

3 Bioindikation von Luftverunreinigungen

3.1 Allgemeines

Ergänzend zu den physikalischen und chemischen Messmethoden zur Bestimmung luftverunreinigender Stoffe hat sich die Bioindikation bewährt, um die Wirkung von schädlichen Immissionen zu erfassen. Hierunter wird die Messung von Veränderungen verstanden, die durch anthropogene Umwelteinflüsse an Organismen bzw. Ökosystemen hervorgerufen werden; der systematische Einsatz von Bioindikatoren führt zum Wirkungskataster [28]. Bioindikatoren stellen keine billigen „Ersatz-Messinstrumente“ für technische Geräte dar, sondern sie liefern die komplexe Indikation der Schadstoffsituation unter Berücksichtigung der Variabilität der ökologischen Standortbedingungen an einem spezifischen Ort [29]. Als Bioindikatoren können Bakterien, Pflanzen, Tiere und Menschen dienen; sehr häufig sind jedoch Pflanzen am besten geeignet, weil sie standortgebunden sind, in großer Individuenzahl vorkommen und ihre Umweltansprüche gut zu erfassen sind [15]. In den folgenden Abschnitten werden einige grundsätzliche Begriffe und Aspekte zur Bioindikation erläutert.

Zeigerorganismen ermöglichen Aussagen über den Zustand eines Ökosystems, z. B. durch Veränderung der Arten- und Mengenzusammensetzung von Pflanzen- und Tiergesellschaften beim Auftreten von Schadstoffen. Sie geben zwar wenig Auskunft über die Quantität eines wirksamen Schadstoffs, haben aber Bedeutung bei der Aufdeckung subletaler oder chronischer Belastung; hier eignen sich u. a. die Flechtengesellschaften [16]. Testorganismen werden vorwiegend in toxikologischen Labortests eingesetzt. Sie reagieren in spezifischer Weise bereits auf geringe Schadstoffkonzentrationen. Monitororganismen umfassen Lebewesen, die zur quantitativen und qualitativen Überwachung von Schadstoffen und demzufolge auch zum Nachweis von Immissionswirkungen verwendet werden. Sie können entweder am natürlichen Standort entnommen sein (passives Monitoring) oder nach standardisierten Verfahren exponiert werden (aktives Monitoring). Wird nur eine ausgewählte Organismenart erfasst, spricht man vom autoökologischen Ansatz; beim synökologischen Ansatz werden mehrere Pflanzen- und Tierarten eines Standorts zusammen untersucht.

Bioindikatoren reagieren auf Schadstoffbelastungen mit Veränderungen ihrer Lebensfunktionen bzw. mit

Anreicherung des Schadstoffs [4, 28]; es wird unterschieden zwischen Reaktions- und Akkumulationsindikatoren bzw. zwischen sensitiven und akkumulativen Wirkungen. An Reaktionsindikatoren treten unter Immissionseinfluss Stoffwechselbeeinträchtigungen auf, die sich in äußerlich sichtbaren Schädigungen widerspiegeln. Solche sensitiven Wirkungen können u. a. folgende sein: Änderungen des Stoffwechsels oder der Enzymaktivitäten, Verringerung des Wachstums, charakteristische Gewebeschäden (Chlorosen, Nekrosen), Absterbeerscheinungen, Ertrags- bzw. Qualitätsminderungen oder auch Baumkronenauslichtungen und schütterere Benadelung bei Koniferen. Typische sensitive Pflanzenexponate (Reaktionsindikatoren) sind Flechten, Tabak, Gladiole, Ackerbohne, Rotklee, Buschbohne und Kleine Brennnessel. Die Indikatorpflanzen zeigen bei der Einwirkung bestimmter Schadstoffe spezifische Reaktionen. So reagieren z. B. Gladiolen auf Fluor- und bestimmte Tabaksorten auf Ozoneinwirkungen mit typischen Blattnekrosen, Rotfichte und die Ackerbohne sind auf Schwefeldioxid empfindlich, und Rotklee spricht auf kombinierte Einwirkungen von Ozon und Schwefeldioxid an. Als Messgrößen für sensitive Wirkungen seien hier beispielhaft genannt: der Absterbegrade von standardisiert exponierten Flechten sowie die Artenvielfalt unterschiedlich resistenter Flechtenarten an deren natürlichen Standorten, das Ausmaß der geschädigten (nekrotisierten) Pflanzenoberfläche oder der Benadelungsgrade von Koniferennadeljahrgängen (von Bedeutung vor allem bei den Waldschadenserhebungen).

Akkumulationsindikatoren reichern Schadstoffe an, ohne dass es dabei zu sichtbaren Schadsymptomen kommen muss. Eine über das normale Maß hinausgehende Schadstoffkonzentration in den Indikatororganismen wird als akkumulative Wirkung bezeichnet. Die Schadstoffanreicherung wird mit Hilfe von rückstandsanalytischen Untersuchungen des Pflanzenmaterials bestimmt. Eine wichtige Anwendung von Akkumulationsindikatoren ist beispielsweise die Ermittlung von Schwefel-, Fluor- und Schwermetallgehalten in Koniferennadeln und Weidelgraskulturen. Weniger empfindliche Flechten- und Moosarten eignen sich ebenfalls als akkumulative Indikatoren zum Nachweis schwermetallhaltiger Immissionen. In zunehmendem Maße müssen im Spektrum der ana-

lytisch zu bestimmenden Parameter organische Stoffgruppen wie Dioxine oder polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe mitberücksichtigt werden; für diese hat sich in der Praxis die Exposition von Grünkohl und Klonfichten etabliert.

Eine neuere Entwicklung ist der standardisierte Bioindikatorfächer; hier werden aus den unterschiedlichen Reaktionen gleichzeitig an einem Ort exponierter Organismenarten zusätzliche Informationen gewonnen [28]. Es wird die unterschiedliche Empfindlichkeit mehrerer Arten gegenüber einzelnen Schadstoffen oder auch die einzelner Sorten gegenüber demselben Schadstoff ausgenutzt. Die Methode wird z. B. für die Untersuchung von Ozonwirkungen verwendet und hat den Vorteil, dass sich die Ergebnisse mehrerer, auf einen Immissionstyp unterschiedlich empfindlich reagierender Kulturen gegenseitig absichern und damit die ökologische Repräsentanz erhöht wird [17].

