

Aus der Sektion Biowissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Wissenschaftsbereich Geobotanik / Botanischer Garten
(Leiter des Wissenschaftsbereiches: Prof. Dr. R. Schubert)

Ausgewählte pflanzliche Bioindikatoren zur Erfassung ökologischer Veränderungen in terrestrischen Ökosystemen durch anthropogene Beeinflussung unter besonderer Berücksichtigung industrieller Ballungsgebiete

Von

Rudolf Schubert

Mit 14 Abbildungen

(Eingegangen am 9. Juni 1977)

Im biologischen Test (Biotest) wird unter Zuhilfenahme bestimmter Testorganismen (Bioindikatoren) die biologische Aktivität eines Stoffes sowohl in seiner Kurzzeit- als auch in seiner Langzeitwirkung gemessen. In dieser Hinsicht sind alle Organismen Bioindikatoren für gegebene Umweltfaktoren. Im folgenden sei aber nur auf die Bioindikation von Umweltnoxen näher eingegangen, wie sie bei Untersuchungen der wissenschaftlichen Mitarbeiter des WB Geobotanik und Botanischer Garten der Sektion Biowissenschaften der MLU Halle-Wittenberg im Rauchschadensgebiet der Dübener Heide und auf dem Versuchsfeld Etzdorf nachgewiesen werden konnten.

Physikalische und chemische Messungen der Umweltschadstoffe ergeben genaue quantitative Werte der Noxen, ohne allerdings deren Wirkung auf lebende Organismen erfassen zu können. Bioindikatoren dagegen ermöglichen, diese Wirkungen genau zu erkennen. Dafür wird die Quantität der Umweltnoxen nur mittelbar über deren biologische Wirkung bei den real vorhandenen übrigen Umweltverhältnissen erfaßt, bei Vorliegen mehrerer Noxen in der Regel deren komplexe Wirkung auf Organismen (vgl. Dässler 1976).

Neben den einzelnen Umweltnoxen gehen also stets auch die jeweilig gegebenen, nicht toxischen Standortfaktoren in die biologische Wirkung und damit in die Bioindikation ein. Es ist dabei zwischen sensitiven und akkumulativen Bioindikatoren zu unterscheiden. Während erstere empfindliche Reaktionen gegenüber Schadstoffen zeigen, reichern letztere diese Stoffe ohne erkennbare Schädigung an (Steubing, L., u. Kunze, Ch. 1972).

Die Bioindikation erfolgt auf verschiedenen Organisationsstufen des organisches Lebens (Makromoleküle, Zelle, Organ, Organismus, Population, Coenose, Biogeocoenose), wobei mit steigender Organisationshöhe die Komplexität der lebenden Materie und ihre Wechselbeziehungen zu den Standortfaktoren zunehmen. Die Bioindikation der niedrigeren Organisationsstufen wird dabei dialektisch in die Bioindikation der höheren Organisationsstufen eingeschlossen, in der sie sich in einer neuen Qualität darstellt.

Stufen der Bioindikation sind:

1. Stufe: biochemische und physiologische Reaktionen auf Umweltnoxen
2. Stufe: anatomische, morphologische und biorhythmische Abweichungen

3. Stufe: floristische und chorologische Änderungen
4. Stufe: coenotische Änderungen
5. Stufe: Biogeocoenose-Änderungen
6. Stufe: Landschafts-Veränderungen

Hinsichtlich der Anwendbarkeit haben wir drei Schwierigkeitsklassen zu unterscheiden:

- Schwierigkeitsklasse I: Leicht anwendbar, auch von Nichtbiologen
- Schwierigkeitsklasse II: Ohne Laborkapazität, aber nur von Biologen oder biologisch Ausgebildeten anderer Fachdisziplinen anwendbar
- Schwierigkeitsklasse III: Nur bei Laborkapazität und nur von Biologen oder anderen Naturwissenschaftlern anwendbar

An die Bioindikation sind vier Grundforderungen zu stellen:

1. Die Bioindikation muß relativ schnell durchführbar sein.
2. Die Bioindikation muß ausreichend genaue und reproduzierbare Ergebnisse bringen.
3. Die zur Bioindikation verwendeten Objekte sollten nach Möglichkeit in großer Zahl und in einheitlicher Qualität zur Verfügung stehen.
4. Der Fehlerbereich der Bioindikation sollte im Vergleich zu anderen Testverfahren nicht größer als $\pm 20\%$ sein.

I. Beispiele für die Bioindikatoren der 1. Indikationsstufe (biochemische und physiologische Reaktionen)

Hypogymnia physodes, eine Blattflechte, wurde auf Holztafeln, in die 12 Vertiefungen eingebohrt wurden, mit Stahlstiften befestigt und im Rauchschadensgebiet der Dübener Heide in gleicher Höhe und Exposition an Baumstämmen oder Holzstäben befestigt. Für das Ausbringen wurde zur Auswahl der Standorte die von der TU Dresden, Sektion Forstwirtschaft, Bereich Pflanzenchemie Tharandt, erarbeitete Schadzoneneinteilung der Dübener Heide (Forschungsbericht 1975) verwendet (Abb. 1) (Lux 1968, Däßler 1976). Nach einer gewissen Zeit der Exposition waren morphologisch deutliche Schädigungsunterschiede zu erkennen. In bestimmten Zeitabständen wurde die Absterbequote bestimmt.

- durch Ermittlung der Farbänderung des Flechtenlagers mit Farb- oder Infrarotfilm
- durch mikroskopische Bestimmung des Prozentsatzes geschädigter Algenzellen
- durch Ermittlung des Chlorophyll a- und b-Gehaltes, des Phaeophytin-Gehaltes, des Eiweiß- und Gesamtkohlenhydratgehaltes.

Die Ergebnisse zeigten bei Chlorophyll a und b sowie bei Gesamtkohlenhydrat eine sehr gute Indikation der SO₂-bedingten Schadzonen. Eine deutlich geringere Eignung zur Bioindikation weisen Phaeophytin und Eiweiß auf (Abb. 2 u. 3).

