

# Messen der örtlichen Verteilung von Substanzen im Landbau

## Die Anwendung von Markierungsmethoden

Von Ernst-G. Niemann, Hannover\*)

DK 621.039.85:626.8:631.344.8:631.531:634

Zum Messen der örtlichen Verteilung von Substanzen im Landbau ist außer der radioaktiven Indikatormethode die Indikator-Aktivierungs-Methode zu großer Bedeutung gelangt. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, die Ausbreitung von Pollen und Sporen zu bestimmen, das Strömungs- und Ausbreitungsverhalten von Luft oder von Grundwasser zu ermitteln, aber auch die Verteilung von Immissionen aus Industrieabgasen o.a.m.

Die Frage, wie schnell und auf welche Weise sich Substanzen in einem System verteilen, ist überall da von Bedeutung, wo Ausbreitungs-, Vermischungs- oder Selektionsprozesse untersucht werden; sie ist nur dann zu beantworten, wenn der auf seinem Weg zu verfolgende Stoff so gekennzeichnet ist, daß er sich auch noch nach längerer Zeit und in großer Verdünnung identifizieren läßt. Eine solche „Markierung“ hat also den Sinn, einen Stoff oder eine Gruppe von Individuen eindeutig von allen andersartigen oder gleichartigen Stoffen im System oder von allen anderen Individuen unterscheidbar zu machen.

### 1. Mechanische und chemische Markierungen

So ist z.B. die Untersuchung des Vogelzuges und der Lebensgewohnheiten von Vögeln nur dadurch möglich, daß man eine Gruppe von Vögeln beringt und damit sicherstellt, daß diese jederzeit und an jedem Ort nach ihrer Herkunft bestimmbar sind. In ähnlicher Weise lassen sich solche „mechanischen“ Markierungen beispielsweise zum Kennzeichnen von Fischen und Insekten, von Schüttgütern und Bodenschichten verwenden, wobei man jedoch streng darauf achten muß, daß die Markierung selbst – sei es ein Metallring, ein Kunststoffclip oder ein Farbtupfer – nicht den Ausbreitungs- oder Vermischungsprozeß ihrerseits beeinflußt.

Ihre Grenze findet eine solche „mechanische“ Markierung überall da, wo die zu kennzeichnenden Individuen oder Partikel zu klein sind, als daß man sie einzeln markieren könnte, oder wo es um die Aufgabe geht, Flüssigkeiten, Stäube oder Aerosole in ihrer Ausbreitung, Verteilung und Vermischung zu verfolgen; hier beginnt das Gebiet der „chemischen“ Markierung. Bei der chemischen Markierung versetzt man eine ganze Population von Lebewesen, einige Kubikmeter einer Flüssigkeit oder Staub so mit Farbstoffen, Fluoreszenzfarben, Geruchsstoffen oder anderen leicht nachweisbaren Chemikalien, daß auch kleinste Bruchteile des markierten Stoffs noch durch die Identifizierung des „Indikators“ nachweisbar sind.

Die zwei wichtigsten Kriterien für die Eignung eines solchen Markierungsstoffes sind seine Nachweisgrenze und seine „Haftung“ an der markierten Substanz. Chemische Indikatoren lassen sich im allgemeinen bis zu einer Konzentration von einigen ppm (parts per million), entsprechend einigen Milligramm je Liter, recht gut nachweisen. So kann man je nach Markierungsgrad – wie man das Anfangsverhältnis der Indikatormenge zur markierten Stoffmenge nennt – eine Verdünnung um den Faktor  $10^3$  bis  $10^5$  verfolgen.

Für den Aussagewert der Messung ist die „Haftung“ des Indikators entscheidend. Wenn man etwa den Durchtritt von Wasser durch eine Bodenschicht untersuchen will und der verwendete Markierungsstoff wird merklich am Boden adsorbiert und dadurch dem Wasser entzogen, ist die aus der Indikatorkonzentration im aufgefangenen Wasser berechnete Durchtrittsgeschwindigkeit kleiner als die wirkliche und das Meßverfahren in dieser Form nicht brauchbar. Häufig muß daher die Eignung eines Indikators für ein bestimmtes Problem vorher in Modelluntersuchungen überprüft werden.

