Wert erhöhte (z.B. NH_3) und auch die Düngewirkung diese Flechtengruppe begünstigte. Die Acidophyten zeigten wegen der Erhöhung der Rinden-pH-Werte zunächst ebenfalls schwache Erholungstendenzen. Dieser Prozess kam aber bereits kurz darauf ins Stocken, weil die Acidophyten einerseits z.T. Stickstoff-intolerant sind, andererseits aber auch der Konkurrenz der Neutrophyten und der Eutrophierungszeiger erlagen.

Auf natürlicherweise neutralen Rinden wurden die Eutrophierungszeiger nach Abnahme der Versauerung und der gleichzeitigen Zunahme der Auswirkungen von eutrophierenden Immissionen gegen Ende des letzten Jahrhunderts überproportional gefördert. Für die Acidophyten hat dagegen die Erhöhung der pH-Werte Substratbedingungen geschaffen, die sie nur schlecht ertragen können. Zusätzlich tolerieren sie die Einwirkungen des Stickstoffs und anderer Immissionen mit düngender Wirkung schlecht und sind dadurch gegenüber den Eutrophierungszeigern weniger konkurrenzkräftig. Aus diesen Gründen ist seit Ende des letzten Jahrhunderts eine kontinuierliche Abnahme festzustellen.

Da in Deutschland Mitte/Ende des letzten Jahrhunderts überwiegend Kartierungsverfahren eingesetzt wurden, die Artenzahl und Artenhäufigkeit (Frequenz) zur Ermittlung von Luftgütwerten benutzten – so auch die VDI-Richtlinie 3799, Blatt 1 – und aus den oben genannten Gründen der Flechtenbewuchs fast ausschließlich auf Bäumen mit natürlicherweise neutralen Rinden untersucht wurde, ergab sich folgende Entwicklung:

- Als um 1970 die ersten Kartierungen erfolgten, waren die Luftgütwerte relativ niedrig; die Flechtenvegetation bestand aus Acidophyten und wenigen Eutrophierungszeigern.
- Bedingt durch die Erfolge der Luftreinhaltung in den 80er Jahren nahmen nun zwar die Acidophyten bereits leicht ab; die Flechtenwerte stiegen dennoch wegen der überproportionalen Zunahme der Neutrophyten und der Eutrophierungszeiger.
- Seit Beginn der 90er Jahre spielen die Acidophyten mengenmäßig eine immer untergeordnete Rolle, der Zuwachs (und damit der Anstieg der Luftgütwerte) geht also überwiegend auf das Konto der Neutrophyten und Eutrophierungszeiger. Während die Zu-

nahme der Neutrophyten auf bessere lufthygienische Bedingungen hinweist und damit erwünscht ist, weist die Zunahme der Eutrophierungszeiger auf eine unerwünschte Erhöhung der Konzentrationen von eutrophierend wirkenden Immissionen hin.

In dieser Situation erweist sich folglich die Berechnung eines Indexes, der – wie in VDI-Richtlinie 3799, 1 – auf der Aufsummierung aller Flechtenarten beruht, u. U. als nicht mehr zielführend für die Beurteilung der Immissionsbelastung, weil hohe Diversitätswerte nicht automatisch mit einer verringerten Immissionsbelastung einhergehen. Vielmehr ist es sinnvoll, den Anteil der Eutrophierungszeiger an der Erhöhung der Flechtendiversität zu erfassen und bei der Bewertung der lufthygienischen Situation negativ zu belegen. Die Vorgehensweise nach VDI 3957, Blatt 13, stellt eine Weiterentwicklung des in den Niederlanden seit längerem eingesetzten Verfahrens der Berechnung eines Nitro- bzw. eines Acido-Indexes dar ([10] bis [12]) und geht mit diesem Ansatz auch über den Vorschlag für eine europäische Flechtenkartierungsrichtlinie ([5]) hinaus.