II. Beispiele für die Bioindikatoren der 2. Indikationsstufe (morphologisch-anatomische Änderungen)

Bei morphologischen Untersuchungen an Waldkiefern in den verschiedenen Schadzonen der Dübener Heide zeigte sich eine sehr deutliche Differenzierung hinsichtlich der Lebensdauer der Nadelblätter. Während in den wenig SO₂-beeinflussten Gebieten die Nadeln vier Jahre alt werden, sinkt in den am stärksten beeinflussten Gebieten die Lebenserwartung auf ein Jahr ab. Es konnten so 7 Lebensdauerklassen gebildet werden (Abb. 4). Die durch SO₂ verursachten Schadbilder an den Nadeln selbst ermöglichten das Aufstellen von Nekroseklassen, die durch die Kombination von 6 Nekrose-

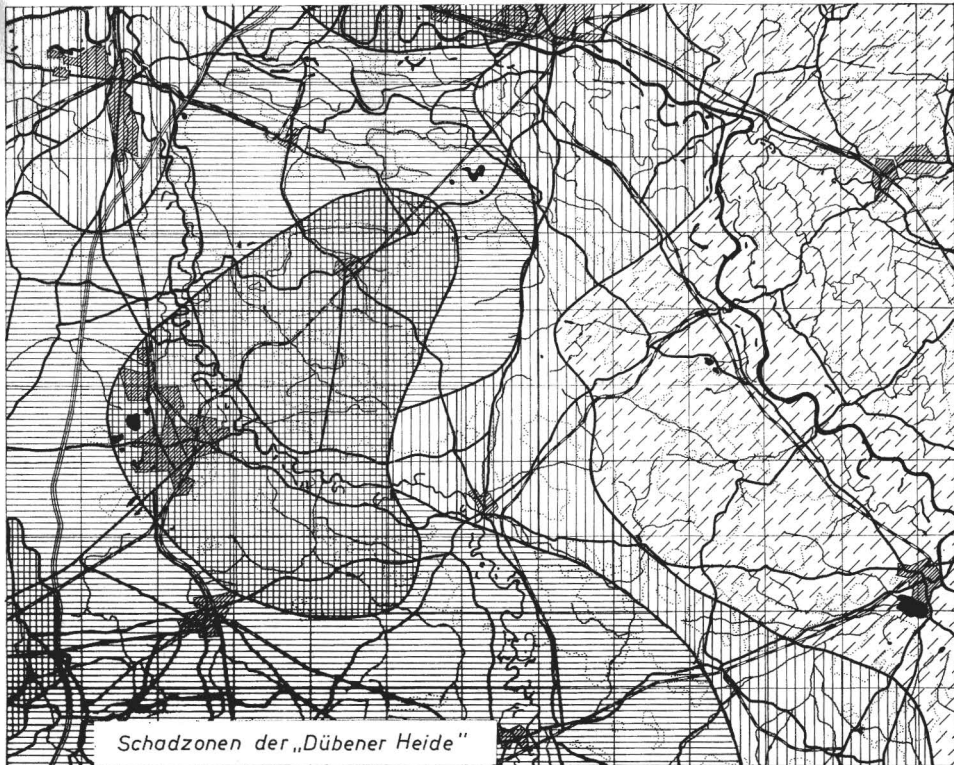


Abb. 1. Schadzonen im Bereich des Raumes Bitterfeld und Dübener Heide (nach Lux 1975, TU Dresden, Sekt. Forstwirtschaft, Ber. Pflanzenchemie)

stufen an den verschiedenen alten Jahrgängen gebildet werden konnten (Abb. 5). Mit diesen morphologischen Schadbildern gehen anatomische Veränderungen in den Nadeln einher. Meist von einer Spaltöffnung ausgehend, ergeben sich umfangreichere Zonen absterbender Zellen, die eine Braunfärbung aufweisen. Zu diesen Parametern, wie Lebensdauerklassen und Nekroseklassen, wurden zusätzlich Nadellänge und der jährliche Zuwachs der Triebe in cm gemessen.

Die Ergebnisse lassen deutlich Beziehungen zwischen Schadzonen, Lebensdauerklassen und Nekroseklassen erkennen. Es fällt jedoch auf, daß die Probenstelle 5 (es wurden an jeder Entnahmestelle 100 Proben getestet) durch die besten Werte ausgezeichnet ist. Dieser Standort ist etwas frischer als die anderen Entnahmestellen. Es kommt hier deutlich der Einfluß der Standortsfaktoren auf die Indikation zum Ausdruck (Abb. 6).

Die Nadellänge zeigt keine sehr deutlichen Beziehungen zu den Schadzonen, es läßt sich sogar nachweisen, daß im mittleren Schadbereich die Nadeln etwas länger werden. Hierin ist eventuell ein Kompensationseffekt zu sehen. Die Nadeln werden zwar nicht so alt, aber die Baustoffe des Gehölzes werden dafür für ein größeres Wachstum verwendet. Dieser Effekt, den wir übrigens auch an anderen Gehölzen beim Vergleich zwischen den Botanischen Gärten Halle und Tharandt nachweisen konnten, läßt sich auch beim jährlichen Triebzuwachs erkennen. Hier wird auch deutlich, daß der von Jahr zu Jahr sich ändernde Triebzuwachs, großklimatisch bedingt, den Indikationswert nicht außer Kraft setzt, wenn man den jeweiligen Jahrgang als solchen zur Indikation verwendet.

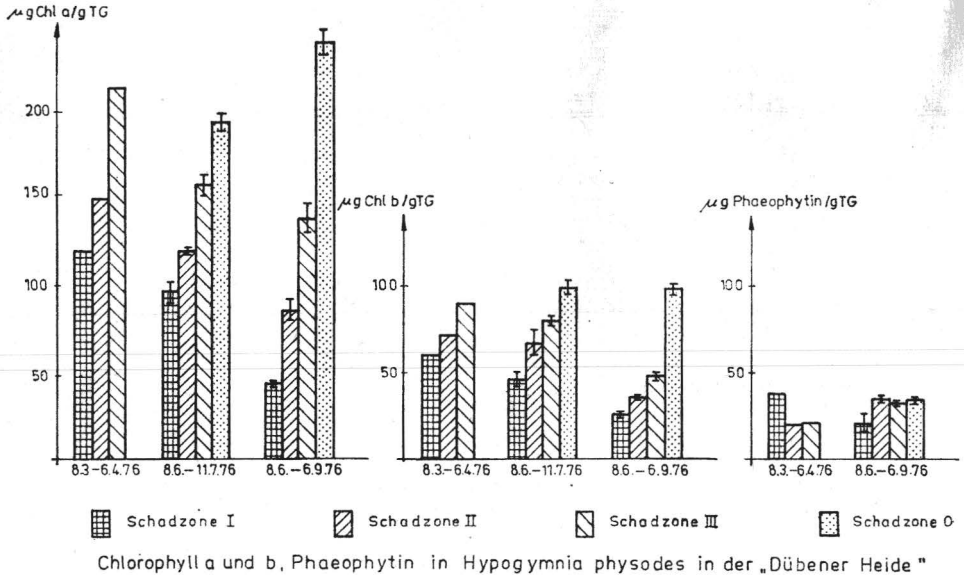


Abb. 2. Chlorophyll a und b, Phaeophytin in *Hypogymnia physodes* nach verschieden langen Expositionszeiten in unterschiedlichen Schadzonen der Dübener Heide (Entwurf von S. Heins)