### 2. Radioaktive Indikatoren

Einige wesentliche Vorteile bietet der Einsatz radioaktiver Indikatoren, d.h. künstlich hergestellter instabiler Isotope eines natürlich vorkommenden stabilen Elements. Diese Indikatoren unterscheiden sich chemisch vom stabilen Element gar nicht und physikalisch nur unwesentlich, lassen sich aber durch ihre beim Zerfall emittierte Strahlung außerordentlich empfindlich nachweisen. Wegen ihrer chemischen Gleichartigkeit lassen sie sich auch zu Markierungsexperimenten in chemischen oder biologischen metabolischen Prozessen verwenden: Markiert man etwa einen Phosphatdünger mit Phosphor-32, so läßt sich der aus dem Dünger aufgenommene Phosphor in der Pflanze messen und von dem aus anderen Quellen aufgenommenen Phosphor und dem bereits vor dem Versuch in der Pflanze vorhandenen unterscheiden. Ähnliche Experimente lassen sich unter Verwendung des radioaktiven Kohlenstoff-14 über die  $CO_2$ -Aufnahme im Verlauf der Photosynthese und über den Transport der Photosyntheseprodukte anstellen. Weitere Beispiele kann man in großer Zahl anführen, denn es gibt für die meisten Elemente brauchbare radioaktive Isotope – leider mit Ausnahme der biologisch wichtigen Elemente Stickstoff und Sauerstoff.

\*) Prof. Dr. rer. nat. Ernst-G. Niemann ist Leiter der Abteilung Strahlenphysik beim Institut für Biophysik der TU Hannover.

Ein weiterer entscheidender Vorteil der radioaktiven Indikatoren ist ihre außergewöhnlich niedrige Nachweisgrenze, die es mit einfachen Mitteln erlaubt, Verdünnungsfaktoren bis zu  $10^9$  zu erfassen.

Die wichtigsten Nachweisverfahren sind einerseits die Autoradiographie, die ein Verteilungsmuster des radioaktiven Indikators durch die Schwärzung einer mit der Probe in Kontakt gebrachten photographischen Schicht liefert, und zum anderen direkte quantitative Messungen mit Zählrohren oder Scintillationszählern, die sich weitgehend automatisieren lassen, und die in vielen Fällen auch die gleichzeitige Bestimmung verschiedener Indikatoren nebeneinander gestatten. So ist die radioaktive Isotopenmarkierung ein handliches und unersetzliches Werkzeug, um im Laborexperiment metabolische Prozesse und Verteilungsvorgänge zu untersuchen [1].

Bei Planung und Ausführung biologisch-landbaulicher Experimente im größeren Maßstab ergeben sich jedoch einige bedeutende Schwierigkeiten: Die Halbwertszeit des radioaktiven Indikators – d.h. die Zeit, in der seine Aktivität auf die Hälfte abklingt – ist oft zu kurz, um verhältnismäßig langsame Prozesse zu verfolgen, und die Gesamtaktivität, die man notwendigerweise einsetzen müßte, um das Versuchsziel zu erreichen, ist häufig so groß, daß ihre Verwendung zu einer unzumutbaren Strahlenbelastung der Umgebung führen würde und nach den Strahlenschutzvorschriften daher verboten ist. Dies sei an einem Beispiel erläutert: Ist die Aufgabe gestellt, die Ausbreitung und Verteilung von Kiefernpollen eines bestimmten Baumes in einem Bestand zu untersuchen, um die Verteilung von Erbeigenschaften in den Nachkommen abschätzen zu können, müssen die Pollen des zu untersuchenden Baumes von denen aller anderen Bäume unterscheidbar, also eindeutig markiert sein. Für eine solche Markierung eignet sich Phosphor besonders gut, da er bevorzugt in Pollen eingebaut wird; allerdings muß man die Markierung bereits zu einer Zeit vornehmen, in der die Pollen angelegt werden, also etwa ein halbes Jahr vor der Reife. Da das zu verwendende Phosphor-Isotop P-32 eine Halbwertszeit von ca. zwei Wochen hat, ist die Anfangsaktivität bis zum eigentlichen Experiment schon um den Faktor 4000 abgeklungen. Um bei einem ausgewachsenen Baum den Pollen so zu markieren, daß man jedes einzelne Pollenkorn nach der Blüte in der Umgebung des Baumes durch Autoradiographie nachweisen kann, müßte eine Anfangsaktivität von einigen Curie – entsprechend einigen Gramm Radium – gegeben werden. Dieser Wert liegt um den Faktor  $10^5$  über der Freigrenze; aus Strahlenschutzgründen ist eine Untersuchung in dieser Form in bewohnten Gegenden nicht möglich.