Die Entwicklung der heute in der Mehrzahl angewandten Bioindikationsverfahren fand zu einer Zeit statt, in der noch mit hohen Luftbelastungen zu rechnen war. Die Bioindikation diente damals schwerpunktmäßig der Überwachung von Emittenten und hatte zum Ziel, Gefahrenpotentiale für die Gesundheit der Menschen zu ermitteln. In erster Linie kamen gegen Luftschadstoffe empfindlich reagierende Pflanzenarten zum Einsatz. Auch wurden viele Kultur- oder Futterpflanzenarten unter normierten Randbedingungen auf ihre Brauchbarkeit als Akkumulationsindikatoren getestet; die Fremdstoffanreicherung in Pflanzenteilen über Blatt oder Wurzel bzw. als Staubaufgabe ist weniger für die Pflanze selbst als für die Nutzer des Pflanzenmaterials eine Gefährdung. In der heutigen Situation abnehmender Schadstoffbelastung hat sich der Anspruch an die Bioindikation verlagert und weiterentwickelt. Nicht mehr nur der Mensch, sondern die Umwelt im Ganzen ist jetzt das Ziel der durchgeführten Untersuchungen [29]. An Stelle der früher im Vordergrund stehenden akuten Schädwirkungen hat nun die Frage von chronischen Belastungen einen größeren Stellenwert; ein wichtiges Beispiel hierfür sind die großflächig auftretenden Waldschäden. Die Bioindikation soll u. a. die langfristigen Wirkungen niedriger Dosen oder die Wirkungen einmaliger und kurzfristiger Belastungsschübe aufzeigen.

Die bisher entwickelten Bioindikationsverfahren sind nicht ausreichend standardisiert. Sie sind nur zu einem Teil in VDI-Richtlinien festgelegt; manche der Richtlinien sind jedoch bereits überholt und müssten

aktualisiert werden. Für den Bereich der Akkumulationsindikatoren sind einheitliche Analysenverfahren sowie die Entwicklung notwendiger Referenzmaterialien zu fordern. Außerdem sind Bewertungskriterien für die Interpretation und Darstellung von Ergebnisdaten zu erarbeiten, die allgemeine Gültigkeit haben [29].

Bioindikationsverfahren lassen sich durch eine Reihe von Kenngrößen charakterisieren [4, 18, 28]:

- Reproduzierbarkeit: Maß für die Genauigkeit, mit der eine gleiche Ursache immer wieder zu gleichen Wirkungen führt und damit Ausdruck für die Zuverlässigkeit des Messwerts in Bezug auf zufällige Fehler.
- Empfindlichkeit: Reizschwellenwert (kleinstmögliche Ursache, ab der eine erkennbare Wirkung auftritt) sowie Auflösungsvermögen (Ausmaß der Fähigkeit des Bioindikators, auf unterschiedlich starke Reize erkennbar verschieden stark zu reagieren).
- Richtigkeit: Maß für die Übereinstimmung von Messwert und Wirkungsgröße und damit Ausdruck des systematischen Fehlers des Verfahrens.
- Spezifität: Maß für die Eindeutigkeit, mit der eine festgestellte Wirkung auf eine definierte Einzelursache zurückgeführt werden kann, wobei zwischen Stoffspezifität und Reaktionsspezifität unterschieden wird.
- Beobachtungszeit: Zeitdauer, über die der Indikator Reize bis zur Bestimmung seiner Reaktionen aufnimmt.
- Gültigkeit: Übertragbarkeit der Indikatorreaktion auf die Verhältnisse an anderen Orten und zu anderen Zeiten.
- Repräsentanz: Übertragbarkeit der Indikatorreaktion auf die Verhältnisse bei anderen Organismen.

In Tabelle 3 ist für einige Bioindikationsverfahren angegeben, in welchem Maße die einzelnen Kenngrößen bei den jeweiligen Verfahren ausgeprägt sind [18]. Die Tabelle gibt somit einen Überblick über die Stärken und Schwächen von ausgewählten Methoden.

Im hessischen Wirkungskataster wurden Untersuchungen an vielen unterschiedlichen Pflanzenarten vorgenommen. In Tabelle 4 sind die wesentlichen vom HLUG angewendeten Bioindikationsverfahren zusammengestellt, die Gegenstand dieses Berichts sind; sie werden im Kapitel 3.2 beschrieben. Daneben kommen im vorliegenden Bericht gelegentlich

Tab. 3: Kenngrößenbewertung der Bioindikationsverfahren (nach KEITEL [18])

	Verfahren							
	Aktives Monitoring					Passives Monitoring		
	Indikator							
	Flechte R	Tabak R	Klonflechte R	Klonflechte A	Weidelgras A	Flechte R	Baum R	Baum A
<i>Messwert</i>								
Reproduzierbarkeit	•••	••	••	•••	•••	••	•	••
Empfindlichkeit	•••	•••	•	••	•••	•••	•	••
<i>Wirkungsgröße</i>								
Richtigkeit	•••	••	•	••	••	••	•	••
Spezifität	•	•••	•	•••	•••	•	•	•••
Beobachtungszeit	••	•	•••	•••	•	•••	•••	•••
<i>Aussageziel</i>								
Übertragbarkeit (Raum/Zeit)	••	••	•	•••	•••	••	••	••
Übertragbarkeit (ökologisch)	•	•	••	••	•	••	•••	•••

R= Reaktionsindikator, A= Akkumulationsindikator
 •/••/••• Kriterium= schwach/mäßig/stark ausgeprägt (bzw. Beobachtungszeit= kurz/mittel/lang)