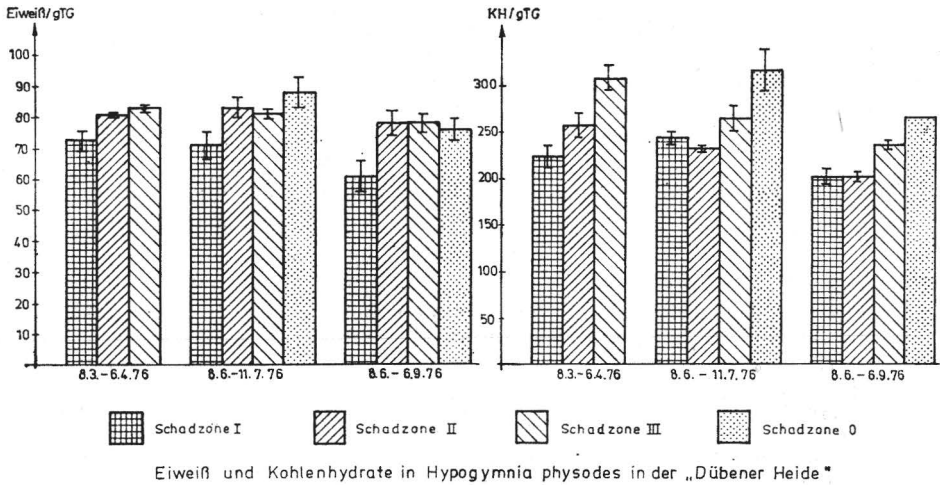


Abb. 3. Eiweiß und Kohlenhydrate in *Hypogymnia physodes* nach verschieden langen Expositionszeiten in unterschiedlichen Schadzonen der Dübener Heide (Entwurf von S. Heins), „Mengenangaben in mg“

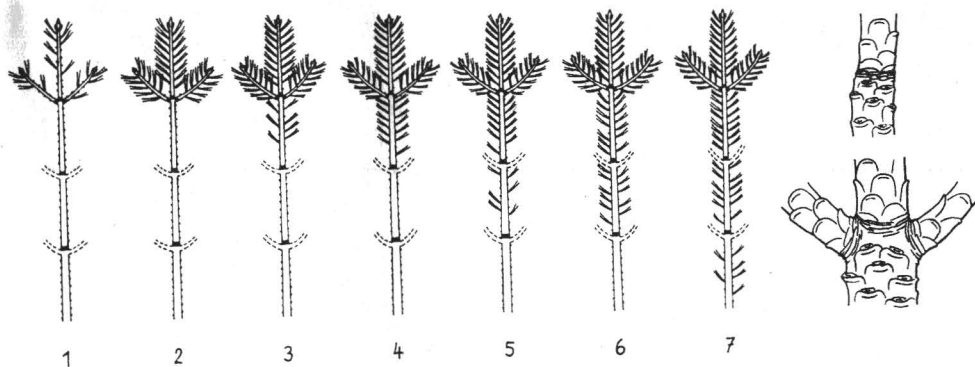


Abb. 4. Lebensdauerklassen der Nadelblätter bei *Pinus sylvestris* im Schadgebiet der Dübener Heide (Entwurf von E. Jäger)

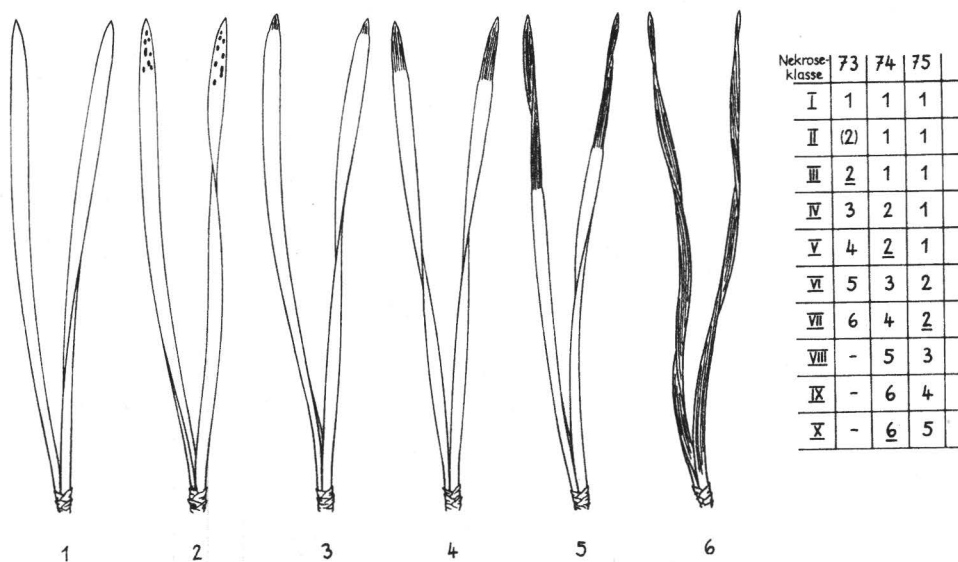


Abb. 5. Durch SO_2 bedingte Schadbilder und Nekroseklassen bei *Pinus sylvestris* im Schadgebiet der Dübener Heide (Entwurf von E. Jäger)