2 Messnetz

Die Größe der Messflächen hängt von der Größe des Messnetzes ab und folglich vom geografischen Maßstab der Kartierung. Messflächen von 0,25 km × 0,25 km werden bei kleinräumigen Untersuchungen verwendet oder dort, wo es einen starken Immissionsgradienten gibt. Die üblicherweise verwendete Messfläche von 1 km x 1 km kann flächendeckend oder innerhalb eines größeren Messnetzes, z.B. 16 km x 16 km, platziert werden.

Nimmt man alternativ zu der in der Praxis am häufigsten gewählten Rastergröße von 1 km x 1 km kleinere Quadrate mit 250 m bzw. 500 m Seitenlänge, sind dann jedoch nach VDI-Richtlinie 3957, Blatt 13, deutlich mehr Bäume zur Kartierung erforderlich. Diese geforderte Anzahl an vergleichbaren Bäumen ist vor allem in Stadtgebieten aber häufig nicht vorhanden. Bei einer Kartierung mit einem dichteren Rastermessnetz ergibt sich außerdem nicht automatisch eine feinere Differenzierung der Luftgüte. Dies hängt dann von der Topographie, von mikroklimatischen Einflüssen und anderen örtlichen Gegebenheiten in Verbindung mit den bestehenden Immissionsverhältnissen ab.

Je nach Fragestellung ist anstelle der flächenbezogenen Kartierung auch eine punktbezogene Vorgehensweise möglich, z.B. hinsichtlich der im Untersuchungsraum bestehenden Flächennutzung (Wohn-/Industriegebiete, landwirtschaftliche Nutzflächen, Hauptverkehrsstraßen usw.). Auch in diesem Fall werden pro Messpunkt 6 bis 12 Bäume ausgewählt.

3 Auswahl der Baumarten für die Kartierung

Da der Flechtenbewuchs an Bäumen auch stark von den Borkeneigenschaften, dem Alter und der Wuchsform der Bäume beeinflusst wird (siehe z.B. [14] bis [16]), sollten innerhalb eines Untersuchungsraumes nur Bäume einer Art ausgewählt werden. Ist dies nicht möglich, so dürfen nur solche Baumarten, die vergleichbare Borkeneigenschaften (z.B. pH-Wert, Wasserhaltefähigkeit, Nährstoffgehalt) aufweisen, möglichst gleichmäßig gemischt zusammen kartiert werden. Untersuchungsergebnisse von sehr verschiedenen Baumarten sind nicht vergleichbar.

Die Baumarten werden ausgewählt, nachdem man sich zunächst einen Überblick über das zu kartierende Gebiet verschafft hat, um sich über die Anzahl und Verteilung geeigneter Bäume zu vergewissern.

Baumarten, die jeweils gemeinsam untersucht werden können, sind in der VDI-Richtlinie in einer Liste zusammengefasst (s. Tab. 1).

Als weitere Kriterien für die Auswahl der Bäume sind zu berücksichtigen:

- Die in der Tabelle angegebenen Mindest- bzw. Maximaldurchmesser sollten weder unter- noch überschritten werden.
- Es sind frei stehende Bäume auszuwählen, d.h. die Stämme dieser Bäume sollten zumindest während eines Teils des Tages direkte Sonneneinstrahlung empfangen.
- Bäume, deren Stamm durch herunterhängende Äste beschattet wird, sollten nicht für die Kartierung ausgewählt werden.
- Die Neigung eines Baumes darf 10° Abweichung vom Lot nicht übersteigen.
- Beschädigte Bäume sowie offensichtlich durch Kalken, Abkratzen der Borke Scheuern durch Tiere beeinflusste Bäume dürfen nicht zur Kartierung herangezogen werden.