Tab. 4: Übersicht der in Hessen verwendeten Bioindikationsverfahren

Indikator	Monitoring	Einsatz	Messwert	Aussageziel
Tabakpflanzen	aktiv	R	Nekrotisierung	Wirkungen von oxidierenden Luftverunreinigungen
Buschbohnen	aktiv	R	Nekrotisierung	Wirkungen von oxidierenden Luftverunreinigungen
Kleine Brennnessel	aktiv	R	Nekrotisierung	Wirkungen von oxidierenden Luftverunreinigungen
Gladiole	aktiv	R/A	Nekrotisierung/Akkumulation von Fluorverbindungen	Aktuelle Belastung mit Fluoriden
Graskultur (Weidelgras)	aktiv	A	Akkumulation von Schwermetallen, Schwefel- und Fluorverbindungen	Aktuelle Belastung mit akkumulierbaren Stoffen
Eibe	aktiv	A	Akkumulation von Schwermetallen, Schwefel- und Fluorverbindungen	Langfristige Belastung mit akkumulierbaren Stoffen
Moose	passiv	A	Akkumulation von Schwermetallen	Chronische Belastung durch Luftverunreinigungen
Grünkohl	aktiv	A	Akkumulation von Schwermetallen und organischen Komponenten	Langfristige Belastung mit akkumulierbaren Stoffen
Klonflechten	aktiv	A	Akkumulation von Schwermetallen und organischen Komponenten	Langfristige Belastung mit akkumulierbaren Stoffen
Flechtenvegetation am natürlichen Wuchsort	passiv	R/A	Artenzahl und -verteilung/ Akkumulation von Schwermetallen	Allgemeine Belastung von Ökosystemen

R = Reaktionsindikator, A = Akkumulationsindikator

auch einige weitere Verfahren vor. Andere Methoden wie beispielsweise die Bioindikation mit Bäumen im Waldbestand sind im Bericht nicht enthalten.

3.2 Ausgewählte Bioindikationsverfahren

3.2.1 Reaktionsindikatoren für Photooxidantien

Für den Wirkungsnachweis von Photooxidantien, deren Leitkomponente Ozon als einer der wichtigsten pflanzentoxischen Luftschadstoffe gilt, kommen nur Reaktionsindikatoren in Frage, da diese Luftverunreinigungen im pflanzlichen Organismus nicht akkumulierbar sind. Bestimmte Pflanzenarten zeigen nach Einwirkung von Photooxidantien eindeutig identifizierbare Nekrosen und eignen sich daher als Bioindikatoren für diese Schadstoffgruppe [25]:

- Tabak (*Nicotiana tabacum*, var. *BEL W3*) nach der VDI-Richtlinie 3957 [26]
- Buschbohne (*Phaseolis vulgaris*)
- Kleine Brennnessel (*Urtica urens*)
- Rotklee (*Trifolium pratense*).

Tabak ist die bei weitem empfindlichste Art; er wird bereits seit langem als Bioindikator für Ozon verwendet. Neben seiner hohen Empfindlichkeit gegenüber oxidierenden Luftverunreinigungen eignet er sich dazu besonders auf Grund seiner kontinuierlichen Blattbildung während der gesamten Vegetationsperiode, der eindeutigen Reaktion auf Oxidantien mit einfach identifizierbaren Symptomen und der unterschiedlichen Empfindlichkeit der Blätter je nach Alter, so dass sich neue Schädigungen von alten trennen lassen [28].

Die Pflanzen werden unter kontrollierten Bedingungen angezogen und für eine bestimmte Verweildauer (meist 14-tägig) im Untersuchungsgebiet exponiert. Bonitiert werden die nekrotisierten Flächenanteile der für die jeweilige Indikatorart festgelegten Bezugsblätter. Aus den Ergebnissen (Blatt-Nekrotisierungsgrad in Prozent) für die einzelnen 14-tägigen Expositionszeiten ist ein Gesamtmittelwert für die Vegetationsperiode zu berechnen. Die ermittelten Schädigungsgrade dokumentieren die relative Wirkung der Luftverunreinigungen im Zusammenspiel mit den Klimafaktoren; letztere (z. B. Lichtverhältnisse, Temperatur und Luftfeuchte) können auf die Ausbildung der Schäden Einfluss nehmen. Aussageziel ist das relative Maß der Phytotoxizität von oxidierenden Luftverunreinigungen für landwirtschaftlich genutzte Pflanzen [18].

3.2.2 Gladiole als Reaktions- und Akkumulationsindikator

Zur Indikation der Fluorbelastung sind Gladiolen (*Gladiolus communis*) besonders geeignete Pflanzen. Schon zu Anfang der 50er Jahre wurden in verschiedenen Ländern Spitzen- und Randnekrosen an Gladiolenblättern als Folge von Fluorimmissionen ermittelt. Neben den Schäden im äußeren Erscheinungsbild kommt es außerdem zur Anreicherung von Fluor im Pflanzenmaterial; deshalb können Gladiolen sowohl als Reaktions- als auch als Akkumulationsindikator dienen. Es kommen verschiedene Gladiolenvarietäten zur Anwendung, die sich durch unterschiedliche Empfindlichkeit gegenüber Fluor auszeichnen. In den Monitoringprogrammen des HLUg wurden die Sorten *Snow princess*, *White friendship* und *White prosperity* eingesetzt.

Bei der Bonitierung (optischen Begutachtung) werden die gelben bis braunen Spitzen- und Randnekrosen der Blätter 3 bis 6 herangezogen [17]. Als Maß für die Schädigung dient die Nekrosenlänge bzw. der prozentuale Anteil der veränderten Blattfläche. Nach der Endbonitur der sichtbaren Schädigungen werden die Gladiolenblätter möglichst weit unten abgeschnitten. Weil die Blattspitzen die Orte mit der höchsten Fluorakkumulation sind, sollen möglichst auch nur diese zur Analyse herangezogen werden. Von den Blättern wird deshalb nach der Trocknung vom Basalteil gerade so viel weggeschnitten, dass die für eine Fluorid-Analyse erforderliche Trockensubstanz von 0,8–1 g zur Verfügung steht (VDI-Richtlinie 3795 [20]).