### 3. Die Indikator-Aktivierungsmethode

Ähnliche Probleme treten immer auf, wenn Freilandexperimente mit größeren Pflanzen, ganzen Pflanzenbeständen oder etwa mit Insektenpopulationen auszuführen sind. In vielen Fällen lassen sich

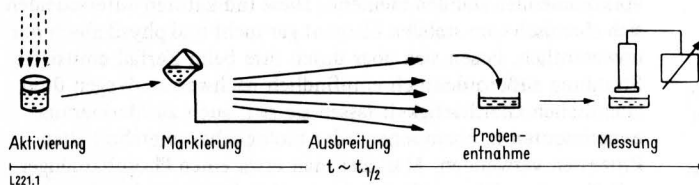
diese Schwierigkeiten umgehen, wenn man anstelle der radioaktiven Indikatoren aktivierbare Markierungsstoffe einsetzt, also die „Indikator-Aktivierungsmethode“ (IAM) benutzt [2; 3]. Bei diesem Verfahren vermeidet man die durch Halbwertszeiten und Strahlenschutzvorschriften gegebenen Beschränkungen und kann trotzdem die hohe Nachweisempfindlichkeit radioaktiver Stoffe ausnutzen, indem man die Einzelschritte des Gesamtexperiments umkehrt, Bild 1.

Bei der normalen radioaktiven Indikatormethode wird ja der später im Experiment zu verwendende Stoff zunächst in einem Kernreaktor aktiviert, dann vor dem Versuch dem Stoff zugesetzt, dessen Ausbreitung man studieren will, und schließlich die Radioaktivität des Stoffes nach der Ausbreitung in einer entnommenen Probe gemessen, Bild 1. Dabei sollte der gesamte Prozeß von der Aktivierung bis zum Messen etwa in einer Halbwertszeit ablaufen, um eine hinreichend hohe Meßgenauigkeit zu gewährleisten. Auch dann wird aber von der gesamten dem Versuch zugesetzten Aktivität nur ein kleiner Teil als Probe entnommen und gemessen, so daß die überwiegende Aktivitätsmenge nutzlos ist und nur zur radioaktiven Kontamination des Versuchsbereichs führt.

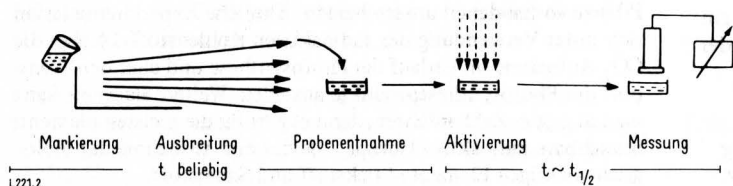
Der umgekehrte Weg wird bei der Indikator-Aktivierungsmethode beschritten: Ein aktivierbarer, aber noch nichtradioaktiver Markierungsstoff wird vor dem Experiment dem zu untersuchenden Stoff zugegeben, nach der Ausbreitung eine Probe entnommen, diese in einem Reaktor aktiviert, und die Konzentration des Indikators in der Probe dann durch die induzierte Radioaktivität gemessen, Bild 2. Man ist also während des Experiments selbst von irgendwelchen Abklingvorgängen unabhängig, so daß man die entnommenen Proben vor der Aktivierung beliebig lange lagern kann; nach der Aktivierung sollte man allerdings die Messung innerhalb der ersten Halbwertszeiten vornehmen. Da nur die entnommenen Proben aktiviert werden, erzeugt man auch nicht mehr Radioaktivität, als für den Meßvorgang erforderlich ist, den man innerhalb des Labors ausführen kann. Allerdings muß der bei der IAM verwendete Indikator einige wichtige Voraussetzungen erfüllen:

1. Er muß sich leicht aktivieren lassen (im allgemeinen durch die thermischen Neutronen eines Kernreaktors);
2. er darf in dem zu untersuchenden System von Natur aus nicht oder nur in sehr geringer konstanter Konzentration vorhanden sein und
3. er muß sich in das System in genügender Konzentration einbauen lassen, ohne es zu schädigen.