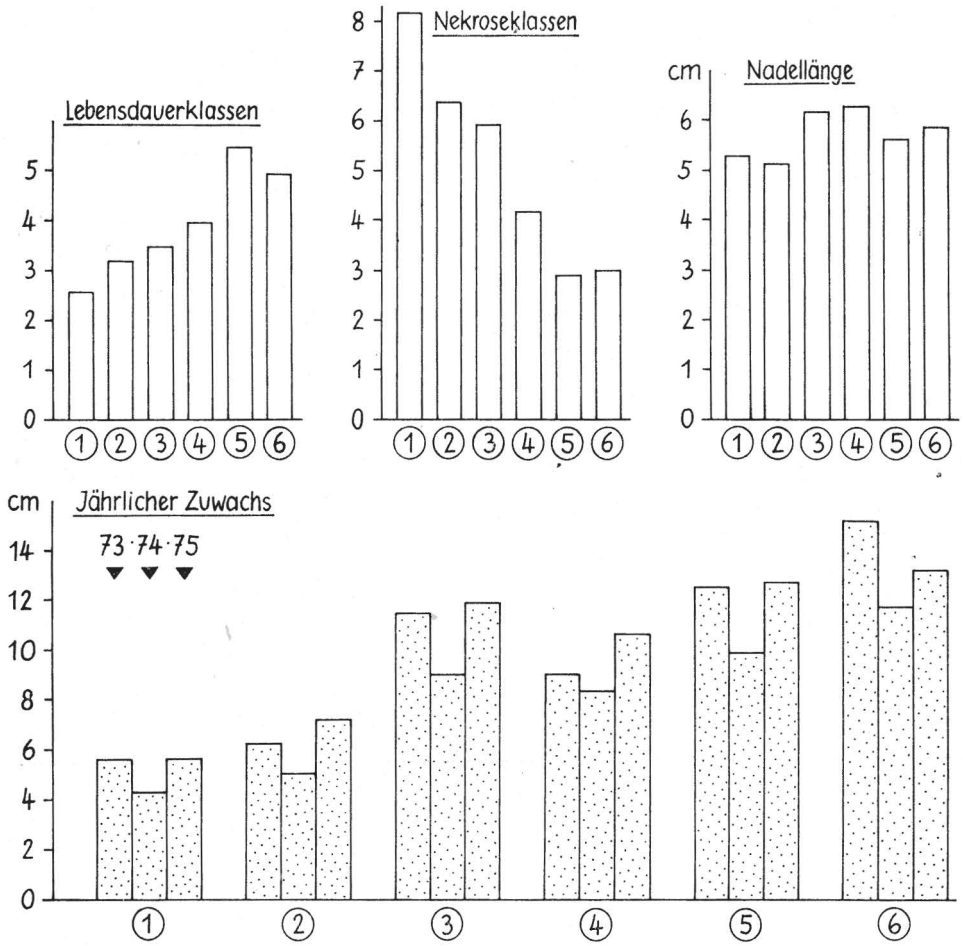
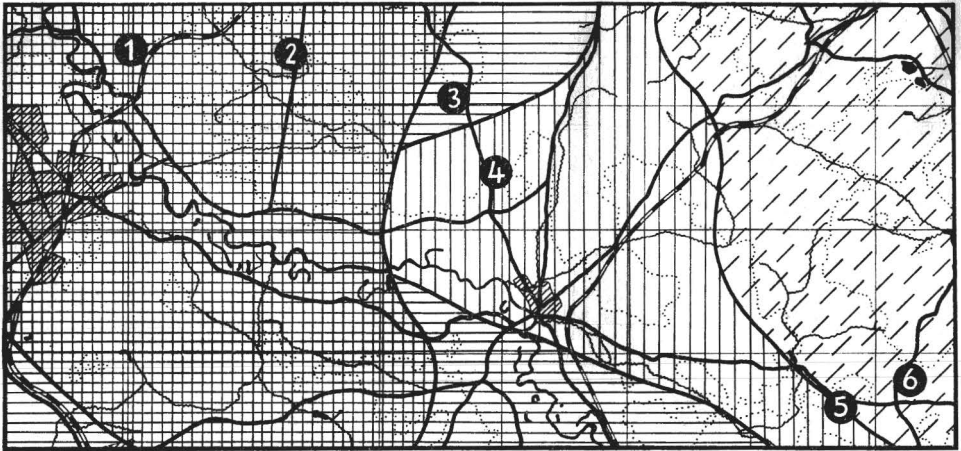
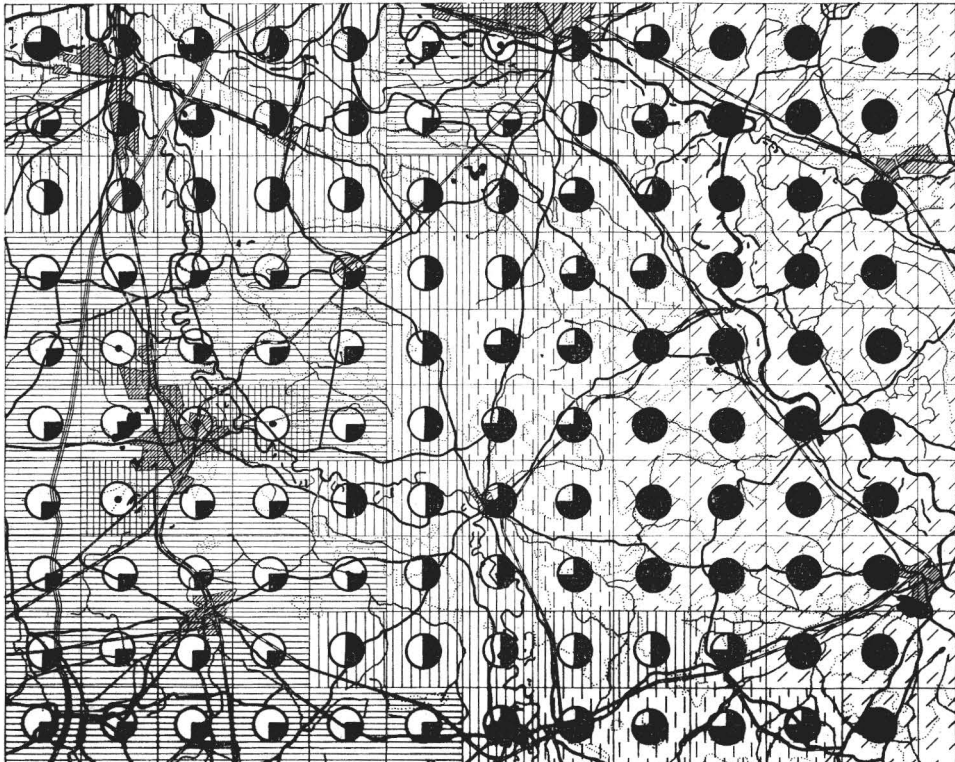


Abb. 6. Ergebnisse der morphologischen Untersuchungen an *Pinus sylvestris* in den unterschiedlichen Schadzonen der Dübener Heide (Entwurf von E. Jäger)