Tab. 1: Baumarten mit ähnlichen physikalisch-chemischen Eigenschaften, die untereinander austauschbar sind (Baumumfang in 1,5 m Höhe)
(Quelle: nach [4], verändert)

Baumarten-Gruppe 1	Baumarten-Gruppe 2
unter natürlichen Verhältnissen ± subneutrale Baumrinde	unter natürlichen Verhältnissen ± saure Baumrinde
Acer platanoides (Spitzahorn) (70 bis 280 cm)	Alnus glutinosa (Schwarzerle) (70 bis 280 cm)
Fraxinus excelsior (Gemeine Esche) (70 bis 280 cm)	Betula pendula (Birke) (70 bis 280 cm)
Ulmus spec. (Ulme) (70 bis 280 cm)	Prunus avium (Vogelkirsche) (70 bis 280 cm)
Juglans regia (Walnuß) (70 bis 280 cm)	Prunus domestica (Pflaume) (70 bis 160 cm)
Fraxinus ornus (Manna-Esche) (70 bis 280 cm)	Quercus robur (Stieleiche) (70 bis 280 cm)
Populus x canadensis agg. (Pappel) (70 bis 280 cm)	Quercus petraea (Traubeneiche) (70 bis 280 cm)
Acer pseudoplatanus (Bergahorn) (70 bis 280 cm)	Pyrus communis (Birne) (70 bis 280 cm)
Malus domestica (Apfel) (70 bis 160 cm)	Tilia cordata (Winterlinde) (70 bis 280 cm)
Pyrus communis (Birne) (70 bis 280 cm)	Tilia platyphyllos (Sommerlinde) (70 bis 280 cm)
Tilia cordata (Winterlinde) (70 bis 280 cm)	
Tilia platyphyllos (Sommerlinde) (70 bis 280 cm)	

Innerhalb der Gruppen sind die oben stehenden Baumarten am besten für Kartierungszwecke geeignet. Die Tilia-Arten und Pyrus communis sind in beiden Gruppen verwendbar, weil sie eine Mittelstellung bezüglich ihrer Rindeneigenschaften einnehmen.

Sollten auf einer Messfläche mehr bzw. nicht genügend geeignete Bäume stehen als für die Untersuchung vorgeschrieben ist, so gibt die VDI-Richtlinie für die weitere Verfahrensweise Hinweise.

4 Aufnahme der Flechten am Baumstamm

Vor der eigentlichen Flechtenaufnahme wird jeder Baumstandort auf dem Erfassungsbogen beschrieben, eine Vorlage ist in VDI 3957, Blatt 13, im Anhang enthalten. Darüber hinaus ist es ratsam, die Lage des Baumes in einer kleinen Skizze oder per Bild festgehalten. Diese Angaben dienen dazu, den Baum gegebenenfalls bei einer Wiederholungskartierung erneut aufsuchen und das Aufnahmegitter an der selben Stelle am Stamm anbringen zu können.

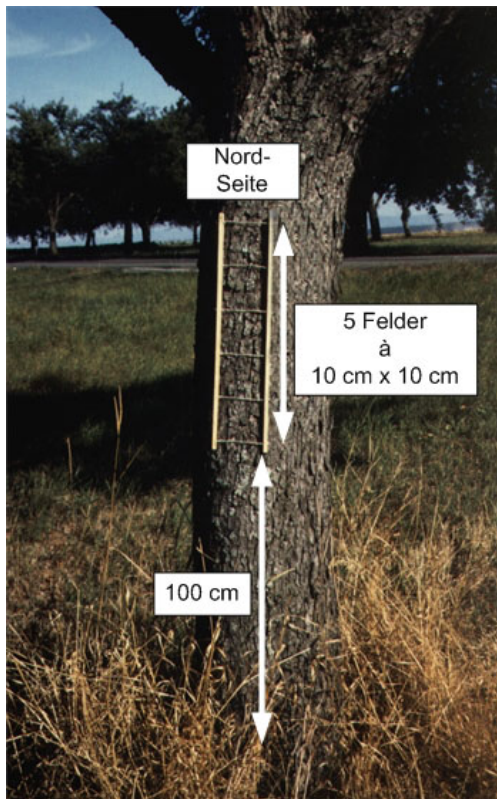


Abb. 1: Flechtenaufnahmegitter

Die Erfassung der Flechtenvegetation erfolgt an den ausgewählten Bäumen jeweils an der Nord-, Ost-, Süd- und West-Seite des Stammes in gleicher Höhe in einem Bereich von 1,00 bis 2,00 m bzw. unterhalb der ersten Verzweigung mit Hilfe eines Aufnahmegitters („Flechtenleiter“). Dieses Aufnahmegitter besteht aus 4 unabhängigen Gitterstreifen mit je 5 10 cm x 10 cm großen Feldern.