3.2.3 Standardisierte Graskultur als Akkumulationsindikator

Als Indikatorpflanze wird bei diesem Verfahren Welches Weidelgras (*Lolium multiflorum ssp. italicum*) eingesetzt. Als Akzeptor dient die Pflanzenmasse, die im Verlauf der Expositionszeit produziert wird und in der verschiedene Luftschadstoffe akkumuliert werden. Das Verfahren ist in der VDI-Richtlinie 3792 [19] festgelegt: Blatt 1 beschreibt das standardisierte Verfahren, Blatt 2 und 3 beinhalten die Messung der Immissionswirkdosis von Fluorid und Blei. Die Methode dient generell der Bestimmung der Anreicherung von Fluor- und Schwefelverbindungen sowie

von Schwermetallen. Wegen der relativ einfachen Verfahrenshandhabung und den physiologischen Eigenschaften des Weidelgrases (hohe Aufnahmekapazität als Folge der ausgeprägten Resistenz, rasche Wüchsigkeit sowie die Möglichkeit, viele Einzelpflanzen und große Probemengen gewinnen zu können) hat das Graskulturverfahren, das es schon seit den 70er Jahren gibt, eine sehr starke Verbreitung gefunden. Es besitzt eine hohe Reproduzierbarkeit und Empfindlichkeit; die Spezifität und räumlich-zeitliche Übertragbarkeit sind ebenfalls hoch (siehe auch Tabelle 3).

Bei der Erhebungsmethode werden auf Standardsubstrat angezogene Kulturen des Welschen Weidelgrases in 1,5 m Höhe jeweils für 14 Tage exponiert, danach abgeerntet und für die Analyse aufgearbeitet; bis 1992 wurden die Pflanzenproben entsprechend der VDI-Richtlinie gewaschen, danach wurde nur ungewaschenes Pflanzenmaterial zur weiteren Analyse verwendet. Die abgeernteten Kulturen werden samt Kultursubstrat verworfen und durch neue Exponate ersetzt. Ihre volle Funktionsfähigkeit haben die Pflanzenkulturen nur in der Zeit von Mai bis ca. Oktober; die Messung der Immissionswirkdosis ist daher auf diesen Zeitraum begrenzt. Für eine Messstelle ergeben sich während einer Vegetationsperiode 10–12 Wechsel der Kulturen und damit die gleiche Anzahl von Messwerten pro untersuchte Schadstoffkomponente. Die durch das Pflanzenmaterial aufgenommene Schadstoffmenge ergibt unter Berücksichtigung der 14-tägigen Expositionszeit die so genannte Wirkdosis. Die resultierende Schadstoffbelastung wird als Konzentration in $\mu\text{g/g}$ TS (Trockensubstanz) oder ppm (parts per million) angegeben. Aus den 10–12 Einzelwerten wird jeweils der Mittelwert über die Vegetationsperiode berechnet.

Anreicherungen luftverunreinigender Stoffe werden allgemein als Wirkdosis bezeichnet. Diese ist ein Maß für die Belastung und damit die Gefährdung von Pflanzen bzw. deren Konsumenten [4]. Sie stellt die Resultante aus dem Immissionsstrom und den Mechanismen der Adsorption, Aufnahme, Umverteilung, Umsetzung und Ausscheidung innerhalb des Akzeptors dar [19]. Aus den Weidelgras-Analysen kann auf eine mögliche Gefährdung sowohl der Vegetation als auch des Weideviehs und somit auch auf die Gesundheitsgefährdung der Menschen geschlossen werden.

Zur objektiven Bewertung der Wirkdosis muss die Differenz zwischen dem ermittelten Schadstoffgehalt und der unter immissionsarmen Bedingungen

erfassten natürlichen Grundbelastung berücksichtigt werden. Die Grundbelastung wird aus dem Mittelwert der Summe des für die unbelastete Probe am Kontrollstandort ermittelten Blindwerts und seiner dreifachen Standardabweichung berechnet. Wirkdosen bzw. Akkumulationsraten, die die so errechnete Wirkungsnachweisgrenze (WNG) überschreiten, sind wahrscheinlich als immissionsbedingte Anreicherung zu betrachten.

Weiterhin muss bei der Auswertung der ermittelten Aufnahmearten berücksichtigt werden, dass die Durchschnittswerte je Messstelle und Gebiet von der Windgeschwindigkeit und anderen meteorologisch-klimatischen Bedingungen abhängen. In nassen, niederschlagsreichen Jahren sinken die Aufnahmearten, weil Niederschläge Luftverschmutzungen aus der Atmosphäre auswaschen und das Angebot an die Pflanzen entsprechend niedriger ist. Demzufolge sollten Messungen über mehrere Jahre laufen, um eine Mittelung der immissions- und witterungsbedingten Unterschiede zu erreichen.

3.2.4 Eibe als Akkumulationsindikator

Die Eibe (*Taxus baccata*) ist ein geeigneter Akkumulationsindikator für Schwermetalle sowie für Schwefel- und Fluorverbindungen. In [21] sind Eibennadeln auf ihren Gehalt an Schwermetallen untersucht worden. Dabei wurden vor allem für den Bleigehalt verkehrsbedingt signifikante Unterschiede in den Nadeln an den verschiedenen Standorten gefunden. Der genannten Untersuchung lag ein passives Monitoring zugrunde. Im vorliegenden Bericht erfolgte die Bioindikation mit Eiben als aktives Verfahren.

Ein Vorteil der Eibe liegt darin, dass sie als Konifere ganzjährig zur Bioindikation verwendbar ist. Außerdem gilt sie als weitgehend immissionsresistent und erfüllt damit eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung als Akkumulationsindikator. Für die Analytik der Schwermetalle werden je nach Fragestellung die einzelnen Nadeljahrgänge herangezogen.

3.2.5 Moose als Akkumulationsindikatoren

Moose finden als Akkumulationsindikatoren insbesondere für das Umweltmonitoring von Schwermetallen Verwendung; hierfür kommen unterschiedliche Moosarten zum Einsatz (siehe Kapitel 5.2). Ihre Eignung als Bioindikator hängt mit der Eigenschaft zusammen, ihren Nährstoffbedarf weitgehend aus der Atmosphäre (der Luft und den Niederschlägen)

zu decken. Die Stoffaufnahme erfolgt direkt über die kutikulafreie Epidermisoberfläche, so dass die Schadstoffaufnahme aus dem Substrat minimal ist. Die Anreicherungsrate der Moose für Schadstoffe ist im Vergleich zu anderen Pflanzen recht hoch, da sie eine große Oberfläche aufweisen, eine hohe Kationenaustauschkapazität besitzen und die Stoffaufnahme nicht über die Stomataöffnung regulieren können [15].