III. Beispiele für die Bioindikation der 3. Indikationsstufe (floristisch-chorologische Änderungen)

Als Beispiel für die quantitative floristische Erfassung der Verbreitung von Bioindikatoren sei die Verbreitung von *Lecanora varia* und *L. conizaeoides* im Rauchschadensbereich der Dübener Heide vorgestellt. 10 erwachsene, freistehende Bäume, möglichst verschiedene Arten, wurden in jedem Rasterquadrat auf die Artmächtigkeit und Frequenz des Besatzes dieser Krustenflechten hin untersucht und der mittlere Dominanzwert in den in Abb. 7 angegebenen Stufen eingetragen. Es ergaben sich daraus Flächen gleichen Flechtenbesatzes, die sehr gut mit den Schadzonen, die von Tharandt aus erarbeitet wurden, übereinstimmen. Unterschiede zeigen sich in den Ackerlandschaften, wo wir mit dieser Kartierung nachweisen können, daß der Schadeinfluß des Leipziger-Hallenser-Ballungsraumes in diesen offenen Landschaften wesentlich weiter geht als in den Schadbereichen um Bitterfeld, Dessau und Wittenberg. Hier bewirken die Wälder der Umgebung offenbar eine schnellere Abschwächung der Schadfaktoren. Es ist somit auch hier die positive Wirkung von Gehölzbeständen auf die Luftreinheit zu erkennen.



Frequenz und Dominanz von *Lecanora conizaeoides* und *Lecanora varia*
in der „Dübener Heide“

○ ohne L.c. und L.v. ◐ < 1% ◑ 2-10% ◒ 11-25% ◓ 26-40% ● > 40%

Abb. 7. Quantitative Verbreitung von *Lecanora conizaeoides* und *L. varia*

im Schadgebiet Bitterfelds und der Dübener Heide (Entwurf von R. Schubert)

Es bedeuten: ○ ohne Flechtenbesatz, ◐ < 1%, ◑ 2-10%, ◒ 11-25%, ◓ 26-40%, ● 40%

IV. Beispiele für die Bioindikation der 4. Indikationsstufe (coenotische Änderungen)

Die Verwendung der coenotischen Strukturen zur Erfassung von anthropogen bedingten Änderungen in unseren Landschaften ist bekannt. An einigen Untersuchungsmethoden, die für die Indikation der natürlichen Wiederbewaldung von Naturschutzgebieten mit Xerothermstandorten, die zahlreiche geschützte Pflanzen und Tiere beherbergen, verwendet wurden, seien diese Möglichkeiten aufgezeigt (Knapp, H.-D., u. Reichhoff, L. 1975, Schubert, R. 1976).

Nach wie vor ist die Vegetationskarte sowohl im kleinen als auch im großen Maßstab eine sehr wertvolle Hilfe bei der exakten räumlichen und zeitlichen Festlegung bestimmter Vegetationseinheiten, da mit ihr Änderungen in der coenotischen Struktur nach Wiederholungsaufnahmen festgestellt werden können (Abb. 8). Schematische Vegetationsprofile (Abb. 9), genau eingemessen und festgelegt, ergänzen diese Kartierungen. Luftbildaufnahmen nach bestimmten Gesichtspunkten, wie im NSG Leutratal (Abb. 10) z. B. hinsichtlich der Gehölzausbreitung ausgewertet, ermöglichen ein rasches Feststellen der Vegetationsdynamik (Schanda, E. 1976).

V. Beispiele für die Bioindikation der 5. Indikationsstufe (Ökosystem-Änderungen)

Die Wirkung von Herbiziden auf ein Agroökosystem wird durch die folgenden Darstellungen der Dominanzstrukturen, der Komplexität und Evenness von Unkrautgemeinschaften deutlich (Helmecke, K., u. Mahn, E.-G. 1976).

In Abbildung 11 ist die Dominanzstruktur von Unkrautgemeinschaften (*Euphorbio-Melandrietum*) auf der Versuchsfläche des Universitätsversuchsgutes Etzdorf bei Halle dargestellt. Es ist zu erkennen, daß im Juni 1970 vor dem Herbizideinsatz das Bild noch völlig ausgeglichen ist, lediglich die Artenzahl ist in zwei Parzellen etwas geringer. Im Juli des gleichen Jahres ist die Dominanzstruktur der mit einfacher Herbiziddosis behandelten Fläche gegenüber der Kontrolle annähernd gleich. Die mit doppelter Herbiziddosis behandelte Fläche weist eine etwas geringere Artenzahl auf und weniger rezedente, also nicht dominante Arten. Nach vierjähriger Behandlung der Parzellen mit den angegebenen Herbizidmengen ist 1974 die Änderung in der Dominanzstruktur deutlich zu erkennen (Abb. 12). Die mit doppelter Dosis behandelten Parzellen weisen die geringste Artenzahl auf, aber ein absolutes Vorherrschen dominanter Arten. Rezedente Arten sind nur noch in den beiden anderen Parzellen vorhanden, wobei naturgemäß die Menge und Anzahl der nicht dominanten Arten in der Kontrollfläche am höchsten ist.

Die Änderung der Komplexität (H) der Primärproduzenten des Agroökosystems ist aus der in Abb. 13 untenstehenden Kurve zu ersehen. Die Kurve für die Kontrolle $N(x)$ gibt die jahreszeitliche Schwankung der Komplexität wieder. Für die mit einfacher Herbizidmenge versehene Fläche $E(\bullet)$ ergibt sich eine deutliche Reduktion der Komplexität. Der gleiche Rückgang ist in der Evenness-Kurve (reale Komplexität zur maximal möglichen Komplexität bei der gegebenen Artenzahl) der E -Parzelle zu erkennen, der sich aus der Reduktion der Individuenzahlen von rezedenten Arten ergibt.

Anders gestalten sich die Verhältnisse in den mit doppelter Herbiziddosis behandelten Parzellen $D(\Delta)$. Ausgehend vom gleichen H -Wert wie in der Kontrolle finden wir bereits einen starken Rückgang der Komplexität und Evenness nach der Herbizid-anwendung 1970. Die rezedenten Arten treten in der Individuenzahl zurück. Nach der Anwendung von Simazin liegen 1972 aber die Komplexitätsmaße bei dieser Behandlungsvariante sogar deutlich höher als in der Kontrollparzelle und bleiben es auch mit