Ein Gitterstreifen kann bis 20° maximal im Uhrzeigersinn verschoben werden, um Stellen am Stamm zu vermeiden, die für eine Aufnahme ungeeignet sind, z.B. Wunden, Astknoten usw.

Mindestens 3 Gitterstreifen müssen an einem gegebenen Stamm angebracht werden können. Falls dies nicht möglich ist, muss ein anderer Baum ausgewählt werden.

Beim Anbringen der Gitterstreifen gelten folgende Situationen, selbst bei dichter Flechtenbesiedelung, als Ausschlusskriterien:

- beschädigte oder entrindete Teile
- Astknoten
- Wasserablaufrienen
- Teile mit Bryophytenbedeckung, die 25 % übersteigt (jedoch müssen Flechten, die auf Moosen wachsen, in die Berechnung der Diversität einbezogen werden).

Für das Auffinden bei einer Wiederholungskartierung ist eine genaue und dauerhafte Kennzeichnung der Lage der Gitterstreifen am Stamm durch Edelstahl-Nägel o.ä. empfehlenswert.

Im nächsten Verfahrensschritt wird bestimmt, welche Flechtenarten in den einzelnen Gitterstreifen vorkommen und ausgezählt, in wie vielen Quadraten des Gitterstreifens sie jeweils auftreten. Die Anzahl der Quadrate, in denen eine Flechtenart in einem Gitterstreifen vorkommt, wird als Frequenz bezeichnet. Sie bildet die Grundlage der quantitativen Erfassung der Flechtenvegetation.

Bei der Bestimmung der Flechtenarten vor Ort hilft die einschlägige Literatur von Wirth [17], Kirschbaum und Wirth [18] sowie Jahns [19].

Alle Flechtenarten, die vor Ort eindeutig bestimmbar sind, werden zur Berechnung der Diversitätswerte (FDW) verwendet. Falls die Identifizierung bestimmter Thalli Schwierigkeiten bereitet, werden sie in die Berechnung der Vielfalt als "Sp. x" oder „Aggregat“ einbezogen, wobei sichergestellt werden muss, dass sie nicht beschädigte oder unterentwickelte Formen von Arten sind, die im Flechtenaufnahmegitter bereits vorkommen.

Exemplare von Arten, die auf der Roten Liste stehen, dürfen nicht entfernt werden. Aus dem Flechtenaufnahmegitter dürfen keine Flechten entnommen werden, wenn Wiederholungskartierungen geplant sind.

5 Auswertung der Daten und Bestimmung des Luftgüteindex

Dem Luftgüteindex liegen die Diversität des Flechtenvorkommens und die Häufigkeit der einzelnen Arten in einer Messfläche zu Grunde.

Unter Diversität wird in der Ökologie die Anzahl von Arten verstanden, die auf einer bestimmten Fläche gefunden werden. Darüber hinaus besitzt auch die Frequenz (Häufigkeit), mit der eine Art auf einer Fläche vorkommt, Informationsgehalt. Deshalb wird bei diesem Verfahren die mit der Frequenz gewichtete Diversität als Bewertungskriterium genommen. Sie wird hier als Flechtendiversitätswert (FDW) bezeichnet und als statistischer Schätzwert der lufthygienischen Bedingungen auf einer Messfläche benutzt. Aufgrund der unterschiedlichen Einflüsse, die eutrophierende und nicht-eutrophierende Luftverunreinigungen auf das Vorkommen von Flechten (und anderen Lebewesen) haben, wird der Flechtendiversitätswert für die Eutrophierungszeiger und für die übrigen Arten (Nicht-Eutrophierungszeiger) getrennt berechnet. Die Bewertung einer Messfläche und damit ihr „Luftgüteindex“ ergibt sich aus der Kombination der Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger und der übrigen Arten.