Die entnommenen Moosproben werden im Labor sorgfältig von anhaftendem Material gesäubert, jedoch keiner weiteren Waschprozedur unterzogen. Als Analysenmaterial wird der grün-grünbraune Anteil, der einen Zeitraum von 2–3 Jahren repräsentiert, verwendet. Nach der Trocknung bei 40 °C wird die Probe gemahlen (Achatbecher) und anschließend nach Säurezusatz in der Mikrowelle aufgeschlossen (Teflongefäße). Die Überprüfung auf Richtigkeit und Reproduzierbarkeit geschieht hierbei mit Referenzmaterialien, Standards und Moosproben von anderen Standorten.

3.2.6 Grünkohl als Akkumulationsindikator

Die Exposition von Grünkohl (*Brassica oleracea acephala*) stellt ein geeignetes Verfahren für die Bestimmung der Anreicherung von anorganischen und organischen Schadstoffen dar. Sie ist in der VDI-Richtlinie 3957 [27] festgelegt; dort werden als zu bestimmende Komponenten polychlorierte Biphenyle (PCB), Dioxine und polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) aufgeführt.

Die Grünkohlexposition spielt insbesondere als Bioindikationsverfahren für den Nachweis von PAK eine wichtige Rolle. PAK, die bei unvollständiger Verbrennung von organischem Material gebildet werden, kommen sowohl in der Luft wie auch in Böden, Pflanzen und in Lebensmitteln vor. Einige Verbindungen aus der Gruppe der PAK zeigen stark carcinogene Wirkungen; deshalb sind Informationen über ihren Gehalt in der Luft wünschenswert.

Für die Eignung von Grünkohl als Akkumulationsindikator kann eine Reihe von Gründen angeführt werden [28]:

- Grünkohl ist frostresistent und kann somit auch in der kalten Jahreszeit, in der die heizungsbedingten Immissionsmaxima auftreten, eingesetzt werden.
- Er besitzt eine hohe Widerstandskraft gegenüber vielen Schadstoffen, so dass seine Assimilationsfunktion erhalten bleibt.

- Durch seine krause Blattstruktur bietet er eine große Oberfläche, auf der staubförmige Luftverunreinigungen gut festgehalten werden.
- Die Wachsschicht auf den Blattoberflächen adsorbiert die in den Feinstäuben enthaltenen PAK und schützt sie auf diese Weise gegen Oxidation unter Sonneneinstrahlung.

In Hessen wird, wie bei den meisten Anwendern in der Bundesrepublik Deutschland, die Pflanzensorte „Halbhoher Grüner Krauser“ oder „Hammer“ bei einer Expositionszeit von Anfang/Mitte Juli bis Ende November verwendet. Bei der Probenahme des Grünkohls werden die Blätter vom Stamm abgeschnitten. Nach einer Trocknungsphase werden die Proben gemahlen und die Inhaltsstoffe in eine gelöste Form überführt.

3.2.7 Klonfichten als Akkumulationsindikatoren

Mit der Fichte (*Picea abies*) lässt sich die Akkumulation von luftgetragenen anorganischen und organischen Schadstoffen (u. a. von Schwermetallen, PAK und chlororganischen Verbindungen) bestimmen. Ein wesentlicher Vorteil dieses Bioindikators liegt in der Möglichkeit der ganzjährigen Exposition, womit besonders die in den Wintermonaten erhöhten Immissionsbelastungen erfasst werden können.

Das Klonfichtenverfahren ist eine aktive Erhebungsmethode von hoher Standardisierung, da die Pflanzen genetisch absolut identisch sind. Die Anzucht der Pflanzen erfolgt durch Stecklingsvermehrung von einer Mutterpflanze. Diese wird von vielen forstlichen Pflanzgärten und Versuchsanstalten durchgeführt. Nach einer Anzuchtdauer von drei Jahren sind die Pflanzen für Wirkungserhebungen einsatzbereit. Die Exposition erfolgt in Einheitserde oder voruntersuchter Standorterde mit definierten Düngebedingungen. Nach einer Akklimatisierungsphase von einem Jahr am Standort schließt sich eine etwa fünfjährige Expositionsphase an, nach deren Ablauf die Exponate durch eine neue Charge ersetzt werden [23].

Die Probenahme zur Analyse der Nadeln wird i. d. R. im Herbst mit dem jüngsten Nadeljahrgang durchgeführt. Die Nadeln werden zunächst optisch begutachtet und dann zur weiteren Analyse in ein Labor transportiert. Die getrockneten und homogenisierten Proben werden aufgeschlossen bzw. mit Lösungsmittel extrahiert (je nach Analyse auf anorganische bzw. organische Schadstoffe).

3.2.8 Flechten als Reaktionsindikatoren

Seit vielen Jahren werden für die Bioindikation luft-hygienischer Verhältnisse Flechten herangezogen. Außer ihrer hohen Empfindlichkeit gegenüber Luftverunreinigungen – insbesondere säurebildenden Schadgasen – bieten sie den Vorteil einer artspezifisch abgestuften Empfindlichkeit, wodurch bei Auftreten bestimmter Arten Rückschlüsse auf die jeweilige Luftqualität möglich sind. Da Flechten durch eine Vielzahl von Komponenten geschädigt werden können, ist die Spezifität von auf Flechten basierenden Methoden gering (siehe auch Tabelle 3); es wird also nur die allgemeine Immissions-situation erfasst.

Flechten sind sehr anpassungsfähig an extreme Umweltbedingungen und zeigen vielfach ein spezialisiertes Vorkommen auf Baumborken (epiphytisch), auf Gestein (epilithisch) und auf Böden (epigäisch) [22]. Bei immissionsökologischen Flechtenuntersuchungen werden in erster Linie nur epiphytische Arten berücksichtigt, da deren Auftreten innerhalb eines Gebiets auf Grund der Verfügbarkeit homogener Substrate am ehesten vergleichbar ist [24].