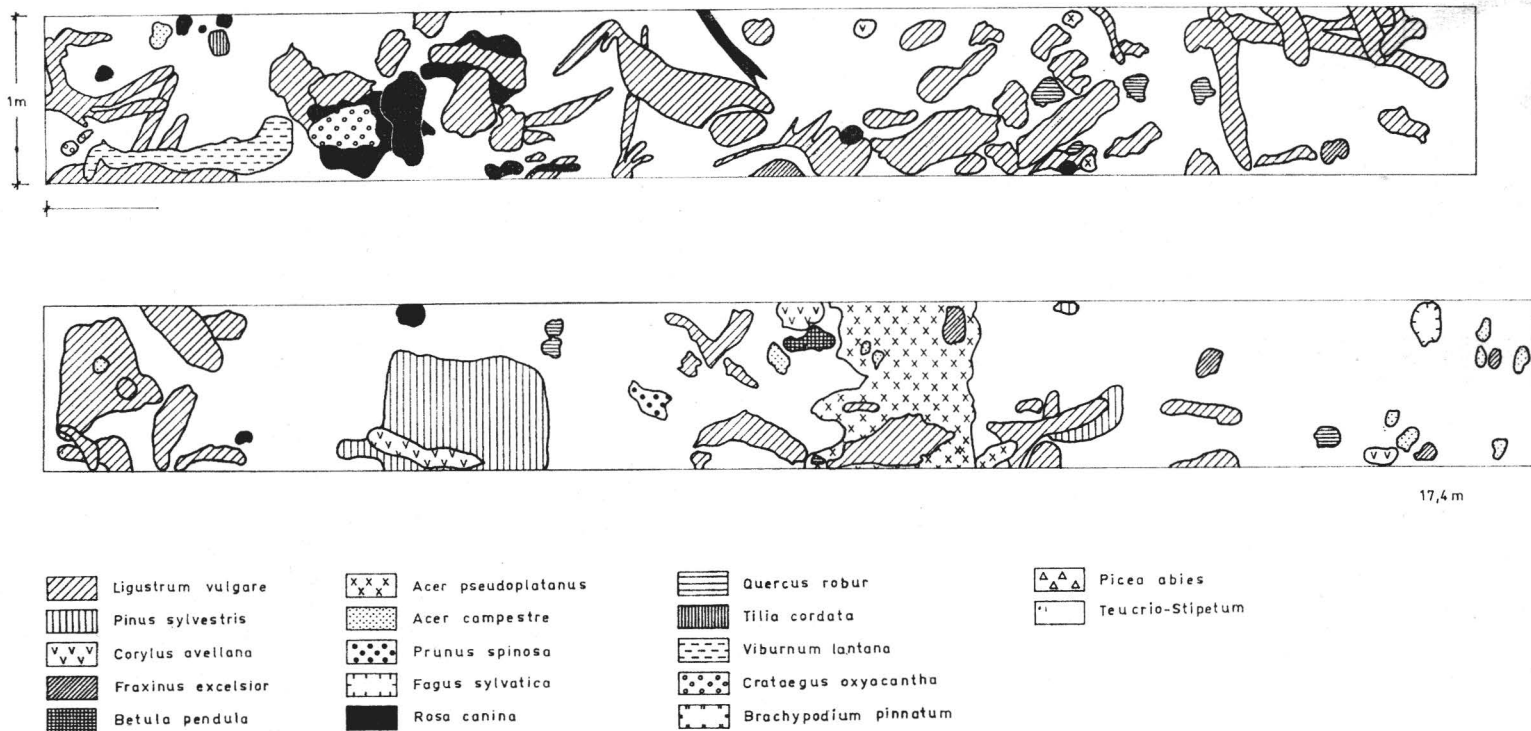


Abb. 8. Feinkartierung der Gehölzausbreitung in einem Xerothermrassen im Naturschutzgebiet Kalktal (Kyffhäuser) (Entwurf von R. Schubert)

Ausnahme der Werte vor der Herbizidapplikation 1974. Die Evenness-Werte liegen gleichfalls höher, was seinen Grund in dem Ausfall der rezedenten Arten hat.

Es handelt sich demnach bei *E* und *D* um das gleiche Phänomen des Zurückdrängens der Unkrautarten, aber in einem Fall um die Verringerung der Individuendichte der rezedenten Arten und im anderen Fall (*D*) um den Ausfall der rezedenten Arten.

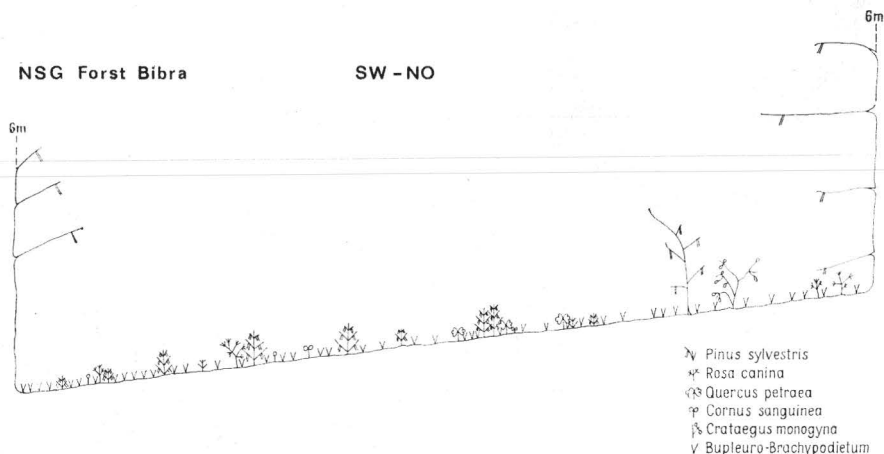


Abb. 9. Vegetationsprofil in einem Xerothermrasen des Naturschutzgebietes Forst Bibra, die Gehölzausbreitung zeigend (Entwurf von R. Schubert)