5.1 Liste der Eutrophierungszeiger

In der Richtlinie wurde in einer Liste eine Gruppe von Flechtenarten festgelegt, die durch nährstoffreiche Immissionen – dies sind vor allem Stickstoffverbindungen und Stäube – gefördert werden (s. Tab. 2). [4, 20].

Tab. 2: Liste der Flechtenarten, die als Eutrophierungszeiger zu behandeln sind

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

5.2 Berechnung der Diversitätswerte

Die Frequenzen der einzelnen Flechtenarten werden zuerst für jeden Baum, jede Himmelsrichtung sowie für die Eutrophierungszeiger und die Referenzarten getrennt aufsummiert. Aus den errechneten Frequenzsummen aller Bäume einer Messfläche berechnet man anschließend – immer noch nach Himmelsrichtungen getrennt – die mittleren Frequenzsummen. Diese werden dann zum Flechtendiversitätswert für die Eutrophierungszeiger und für die Referenzarten aufsummiert (siehe Tab. 3). Die Reihenfolge von Additionen und Mittelbildung ist einzuhalten, weil systematische Fehler auftreten könnten, wenn an einem Baum eine Himmelsrichtung nicht kartiert werden kann, wie dies im Beispiel am Baum 2 für Süden dargestellt ist.

Tab. 3: Berechnung der Diversitätswerte für die Eutrophierungszeiger und für die Referenzarten einer Messfläche j am Beispiel fiktiver Daten

Flechtenkartierung Station: XY		Berechnung der Diversitätswerte für die Eutrophierungszeiger und für die übrigen Arten							
		Referenzarten				Eutrophierungszeiger			
		N	E	S	W	N	E	S	W
Baum 1	Flechtenart 1	0	2	4	2				
	Flechtenart 2	1	1	3	2				
	Flechtenart 3					1	2	5	2
	Flechtenart 4					0	0	0	0
	Flechtenart 5					0	1	3	2
	Flechtenart 6	0	1	5	1				
	Flechtenart 7	0	4	4	3				
Frequenzsumme		1	8	16	8	1	3	8	4
Baum 2	Flechtenart 1	0	0	-	2				
	Flechtenart 2	1	2	-	3				
	Flechtenart 3					0	0	-	0
	Flechtenart 4					1	2	-	1
	Flechtenart 5					1	2	-	3
	Flechtenart 6	0	2	-	2				
	Flechtenart 7	1	5	-	2				
Frequenzsumme		2	9	-	9	2	4	-	4
Baum 3	Flechtenart 1	0	3	5	2				
	Flechtenart 2	0	1	4	3				
	Flechtenart 3					1	2	3	2
	Flechtenart 4					0	3	2	3
	Flechtenart 5					1	1	2	4
	Flechtenart 6	0	3	3	3				
	Flechtenart 7	0	0	4	1				
Frequenzsumme		0	7	16	9	2	6	7	9
Baum 4	Flechtenart 1	0	3	5	2				
	Flechtenart 2	0	1	4	3				
	Flechtenart 3					1	2	3	2
	Flechtenart 4					0	3	2	3
	Flechtenart 5					1	1	2	4
	Flechtenart 6	0	3	3	3				
	Flechtenart 7	0	0	4	1				
Frequenzsumme		0	7	16	9	2	6	7	9
Frequenzsummen		Referenzarten				Eutrophierungszeiger			
		N	E	S	W	N	E	S	W
Baum 1		1	8	16	8	1	3	8	4
Baum 2		2	9	-	9	2	4	-	4
Baum 3		0	7	16	9	2	6	7	9
Baum 4		0	7	16	9	2	6	7	9
Mittelwert		0,75	7,75	16,00	8,75	1,75	4,75	7,33	6,50
Flechtendiversitätswert der Messfläche XY		Referenzarten				Eutrophierungszeiger			
		33,25				20,33			