Flechten sind Doppelorganismen; sie bestehen aus einem Pilz (Mycobiont) und einer photosynthetisch aktiven Alge (Photobiont), die sich zu einer spezifischen Thallusstruktur zusammenschließen. Die Lebensgemeinschaft beider Partner kann nur durch ein fein reguliertes physiologisches Gleichgewicht aufrechterhalten werden; dieses Gleichgewicht ist äußerst störanfällig gegenüber Veränderungen des chemischen Milieus. Daneben tragen noch andere charakteristische Eigenschaften der Flechten zu ihrer hohen Empfindlichkeit gegenüber Luftverunreinigungen bei [22]:

- Flechten sind im feuchten Zustand besonders stoffwechselaktiv und reagieren dann außerordentlich empfindlich.
- Ihre Stoffaufnahme (einschließlich der Schadstoffe) erfolgt nahezu ausschließlich aus der Luft und den Niederschlägen über die gesamte Oberfläche.
- Bei Flechten ist, im Gegensatz zu Höheren Pflanzen, keine Kutikula (Schutzschicht) ausgeprägt. Daher können Schadstoffe weitgehend ungehindert bis zu den Pilz- und Algenzellen vordringen.
- Eine Schadstoffakkumulation in den Flechtenkörpern (Thalli) ist auf Grund ihrer Langlebigkeit sowie ihrer mangelnden Fähigkeit, Schadstoffe aktiv auszuscheiden, begünstigt.
- Flechten weisen ein geringes Wachstum und auch ein geringes Regenerationsvermögen auf; eine

Schädigung kann also nicht kurzfristig kompensiert werden.

- Flechten sind, ebenso wie winterharte, immergrüne Pflanzen (z. B. Nadelbäume), auch bei niedrigen Temperaturen stoffwechselaktiv. Sie können deshalb auch im Winterhalbjahr geschädigt werden.

Die Bioindikationsuntersuchungen mit Flechten als Reaktionsindikator sind in der VDI-Richtlinie 3799 [22] festgelegt: Blatt 1 beschreibt die Flechtenkartierung am natürlichen Standort (passives Monitoring) und Blatt 2 die standardisierte Flechtenexposition (aktives Monitoring). In Hessen ist das passive Verfahren angewendet worden (siehe Kapitel 5.6). Im Folgenden wird nach dem passiven Verfahren auch das aktive kurz umrissen. Daneben können Flechten auch als Akkumulationsindikator für Schwermetalle eingesetzt werden.

Passives Monitoring – Flechtenkartierung

Als Wirkungskriterium dient die Häufigkeit des Vorkommens bestimmter Flechtenarten auf definierten Bewertungsflächen an Baumstämmen; die vorhandene Flechtenvegetation wird also nach quantitativen und qualitativen Kriterien erfasst. Das Ergebnis wird in Form von sog. Luftgütwerten (LGW) dargestellt. Zur übersichtlicheren Darstellung der LGW werden diese zu Luftgüteklassen (LGK) zusammengefasst, wobei die gebildeten Abstufungen die unterschiedliche Luftqualität repräsentieren (z. B. von 1 bis 5, wobei die Nummerierung mit der schlechtesten Klasse beginnt). Die Klassenbreite der LGK richtet sich dabei nach der Fehlerstreuung der Ergebnisse; eine hohe Fehlerstreuung führt zu breiten LGK, eine geringe dagegen zu einer differenzierteren Darstellung der Luftgüte.

Die Flechtenkartierung spiegelt die langfristige Immissions-situation eines Untersuchungsgebiets wider. Zwischen der Immissionsbelastung und der auf Baumborken wachsenden Flechtenvegetation eines Untersuchungsgebiets bestehen enge Beziehungen, die umso enger sind, je konstanter die übrigen für die Existenz der Flechten relevanten Umweltfaktoren (klimatische Bedingungen sowie Eigenschaften der Baumborken) sind. Nach der VDI-Richtlinie 3799 werden nur Bäume zur Untersuchung herangezogen, deren Borkeneigenschaften untereinander annähernd vergleichbar sind. Die Forderung nach vergleichbaren klimatischen Gegebenheiten der Untersuchungsstationen lässt sich bei einem großen und morphologisch reich strukturierten Untersuchungs-

areal, wie es das Land Hessen darstellt, jedoch nicht verwirklichen.

Aktives Monitoring – Flechtenexposition

Empfindliche Flechten (in der Regel *Hypogymnia physodes*) werden in Untersuchungsgebieten, in denen die natürlichen Flechtenvorkommen bereits weitgehend verschwunden sind und daher für eine Indikation nicht mehr zur Verfügung stehen, unter

standardisierten Bedingungen für einen bestimmten Zeitraum exponiert. Als Wirkungskriterium wird die Schädigung des Thallus unter dem Einfluss von Immissionen erfasst. Messgröße ist der Schädigungsgrad, d. h. der prozentuale Anteil geschädigter Thallusfläche an der Gesamtfläche des Flechtenkörpers. Der Schädigungsgrad wird jeweils am Ende der Expositionszeit ermittelt.

3.3 Immissionsratenmessung mit Hilfe des IRMA-Verfahrens

Zur Bestimmung der Immissions-Rate (Depositionsrate) dient die IRMA (Immissions-Raten-Mess-Apparatur); sie wird zur Probenahme für die Messung der Immissionsstromdichte sowohl gasförmiger als auch staubförmiger Luftverunreinigungen eingesetzt. Das IRMA-Verfahren ist in der VDI-Richtlinie 3794 [30] beschrieben. Dabei wird eine standardisierte Oberfläche (Soxhlet-Filterhülse) durch Umpumpen einer Natronlauge-Glykol-Lösung ständig feucht gehalten. Der Zusatz von Ethylenglykol vermindert die Verdunstungsraten in den Sommermonaten, während er im Winter für einen ausreichenden Frostschutz sorgt. Die sauren Bestandteile aus der vorbeiströmenden Luft werden von der alkalisch reagierenden Hülsoberfläche aufgenommen und anschließend in eine Kunststoffflasche gespült.

Nach einer Expositionszeit von jeweils 14 Tagen (während der Vegetationsperiode parallel zu den Weidelgraskulturen) werden im Labor die Gehalte der Reaktionslösung an Fluorid, Sulfat und Nitrat bestimmt. Bei den Schwefelverbindungen wird die Summe aus dem als Gas vorliegenden SO_2 und dem partikelgebundenen Sulfat (SO_4^{2-}) erfasst. Die gemessene Summe der Stickstoffverbindungen setzt sich zusammen aus den partikelgebundenen Verbindungen Nitrat (NO_3^-) und Nitrit (NO_2^-) sowie den gasförmigen Verbindungen NO und NO_2 .