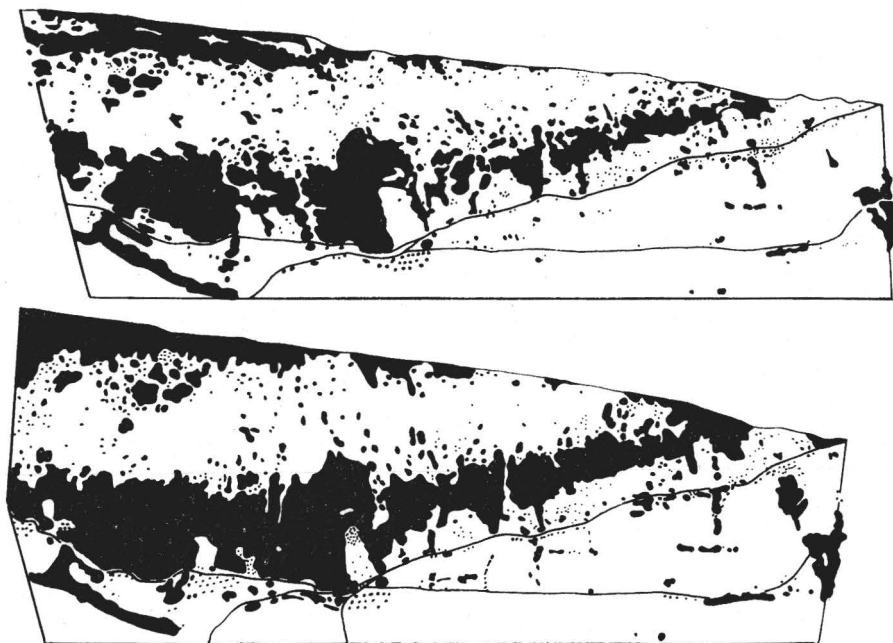


Abb. 10. Luftbildaufnahme aus den Jahren 1957 und 1967 vom Naturschutzgebiet Leutratal, die Gehölzausbreitung (schwarze Flächen = Gebüsche oder Baumbestände) zeigend (oben 1957, unten 1967) (Entwurf von H.-D. Knapp und L. Reichhoff)

Die Abb. 14 zeigt die graphische Diskrimination für den Herbizideinfluß auf Unkrautgemeinschaften, aus den Individuenzahlen der Unkräuter für die Jahre 1970 und 1974 errechnet. Es ist deutlich zu erkennen, daß 1970 die Werte der 3 Parzellen noch nahe beieinander lagen und sich gegenseitig überschnitten. Die behandelten Parzellen lagen noch in der Nähe der Kontrolle. 1974 ist ein deutliches Abrücken beider behandelter Flächen von der Kontrolle zu verzeichnen, sie unterscheiden sich demnach in ihrer Individuenzahl stark von der Kontrollfläche.

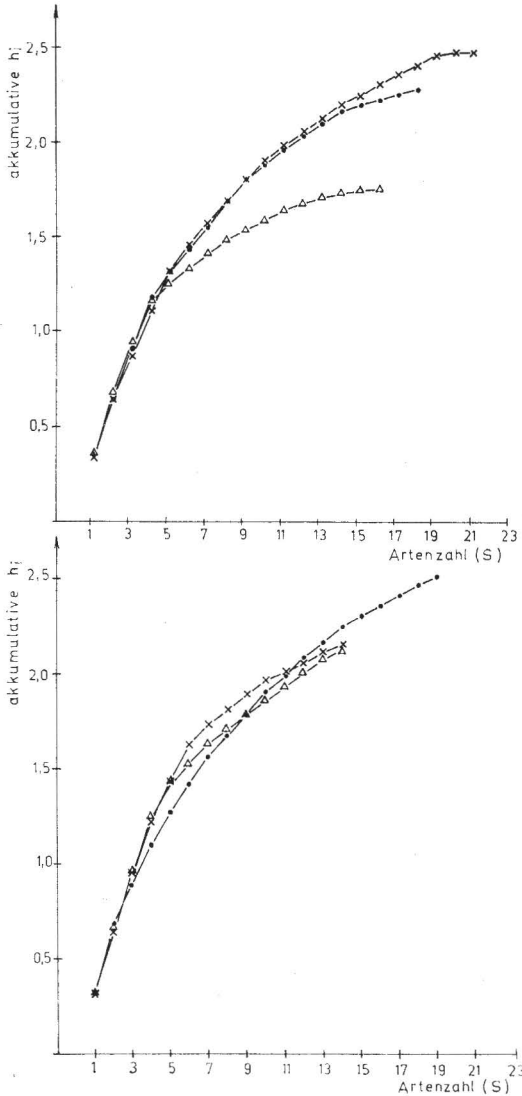


Abb. 11. Dominanzstruktur einer Unkrautgemeinschaft, berechnet aus Dauerquadratuntersuchungen [unten 15. 6. 1970, oben 4. 7. 1970 auf den Parzellen N (×), E (●), D (△)] (Entwurf von E. G. Mahn und K. Helmecke)

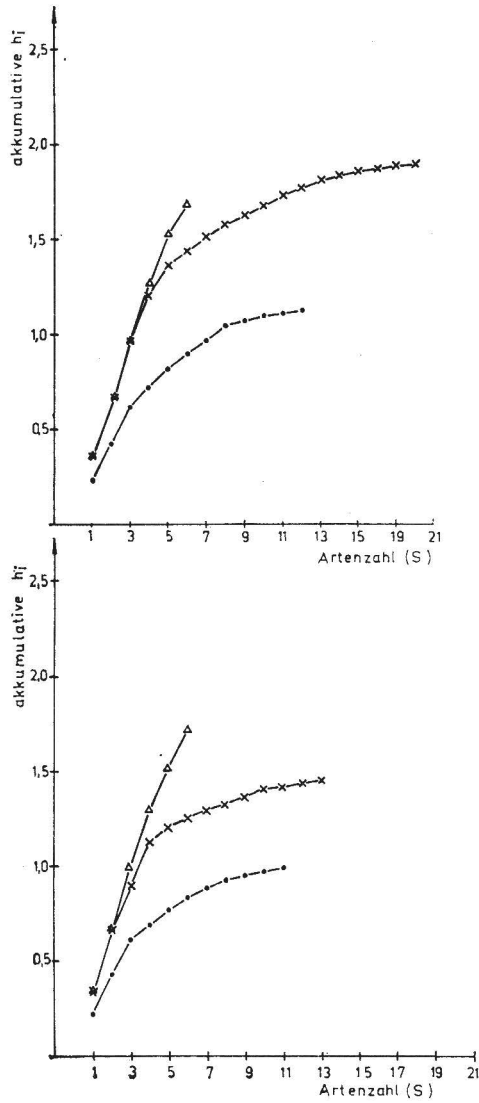


Abb. 12. Dominanzstruktur einer Unkrautgemeinschaft, berechnet aus Dauerquadratuntersuchungen [unten 2. 5. 1974, oben 30. 5. 1974 auf den Parzellen N (x), E (●), D (Δ)] (Entwurf von E. G. Mahn und K. Helmecke)