5.3 Bewertung der Ergebnisse

Hat man die Flechtendiversitätswerte – wie in Tab. 3 beispielhaft gezeigt – errechnet, wird dann die Luftgüte anhand der Vielfalt und Artenzusammensetzung der Flechtenvegetation verbal mit "sehr hoch – hoch – mittel – gering – sehr gering" bewertet, mit einem Index – dem Luftgüteindex (LGI) – beziffert und für die kartografische Darstellung mit einer Farbe belegt. Die Bewertung wird anhand der Diversitätswerte für die Eutrophierungszeiger und für die Referenzarten und der in Abbildung 2 vorgegebenen Bewertungsmatrix vorgenommen. Hierzu werden die Diversitätswerte der Referenzarten in der Bewertungsmatrix auf der Ordinate (Y-Achse) aufgetragen, die Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger auf der Abszisse (X-Achse). Die Matrixfläche, in der der Schnittpunkt der beiden Diversitätswerte einer Messfläche zu liegen kommt, entscheidet über die Luftgütestufe (einschließlich Indexwert und Farbe), die für diese Messfläche gilt.

Diversitätswerte der Referenzarten	>50	5 E1	5 E2	4 E3	4 E4	3 E5	
	50		5 E2				
	40	4 E1	4 E2	4 E3	3 E4	3 E5	
	30		4 E2				
	22,5	3 E1	3 E2	3 E3	3 E4	2 E5	
	15	2 E1	3 E2	3 E3	2 E4	2 E5	
	5	1 E1	2 E2	2 E3	2 E4	1 E5	
	0						
		0	10	20	30	40	>40
		Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger					

Der Luftgüteindex setzt sich aus zwei Ziffern zusammen, die durch den Buchstaben **E** (Eutrophierung) getrennt sind. Die erste Ziffer des Indexes kennzeichnet die Luftgüte und ist fest mit der Farbe für die Kartendarstellung gekoppelt. Sie ergibt sich aus der Kombination der Diversitätswerte der Referenzarten und der Eutrophierungszeiger. Die zweite Ziffer symbolisiert den Einfluss eutrophierender Luftverunreinigungen und ist direkt abhängig vom Diversitätswert der Eutrophierungszeiger. Der Zusammenhang zwischen der Luftgütebewertung, dem Luftgüteindex und der Farbe ist Tab. 4 zusammengestellt.

Abb. 2: Bewertung der Luftgüte anhand der Kombination der Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger und der übrigen Arten (Quelle: nach [4], verändert)

Diese Bewertungsmatrix wurde auf der Basis von Erfahrungen mit dem Aufnahmegerät der VDI-Richtlinie 3799, Blatt 1, und auf Kartierungsergebnissen an natürlicherweise ± subneutralen/neutralen Rinden erstellt.

Tab. 4: Zusammenhang zwischen der Bewertung der Luftgüte, der ersten Ziffer des Indexwertes und der Farbe für die Kartendarstellung der Luftgüte

Bewertung der Luftgüte	Indexwert (erste Ziffer) und Farbe
sehr hohe Luftgüte	5
hohe Luftgüte	4
mäßige Luftgüte	3
geringe Luftgüte	2
sehr geringe Luftgüte	1

Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger	Einfluss eutrophierender Luftverunreinigungen	Indexwert (zweite Ziffer)
sehr hoch	sehr stark	E5
hoch	stark	E4
mäßig	mäßig	E3
niedrig	gering	E2
sehr niedrig	sehr gering	E1

Diversitätswerte der Referenzarten	0	10	20	30	40	>40
>50	5 E1	5 E2	4 E3	4 E4	3 E5	
50						
40		5 E2				
30	4 E1	4 E2	4 E3	3 E4	3 E5	
20						
15	3 E1	4 E2	3 E3	3 E4	2 E5	
10		3 E2				
5	2 E1	3 E2	3 E3	2 E4	2 E5	
0	1 E1	2 E2	2 E3	2 E4	1 E5	
	0	10	20	30	40	>40
	Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger					