In Tafel 1 sind mehrere natürliche stabile Isotope zusammengestellt, die sich als aktivierbare Indikatoren in biologischen Versuchen eignen; für spezielle Zwecke stehen zahlreiche weitere stabile Isotope zur Verfügung.



**Bild 1.**  
Normale radioaktive Indikatormethode.



**Bild 2.**  
Indikator-Aktivierungsmethode.

**Tafel 1.** Für die Indikator-Aktivierungsmethode geeignete stabile Isotope.

Ausgangs-Isotop	Relative Häufigkeit im Isotopengemisch %	Wirkungsquerschnitt für thermische Neutronen barn*)	Tochter-Isotop	Halbwertszeit des Tochter-Isotops h
Mn-55	100	13,3	Mn-56	2,58
Co-59	100	16	Co-60	0,175
Br-79	50,5	2,9	Br-80	4,5
Br-79	50,5	8,5	Br-80m	0,29
Ag-107	51,3	45	Ag-108	0,04
In-115	95,7	155	In-116	0,90
J-127	100	5,6	J-128	0,42
Cs-133	100	3,0	Cs-134	2,9
Eu-151	47,8	1700	Eu-152	9,3
Dy-164	28,2	800	Dy-165	2,3
Dy-164	28,2	2000	Dy-165m	0,02
Lu-175	97,4	35	Lu-176	3,7

\*) 1 barn =  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>

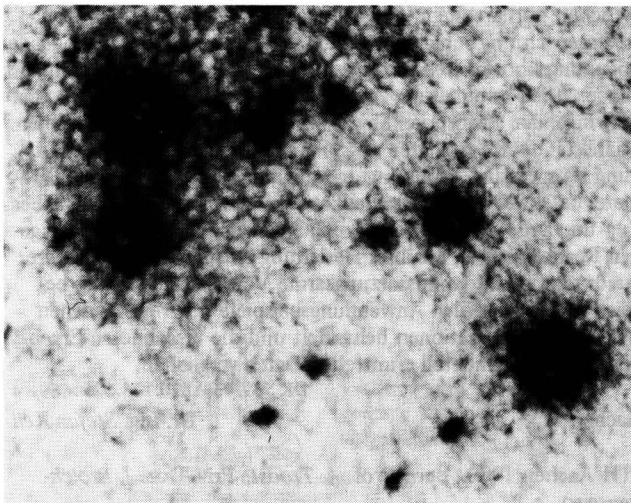
## 4. Anwendungen der IAM

### 4.1. Pollenausbreitung

Zurück zum Beispiel der Pollenmarkierung: In Vorversuchen zeigte sich, daß dreiwertige Elemente wie das Dy-164 zwar in größeren Mengen aufgenommen werden, daß sie aber bereits in recht kleiner Konzentration die sog. Gipfeldürre hervorrufen und speziell die Anlage von Blüten stark reduzieren. Das Mn-55 dagegen läßt sich über ein Infusionsverfahren gut einbauen und Schädigungen irgendwelcher Art sind nicht erkennbar; der natürliche Mangangehalt der Pollen ist recht gering und kann durch die Markierung um den Faktor 10 erhöht werden. Ein einmal markierter Baum behält den erhöhten Mangangehalt der Pollen über mehrere Jahre bei, so daß ohne weitere Markierung mehrere Experimente am gleichen Baum nacheinander möglich sind. Die Pollen werden auf in der Nachbarschaft des Baumes aufgehängten Folien aufgefangen, diese mit den Pollen aktiviert und danach auf eine photographische Schicht aufgelegt. Die Pollen des markierten Baumes rufen eine erheblich größere und stärkere Schwärzung hervor als die der unmarkierten Nachbarbäume, Bild 3. Mit dieser Indikator-Aktivierungsmethode für Pollen sind inzwischen zahlreiche erfolgreiche Untersuchungen im In- und Ausland angestellt [4].