Da bei dieser Erhebungsmethode – im Gegensatz zu den kontinuierlichen Messungen der Immissionskonzentration – neben der Schadstoffkonzentration auch die Menge der vorbeiströmenden Luft und damit die Windgeschwindigkeit am Expositionsort in das Mess-

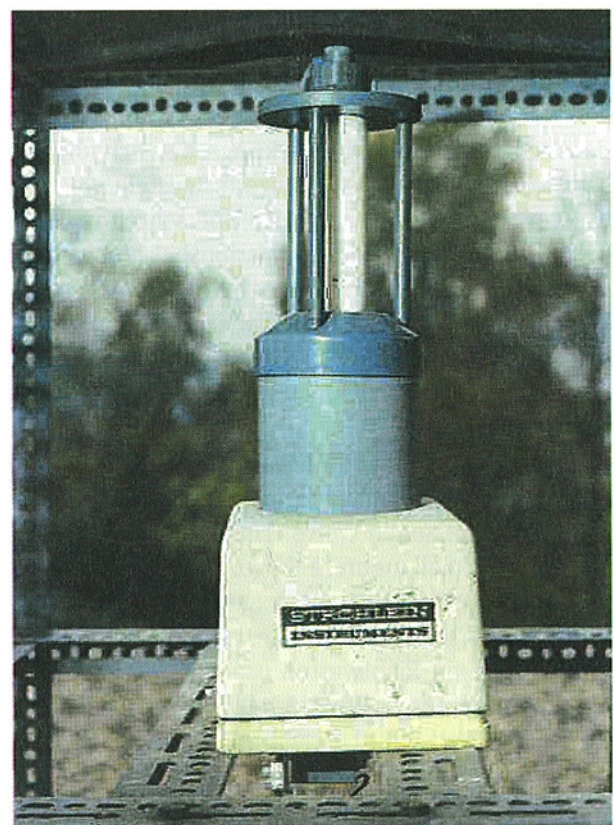


Abb. 1: Immissionsratenmessapparatur (IRMA)

ergebnis eingeht, erlaubt das IRMA-Verfahren eine relative Abschätzung der Schadstoffaufnahme durch Materialien und Baustoffe, die der freien Atmosphäre ausgesetzt sind. Die Angabe der Immissionsraten erfolgt in mg bzw. $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

3.4 Dosis-Wirkungsbeziehungen, Grenz- und Richtwerte

Mit dem Ableiten von Dosis-Wirkungsbeziehungen wird versucht, auf Grund von Begasungsexperimenten oder Felduntersuchungen eine quantitative Beziehung zwischen Schadstoffangebot und Wirkung auf eine bestimmte Organismenart aufzustellen. Bereits seit der Jahrhundertwende gibt es zahlreiche Bemühungen, die Luftverunreinigungs-komponenten nach Art und Menge analytisch zu erfassen. In den Jahren der örtlich begrenzten hohen Luftbelastung, vornehmlich durch Schwefeldioxid, neigte man zu der Auffassung, dass am Wirkungsort gemessene abnormal hohe Werte pflanzenschädlicher Industrieabgase beweiskräftiger seien als die Schädigungssymptome selbst. Heute weiß man, dass die Einwirkungs- und Reaktionsformen von Immissionen sehr vielfältig und die Wechselwirkungen zwischen Schadstoff, Pflanze und den schad- bzw. resistenzbestimmenden meteorologischen, physiologischen und standörtlichen Faktoren relativ kompliziert sind; dadurch wird die Ermittlung und Handhabung der so genannten toxischen Grenzkonzentrationen außerordentlich schwierig. Die Wirkung oder Schädigung selbst muss stets an der Pflanze festgestellt werden; es ist nicht möglich, sie aus der Überschreitung festgelegter Grenzwerte der Immissionsbelastung abzuleiten oder aus deren Unterschreitung die Abgase als Schädigungsursache auszuschließen [3]. Hinsichtlich des Zusammenwirkens der o. g. vielfältigen Faktoren besteht weiterer Forschungsbedarf.

Nach jeder Messung von Schadstoffkonzentrationen benötigt man Beurteilungskriterien, die eine Bewertung der gemessenen Werte ermöglichen. Hierzu bestehen prinzipiell mehrere Wege:

- Vergleich mit Grenzwerten (gesetzlich festgelegte Höchstwerte für Schadstoffe, Emissionen u. a.)
- Vergleich mit Richtwerten (sie haben orientierenden Charakter, sollten in der Praxis eingehalten werden und bei Überschreitung Maßnahmen nach sich ziehen)
- Vergleich mit emittentfernen Referenzmessungen (Hintergrundbelastung).

Für die Bewertung gemessener Schadstoffwerte in der Luft existieren eine Reihe gesetzlicher Grenzwerte; sie sind in der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft und der 22. Verordnung zur Durchführung des BImSchG, die die EU-Richtlinien in deutsches Recht umsetzt, festgelegt. Die Grenzwerte dienen in der Regel dem Schutz der menschi-

chen Gesundheit und in einigen Fällen auch explizit dem Schutz der Vegetation. Innerhalb der Richtwerte soll insbesondere die VDI-Richtlinie 2310 erwähnt werden, die maximale Immissions-Werte zum Schutze des Menschen, der Vegetation sowie der landwirtschaftlichen Nutztiere enthält. Beim Schutzgut Vegetation hat sie zum Ziel, die Vegetation in ihren verschiedenartigen Funktionen zu schützen: als Wirtschaftsobjekt in der Land- und Forstwirtschaft sowie im Gartenbau, als Bestandteil naturbelassener Ökosysteme und als Genreservoir [9]. Im Fall des Schutzguts Vieh sind die Richtwerte an einer Beeinträchtigung der tierischen Gesundheit bzw. Leistungsfähigkeit sowie an einer unerwünschten Kontamination der vom Tier stammenden Lebensmittel orientiert. In den Fällen, in denen keine Grenz- oder Richtwerte für einen Schadstoff vorliegen, lassen sich Messergebnisse an Hand von Vergleichswerten interpretieren, die an unbelasteten Referenzstationen gewonnen worden sind.