Anwender der bisherigen Flechtenkartierungsrichtlinie ([8]) müssen aus Gründen der Vergleichbarkeit das Aufnahmegitter (20 cm x 50 cm) mit 10 Feldern bei Wiederholungskartierungen weiter benutzen, können jedoch das neue Bewertungsverfahren verwenden, sofern sie stets alle vorhandenen Flechtenarten aufgenommen haben. In diesem Fall wird die Luftgüte anhand der in Abb. 3 wiedergegebenen Bewertungsmatrix abgeleitet.

Abb. 3: Bewertung der Luftgüte anhand der Kombination der Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger und der Referenzarten im Falle einer Datenerhebung mit dem 10feldrigen Aufnahmegitter (Quelle: nach [4], verändert)

5.4 Vergleich mit anderen Untersuchungen

Die Luftgüteindices (LGI) untersuchter Messflächen können dazu verwendet werden, Ergebnisse von Untersuchungen aus verschiedenen Gebieten miteinander zu vergleichen oder den zeitlichen Trend der Umweltbelastung im selben Gebiet zu erfassen.

Ein Vergleich ist jedoch nur dann möglich, wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind:

Entweder:

- Die zu vergleichenden Untersuchungsgebiete liegen in einer Region, für die die gleiche Bewertungsmatrix gilt (d.h. ihre Flora und ihr Klima sind ähnlich). Dies gilt im Sinne dieser Richtlinie für Mitteleuropa, mit Ausnahme der Alpen.
- Die untersuchten Bäume gehören Arten an, die auf Grund ihrer Rindeneigenschaften miteinander verglichen werden können.

Oder:

- Die Ergebnisse der Kartierung werden mit physikalisch-chemischen Luftschadstoffmessergebnissen verglichen und kalibriert, die für Flechten relevant sind.

Für alle Gebiete gilt folgendes:

In Gebieten mit sehr niedrigen Luftgüteindices ist mit großer Wahrscheinlichkeit die Luftverschmutzung die Hauptursache für das geringe Vorkommen der Flechten. In diesem Fall sind Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität dringend geboten. Der Erfolg von Luftreinhaltungsmaßnahmen wird sichtbar, wenn in einer Wiederholungsuntersuchung Messflächen einer Farbe (bzw. einem LGI) zugeordnet werden können, die bessere lufthygienische Verhältnisse signalisiert.

Keine Luftreinhaltungsmaßnahmen sind notwendig in Gebieten mit sehr günstigem LGI, in denen der Diversitätswert der Nicht-Eutrophierungszeiger hoch und der Anteil der Eutrophierungszeiger gleichzeitig gering ist (Bewertung des Luftgüteindex: blau).

Eine ausgeprägte Verschlechterung der Luftgüte-Indizes nach Vergleichen mit früheren Untersuchungen signalisiert eine Erhöhung der Immissionsbelastung.