### 4.2. Ausbreitung von Pilzsporen

Ein ähnliches Problem besteht bei der Untersuchung der Ausbreitung von Pilzsporen. Auch hier läßt sich der Mangangehalt der Einzelspore durch Mangananreicherung im Nährmedium so weit erhöhen, daß man sie individuell durch ein empfindliches Autoradiographieverfahren nachweisen kann. Wenn der Anteil markierter Sporen an der Gesamtsporenzahl nicht interessiert, sondern nur die absolute Anzahl markierter Sporen je Auffangfolie, kann man sogar auf das aufwendige Auszählen der Schwärzungspunkte unter dem



Mikroskop ganz verzichten und diese Anzahl durch eine einfache Zählrohrmessung ermitteln. Dabei sind bereits etwa zehn markierte Sporen je Auffänger eindeutig nachweisbar. Ein typischer Anwendungsfall für dieses Verfahren ist die Untersuchung der Sporenausbreitung in Gewächshäusern in Abhängigkeit vom Belüftungssystem [5].

### 4.3. Markieren von Luft

Markierungsexperimente mit Luft unter Verwendung radioaktiver Indikatoren sind besonders schwierig, weil

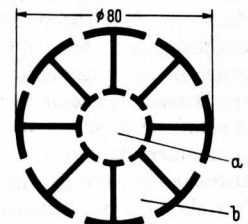
- es keine radioaktiven Gase geeigneter Halbwertszeit gibt,
- die ggf. zu verwendenden Gase erheblich schwerer als Luft sind und daher zum Entmischen neigen, und
- die Ausbreitung von Radioaktivität bei diesen Experimenten nicht kontrollierbar ist, was zu erheblichen Strahlenschutzproblemen führt.

Eine Möglichkeit, diese Schwierigkeiten mit Hilfe der IAM zu umgehen, bietet das Verwenden flüchtiger Borverbindungen, wie Methylborsäure. Am natürlichen Isotopengemisch des Bor ist das Isotop B-10 zu 19,8% beteiligt, das bei Beschuß mit thermischen Neutronen unter Emission von  $\alpha$ -Strahlen zum Lithium-7 zerfällt. Füllt man die borhaltige Luftprobe unter Zusatz von Zählgasen (einer Argon-Methan-Mischung) in ein Proportionalzählrohr und bestrahlt dieses in einem Neutronengenerator mit thermischen Neutronen, kann man den Borgehalt der Probe durch Messen der spontan emittierten  $\alpha$ -Teilchen sehr genau bestimmen. Dieses Verfahren wurde ebenfalls bei Durchlüftungsexperimenten in Gewächshäusern erfolgreich benutzt [6].

### 4.4. Fließ- und Ausbreitungsverhalten von Wasser

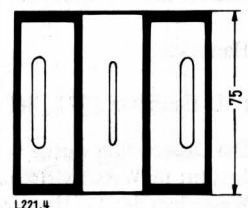
Ein besonders wichtiges Anwendungsgebiet der Indikator-Aktivierungsmethode im Landbau ist die Untersuchung des Fließ- und Ausbreitungsverhaltens von Wasser, besonders von Grundwasser. Hier tritt häufig die Frage nach der Möglichkeit des Eindringens von Schadstoffen in landwirtschaftlich genutzte Bereiche oder in Trinkwassergewinnungsgebiete auf. Dabei scheidet die Anwendung radioaktiver Indikatoren wegen der möglichen Grundwasserkontamination im allgemeinen aus. Da man den Gehalt des Grundwassers an seltenen Erden in Mitteleuropa vernachlässigen kann, ist in diesem Fall Dysprosium-164 ein geeigneter und außerordentlich leicht nachweisbarer Indikator. Mittels des sog. Einbohrloch-Verfahrens kann man unter Verwendung einer Mehrkammer-sonde Fließgeschwindigkeit und Fließrichtung des Wassers im Boden sehr genau bestimmen, Bild 4. Füllt man die innere Kammer der Sonde mit einer DyCl<sub>3</sub>-Lösung und die äußeren mit Wasser und öffnet man nach Einbringen in das Bohrloch die Verbindungsschlitze, ändern sich beim Durchströmen des Grundwassers die Dy-Konzentrationsverhältnisse in den einzelnen lotrecht stehenden Kammern, so daß Richtung und Geschwindigkeit der Grundwasserströmung errechnet werden können. Dieses Einbohrloch-Mehrkammerverfahren hat noch den zusätzlichen Vorteil, daß Adsorptionsprozesse an der Bodenoberfläche das Ergebnis nicht beeinflussen [7].