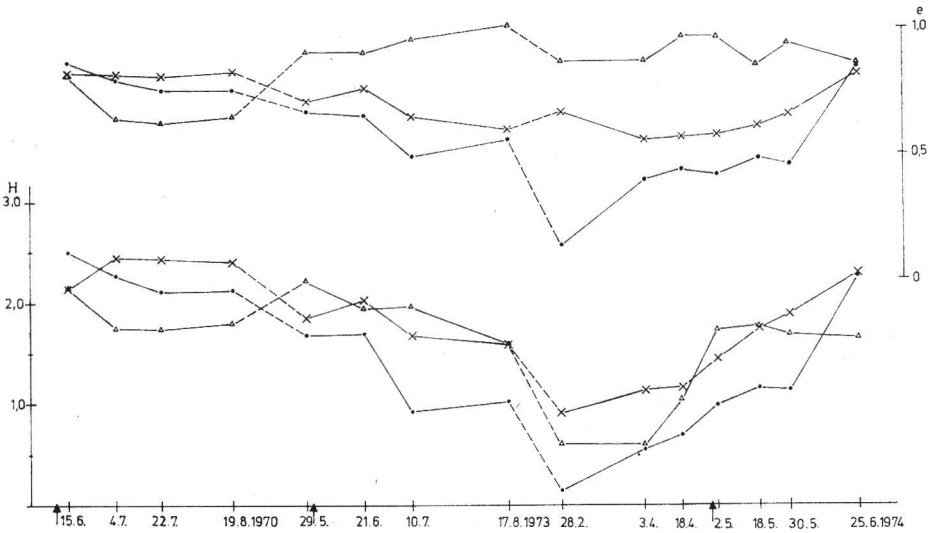


Abb. 13. Dynamik der Komplexität (H) (unten) und Evenness (E) (oben) von Unkrautgemeinschaften 1970, 1973 und 1974, basierend auf Dauerquadratbeobachtungen auf den Parzellen N (X), E (●) und D (△) (Entwurf von E. G. Mahn und K. Helmecke)

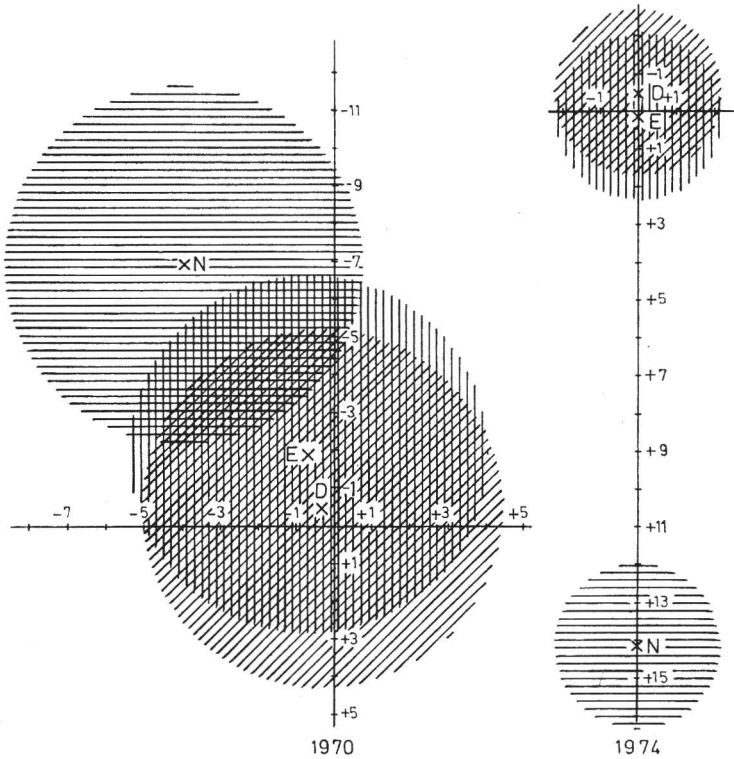


Abb. 14. Graphische Diskrimination für den Herbizideinfluß (berechnet aus Individuenzahlen der Unkräuter) (Entwurf von E. G. Mahn und K. Helmecke)

S c h r i f t t u m

- Dässler, H.-G., S. Börtitz und A. Liessner: Zur Phytotoxizität von Auftausalzen. Arch. Naturschutz u. Landschaftsforsch. **15** (1975) 69–76.
- Dässler, H.: Einfluß von Luftverunreinigungen auf die Vegetation. Jena 1976.
- Knapp, H.-D., und L. Reichhoff: Die Vegetation des Naturschutzgebietes „Leutratal“ bei Jena. Arch. Naturschutz u. Landschaftsforsch. **15** (1975) 91–123.
- Helmecke, K., und E. G. Mahn: Untersuchungen zur Wirkung eines mehrjährigen kontinuierlichen Einsatzes von Herbiziden auf die Phytozönose-Komponente von Agro-Ökosystemen. Symposium Ökologie und Pflanzenschutz, Kühlungsborn 1976.
- Leblanc, F., und N. R. Dhruva: A review of the literature on Bryophytes with respect to air-pollution. Bulletin de la Société Botanique de France **121** (1974) 237–255.
- Lux, H.: Die großräumige Abgrenzung von Rauchschadzonen im Einflußbereich des Industriegebietes um Bitterfeld. Wiss. Z. Techn. Univ. Dresden **14** (1965) 433–442.
- Lux, H., und E. Pelz: Schadzone und Schadstufe als Klassifizierungsbegriffe in rauchgeschädigten Waldgebieten. Soz. Forstwirtschaft **18** (1968) 245–247.
- Novak, R.: Vegetationsanalytische und experimentell-ökologische Untersuchungen über den Einfluß der Luftverunreinigung auf rindenbewohnenden Flechten. Diss. Tübingen 1973.
- Odaïra, T.: Photochemical smog in Tokyo. Tokyo 1972.
- Ranft, H., und H. Dässler: Rauchhärte-test an Gehölzen im SO₂-Kabinerversuch. Flora **159** (1970) 573–588.
- Ranft, H., und H. Dässler: Zur Rauchempfindlichkeit von Flechten und Moosen und ihre Verwendung als Testpflanzen. Arch. Naturschutz u. Landschaftsforsch. **12** (1972) 189–202.
- Schanda, E. (Hrsg.): Remote sensing for environmental sciences. Ecological Studies **18**, New York 1976.
- Schubert, R.: Ökologische Betrachtungsweise als Prinzip wissenschaftlicher Forschungsarbeit für die sozialistische Landeskultur. Hercynia N. F. **13** (1976) 158–163.
- Steubing, L., und Ch. Kunze: Pflanzenökologische Experimente zur Umweltverschmutzung. Biol. Arbeitsbücher **11**, Heidelberg 1972.

Prof. Dr. Rudolf Schubert
 Wissenschaftsbereich Geobotanik / Botanischer Garten
 DDR - 402 H a l l e (Saale)
 Neuwerk 21