6 Literatur

- [1] Bartholmeß, H. (2000): Wirkungsbezogene Langzeitbeobachtung von Umweltbelastungen – Flechtenkartierungen im Umweltmonitoring-Programm Esslingen/Altbach 1983 – 1998. Gefahrstoffe – Reinh. Luft 60, Nr. 9, S. 361 – 366.
- [2] Hessischer Minister für Umwelt und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Luftreinhalteplan Untermain - Bericht über die Erhebungen der Emissionen, Immissionen und Wirkungen sowie Maßnahmenplan zum Luftreinhalteplan. Wiesbaden, 1988. ISBN 3-89274-019-4.
- [3] Ministerium für Raumordnung und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt: Luftreinhalteplan Untersuchungsgebiet 6 – Großraum Dessau-Wittenberg-Bitterfeld – Band 2: Immissions- und Wirkungskataster. Magdeburg, 1998.
- [4] VDI-Richtlinie 3957, Blatt 13 (Dez. 2005): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Flechten (Bioindikation): Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für die Luftgüte. Beuth-Verlag, Berlin.
- [5] Asta, J., Erhardt, W., Ferretti, M., Fornasier, F., Kirschbaum, U., Nimis, P.L., Purvis, O.W., Pirintsos, S., Scheidegger, C., van Haluwyn, C. und V. Wirth, V. (2002). Mapping lichen diversity as an indicator of environmental quality. - In: Nimis, P.L. et al. (eds.): Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens. NATO Science Series, IV, Vol. 7. Kluwer, Dordrecht, pp. 273 -279.
- [6] ANPA (2001). "I.B.L. Indice di Biodiversità Lichenica". ANPA, Serie Manuali e Linee Guida 2/2001, Rome.
- [7] UVM Baden-Württemberg, STMLU Bayern, HMULF Hessen und TMLNU Thüringen (Hrsg.): Leitfaden – Indikatoren im Rahmen einer LOKALEN AGENDA 21. 79 S. November 2000. 3-89274-207-3.
- [8] VDI-Richtlinie 3799, Blatt 1 (1995). Ermittlung und Beurteilung phytotoxischer Wirkungen von Immissionen mit Flechten: Flechtenkartierung. – VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Bd. 1, Beuth-Verlag, Berlin.
- [9] Van Dobben, H.F. & De Bakker, A.J. (1996). Re-mapping epiphytic lichen biodiversity in the Netherlands: effects of decreasing SO₂ and increasing NH₃. – Acta Botanica Nederlandica 45, 55-71.
- [10] Van Herk, C.M. (1999). Mapping of ammonia pollution with epiphytic lichens in the Netherlands. – Lichenologist 31, 9-20.
- [11] Van Herk, C., M. (2001): Bark pH and susceptibility to toxic air pollutants as independent causes of changes in epiphytic lichen composition in space and time. – Lichenologist 33(5), 419-441.
- [12] Van Herk, C.M. (2002). Epiphytes on wayside trees as an indicator of eutrophication in the Netherlands. – In: Nimis, P.L. et al. (eds.): Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens. NATO Science Series, IV, vol. 7. Kluwer, Dordrecht, pp. 285-289.
- [13] Kirschbaum, U. (2003). Flechtendauerbeobachtungsflächen Hessen. – Arbeitsberichte des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie. Wiesbaden.
- [14] Türk, R. & Wirth, V. (1975). The pH dependence of SO₂ damage to lichens. – Oecologia 19, 285-291.

- [15] Windisch, U. (1999): Zur Eignung ausgewählter Laubbaumarten für die immissionsbezogene Flechtenkartierung in Hessen und Bayern. Verhandlungen der Ges. f. Ökologie 29, 601-605.
- [16] Kricke, R. (2002). Measuring bark pH. – In: Nimis, P.L. et al. (eds.): Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens. NATO Science Series, IV, vol. 7. Kluwer, Dordrecht, pp. 333-336.
- [17] Wirth, V. (1987): Die Flechten Baden-Württembergs. Stuttgart: Ulmer. ISBN 3-8001-3305-9.
Wirth, V. (1995): Die Flechten Baden-Württembergs (2 Bände). Stuttgart: Ulmer (2. Auflage). ISBN 3-8001-3325-3.
- [18] Kirschbaum, U. und V. Wirth (1995): Flechten erkennen – Luftgüte bestimmen. Stuttgart: Ulmer. ISBN 3-8001-3477-2.
- [19] Jahns, H.M. (1995): Farne, Moose, Flechten Mittel-, Nord- und Westeuropas. München: BLV Verlagsgemeinschaft. 4. Auflage. ISBN 3-405-13458-7.
- [20] Wirth, V. (1992). Zeigerwerte von Flechten. – In: Ellenberg, H. (Hrsg.), Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Scripta Geobotanica XVIII, 215-237. Goltze-Verlag, Göttingen.