**Bild 3.** Autoradiographie von Mn-markierten und unmarkierten Kiefernpollen.



**Bild 4.** Mehrkammer-Meßsonde zum Bestimmen von Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit durch die Dy-Indikator-Aktivierungsanalyse.

a Indikator-kammer (DyCl<sub>3</sub>)  
b Durchflußkammer



#### 4.5. Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Weitere Beispiele für die Anwendbarkeit der Indikator-Aktivierungsmethode zum Untersuchen von Ausbreitungs- und Verteilungsvorgängen im Landbau ließen sich in großer Zahl angeben: das Messen der Verteilung von Immissionen aus Industrieabgasen ist ein ebenso denkbarer Anwendungsfall, wie das Markieren von Insekten zum Studium ihrer Lebensgewohnheiten. In diesem Fall kann das Verwenden radioaktiver Indikatoren wegen der Strahlenbelastung zu einer Veränderung der Verhaltensweise der Tiere führen, was bei aktivierbaren Markierungsstoffen nicht eintritt.

Man muß sich allerdings darüber klar sein, daß auch die IAM zwei wesentliche Nachteile gegenüber der Verwendung radioaktiver Indikatoren hat: sie ist grundsätzlich nicht geeignet (von seltenen Ausnahmen abgesehen [8]), metabolische Prozesse der Biologie oder Chemie zu verfolgen, sondern auf das Messen reiner Ausbreitungsprozesse beschränkt. Zum anderen ist es auch nicht möglich, Messungen direkt im System auszuführen; man muß wegen der anschließenden Aktivierung stets Proben entnehmen und aufbereiten. So bleibt es auch bei der Lösung von Ausbreitungs- und Verteilungsproblemen im Landbau dem geschickten und erfahrenen Experimentator überlassen, aus der Reihe der zur Verfügung stehenden Methoden die für den Einzelfall am besten geeignete auszuwählen und etwaige Störungsquellen zu erkennen und zu vermeiden. L 221

#### 5. Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] ● *Glubrecht, H., u. E.-G. Niemann*: Radionuklide in der Landwirtschaft. In: Atomstrahlung in Medizin und Technik. München: K. Thieming 1964.
- [2] *Glubrecht, H.*: Die Indikator-Aktivierungsmethode. Atompraxis Bd. 7 (1961) Nr. 12, S. 467/70.
- [3] *Glubrecht, H.*: Die Indikator-Aktivierungsmethode in der Biologie. Phys. Bl. Bd. 20 (1964) Nr. 1, S. 19/26.
- [4] ● *Fendrik, J.*: Entwicklung einer Indikator-Aktivierungsmethode zum Studium des Pollenfluges von Waldbäumen. Diss. TH Hannover 1967.
- [5] ● *Bors, J.*: Entwicklung einer Indikator-Aktivierungsmethode zum Studium der Ausbreitung von Pilzsporen, insbesondere in Gewächshäusern. Diss. TH Hannover 1965.
- [6] ● *Gottschalk, J.*: Entwicklung einer inaktiven Markierungsmethode von Luft unter Benutzung der Reaktion  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ . Diss. TH Hannover 1967.
- [7] ● *Oji, I.S.*: Theoretische und experimentelle Untersuchung der Grundwasserströmung unter Anwendung der Indikatoraktivierungsmethode. Diss. TH Hannover 1966.
- [8] *Ernst, D., u. H. Glubrecht*: Indikatoraktivierungsanalyse mit stabilen Strontiumisotopen. Die Naturwissenschaften Bd. 50 (1963) Nr. 13, S. 475/76.