Zur Interpretation der Ergebnisse aus Bioindikationsuntersuchungen bestehen bislang in Deutschland keine speziellen Grenz- und Richtwerte [29]. Daher fand die Bewertung der Messergebnisse im vorliegenden Bericht ersatzweise auf anderen Wegen statt. Zum einen wurden die Ergebnisse der Weidelgras-Untersuchungen, der IRMA-Messungen und des Biomonitorings Biebesheim mit den an emittentfernen Referenzstandorten ermittelten Werten verglichen. Zum anderen wurden Richtwerte aus benachbarten Fachgebieten herangezogen. Für die Beurteilung der Ergebnisse von Bioindikationsuntersuchungen mit der standardisierten Graskultur wurden die oben bereits erwähnten Maximalen Immissions-Werte zum Schutz der landwirtschaftlichen Nutztiere der VDI-Richtlinie 2310 [34] verwendet. Da die in diesem Zusammenhang betrachteten Stoffe überwiegend mit dem Futter (d. h. nicht direkt aus der Luft) von den Tieren aufgenommen werden, sind die Richtwerte nicht pro m³ Luft, sondern pro kg Futter angegeben. Deshalb sind sie als Maßstab für die im Weidelgras erhaltenen Schadstoffgehalte geeignet. Es ist davon auszugehen, dass das Weidevieh ungefährdet ist, wenn die Richtwerte in der standardisierten Graskultur nicht überschritten werden.

Tabelle 5 enthält die Richtwerte für Fluor, Blei, Cadmium, Nickel sowie Vanadium in Viehfutter [34] (es wurden hier nur die Stoffe aufgenommen, die auch im Weidelgras untersucht worden sind). Die VDI-

Tab. 5: Richtwerte für den Schadstoffgehalt in Viehfutter als Beurteilungskriterium für Erhebungen mit der standardisierten Graskultur [34]

Komponente	Richtwert* [µg/g TS]	VDI-Richtlinie 2310 Blatt-Nr. (Jahr)
Fluor (F)	30	Blatt 26 (2001)
Blei (Pb)	25	Blatt 27 (1998)
Cadmium (Cd)	0,6	Blatt 28 (1996)
Nickel (Ni)	50	Blatt 30 (1991)
Vanadium (V)	10	Blatt 34 (1996)

* bezogen auf 88 % Trockenmasse

Richtwerte sind für einzelne Vieharten getrennt abgeleitet; in der Tabelle sind die für erwachsene Rinder gültigen Werte aufgeführt. Bei manchen Stoffen sind für andere Tierarten strengere Richtwerte vorgesehen, z. B. gilt für Blei in Schweinefutter ein Wert von 5 µg/g TS. Die in der Tabelle aufgeführten VDI-Richtlinien zum Schutz der landwirtschaftlichen Nutztiere sind erst in den 90er Jahren veröffentlicht worden; daher mussten in früheren Luftreinhalteplänen (z. B. in [35]) häufig vorläufige VDI-Richtwerte oder auch von Sachverständigen erarbeitete Werte (wie z. B. die von [39]) herangezogen werden. – Für Arsen wurde die Bewertung auf Grund der in der Futtermittelverordnung [40] genannten Grenzwerte vorgenommen. Hiernach beträgt die zulässige Höchstmenge von Arsen in Einzel- oder Alleinfuttermitteln 2 µg/g TS.

Die Elementkonzentrationen in Weidelgras wurden außerdem anhand der Schweizer Studie „Kriterien

zur Beurteilung einiger Schadstoffgehalte von Nahrungs- und Futterpflanzen“ [32] bewertet. Die Angaben zu den Stoffen, die in Hessen im Weidelgras bestimmt wurden, sind in Tabelle 6 zusammengestellt; sie finden sich außerdem z. B. in [47]. Anhand dieser Kriterien lassen sich Konzentrationsspannen einzelner Elemente in Nahrungs- und Futterpflanzen beispielsweise als normal, leicht oder stark erhöht charakterisieren. Im Fall „leicht erhöht“ liegen die Konzentrationen unterhalb des Höchstwerts für Menschen und die Pflanzen sind ohne Bedenken verwertbar. Bei „stark erhöht“ befinden sie sich oberhalb des Höchstwerts für Menschen, jedoch unterhalb des tolerierbaren Maximalgehalts für Tiere; die Pflanzen sind nur eingeschränkt verwertbar. Im Fall „sehr stark erhöht“ liegen die Konzentrationen oberhalb des maximal tolerierbaren Gehalts für Tiere, weshalb das Pflanzenmaterial nicht verfüttert werden soll.

Einige weitere Richtwerte, die in diesem Bericht keine Anwendung fanden, sollen noch kurz erwähnt werden. Die Richtwerte der Zentralen Erfassungs- und Bewertungsstelle des Bundesgesundheitsamts [33] stellen Höchstwerte für Lebensmittel dar; neben Schwermetall-Richtwerten für Fleisch- und Molkereiprodukte kommen hier u. a. auch Höchstwerte für Grünkohl vor, die man grundsätzlich für Bioindikationsuntersuchungen mit Grünkohl heranziehen könnte. In [31] sind begrenzte Werte für den mittleren Schadstoffgehalt in Weidelgraskulturen aufgeführt, die dem Schutz von Pflanzen dienen.

Tab. 6: Beurteilungskriterien für Schadstoffkonzentrationen in Nahrungs- und Futterpflanzen [32]

Belastungsgrad	Konzentration [µg/g TS]					
	Fluor	Blei	Cadmium	Nickel	Arsen	Vanadium
normal in unbelastetem Gebiet	bis 5	bis 0,5	bis 0,2	bis 2,5	bis 1,5	bis 10
normal in Ballungsgebieten	5–20	0,5–1	0,2–0,5	2,5–5	oft über 2	bis 10
leicht erhöht	20–30	1–10	0,2–0,5	5–10	2–10	10–30
stark erhöht	30–100	10–30	0,5–1	10–50	10–50	30–300
sehr stark erhöht	über 100	über 30	über 1	über 50	über 50	über 300