---

## Ausgewählte Dissertationen

---

### Wasserbedarf als Grundlage einer wirtschaftlichen Bewässerungsplanung

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, ein den physikalischen Theorien genügendes und in der Praxis anwendbares Berechnungsverfahren für die Verdunstung aufzustellen. Über Niederschlag, Verdunstung und vorgesehene Wassergaben sollte die Bodenfeuchte für Stationen in humidem und aridem Klima berechnet werden. Verfahren waren zu finden, um die Bodenfeuchtwerte bei der vom Spitzenwasserbedarf abhängigen technischen Planung und bei Rentabilitätsberechnungen des Bewässerungsprojektes sinnvoll zu verwenden.

Der Wasserverbrauch der Pflanzen läßt sich über den aus Turbulenz und Diffusion bestehenden Transportprozeß des Wasserdampfes in der Atmosphäre oder über den Energiebedarf der Verdunstung ermitteln. Diese Verfahren erfordern aber einen für die Praxis der Bewässerungsplanung untragbaren Meß- und Auswertungsaufwand. Es werden Näherungen vorgeschlagen, die in ihrem Verhältnis von exakter Rechnung und Annahmen variabel gestaltet sind, so daß das vorhandene Datenmaterial und die Planungszeit eines Projektes optimal genutzt werden können. Eine Beurteilung des vorgeschlagenen Berechnungsverfahrens, zu der auch eine mit den verfügbaren Daten aufgestellte Beziehung zwischen Verdunstung und Bodenfeuchte gehört, wird für drei humide Klimastationen vorgenommen, da Bodenfeuchtemessungen vorliegen. Über eine statistische Auswertung längerer Beobachtungsreihen ergaben sich Verfahren für das Bemessen der Bewässerungsflächen und -anlagen und für das Ermitteln der Erträge durch Zusatzbewässerungen.

DK 631.675.2.001.24

Hannover

Dr.-Ing. Markward Kunz

(TU Hannover 1971. Ber.: Prof. H. Billib; Prof. C.F. Seyfried.)

Die Dissertation wurde veröffentlicht in: Mitteilungen aus dem Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der TU Hannover, H. 21.

### Ansätze zum Entwurf einer Festigkeitsrechnung für metallische Werkstoffe bei mehrachsiger pulsierender Beanspruchung

Durch die Weiterentwicklung experimenteller Methoden der Werkstofftechnik, durch Modell und Großversuche in Verbindung mit Statistik und Ähnlichkeitsmechanik und durch Fortschritte in der Kontinuumsmechanik hat die Spannungsanalyse einen weitaus befriedigenderen Stand erreicht als die Festigkeitsrechnung, die namentlich bei mehrachsigen pulsierenden Beanspruchungen bis heute ein Notbehelf blieb. Die Arbeit ist ein Versuch, die phänomenologischen Grundlagen zur Festigkeitsrechnung für metallische Werkstoffe unter mehrachsiger pulsierender Beanspruchung zu erweitern. Bei allgemeiner schwingender Belastung werden die Koordinaten des Spannungstensors sowie dessen Drehung mit Hilfe unterschiedlicher Zeitfunktionen beschrieben, nachdem sie durch Zeitanalysen untersucht sind. Der Vorschlag einiger Zuordnungen zwischen pulsierendem Charakter, Schwingfestigkeit und Werkstoffaserrichtung berücksichtigt die durch verschiedenen schwingenden Spannungskoordinaten hervorgerufenen unterschiedlichen Schädigungen. Die Formulierung von Versagensgrenzen bei mehrachsigen schwingenden Beanspruchungen bezieht sowohl den pulsierenden Charakter der Koordinaten des Spannungstensors und dessen Drehung als auch die Zuordnung und das durch einen geeigneten Parameter beschriebene unterschiedliche Werkstoffverhalten gegenüber Zug- und Druckschwingbeanspruchungen ein. Für die vorgeschlagenen Rechenansätze, die ihrer Herleitung entsprechend als lineare, quadratische und voraussetzungsarme Versagensbedingung bezeichnet sind, werden Anwendungsbeispiele mit verschiedenen Belastungskombinationen behandelt und die errechneten Ergebnisse mit experimentell ermittelten Daten verglichen.

DK 539.433:620.178.325:669-4

Aachen

Dr.-Ing. Stefan Keil

(TH Aachen 1970. Ber.: Prof. A. Troost; Priv.-Doz. J. Broichhausen.)