

## AUSWIRKUNGEN LUFTGETRAGENER STOFFE AUF VEGETATION UND BODEN VON GRÜNLANDÖKOSYSTEMEN

### I. ZUSAMMENHÄNGE, ARBEITS- UND MESSKONZEPT

HANS-JÜRGEN JÄGER, LUDGER GRÜNHAGE, ULRICH DÄMMGEN, UDO HERTSTEIN und JÜRGEN FLECKENSTEIN

Institut für Produktions- und Ökotoxikologie

#### Einleitung

Die Problemkreise „Waldschäden“ und „Bodenschutz“ machen deutlich, welche Risiken und Konsequenzen stoffliche Belastungen terrestrischer Ökosysteme nach sich ziehen. Da davon auszugehen ist, daß Agrar-Ökosysteme wie Wald-Ökosysteme in erheblichem Maße durch luftgetragene Schadstoffe beeinträchtigt werden, hat der Rat der Sachverständigen für Umweltfragen (1985) in seinem Gutachten gefordert, „diesem Problemkreis erhöhte Aufmerksamkeit zu widmen“.

Über die Auswirkungen von luftgetragenen Stoffen auf Agrarökosysteme liegen bisher nur wenige Erkenntnisse vor (z.B. Heggstad und Bennett, 1984; Lauenroth und Preston, 1984; Heck et al., 1986). Es ist zu erwarten, daß sich die Einflüsse von luftgetragenen Schadstoffen nicht nur auf die Menge und die Qualität der in der Agrarwirtschaft erzeugten Nahrungs- und Futtermittel auswirken, sondern darüber hinaus die Struktur und Funktion des Ökosystems beeinflussen. Wenn solche Störungen durch die Selbstregulation des Ökosystems nicht mehr aufgefangen werden können, zeigen sich ökotoxikologische Effekte im System.

Unter einem Ökosystem versteht man einen abgrenzbaren Teil einer Lebensgemeinschaft von Pflanzen und Tieren unter Einschluß der Mikrolebewesen in einem Lebensraum, dessen Angebot an existentiell notwendigen Lebensbedingungen erfaßt werden kann. Ökosysteme sind offene Systeme, deren Entwicklung wie ein geschichtlicher Ablauf durch die Einmaligkeit der Voraussetzungen wie auch der auftretenden Veränderungen der Lebensgemeinschaft und des Lebensraums geprägt wird. Ökosysteme sind vernetzte Systeme mit einer inhärenten Tendenz zur Eigenstabilisierung, deren biologisches Gleichgewicht über miteinander verknüpfte Regelkreise durch positive und negative Rückkopplungen aufgebaut und aufrechterhalten wird (Schwarzenbach, 1985).

Die Reaktion einer Pflanze auf eine gegebene Belastung mit einem einzelnen Luftschadstoff hängt zunächst von ihrer Toleranz gegenüber diesem Schadstoff ab. Der Toleranzgrad einer Pflanze wird dabei durch ihre genetische Ausstattung und ihren Entwicklungszustand zum Zeitpunkt der Einwirkung sowie von dem die Wirkung modifizierenden Einfluß der verschiedenen äußeren Faktoren (Boden, Klima, biotische Interferenzen; vgl. Abb. 1) bestimmt. Durch luftgetragene Schadstoffe hervorgerufene Schädigungen an Einzelpflanzen können akut oder chronisch sein, d.h., sie können durch ein einmaliges Auftreten relativ hoher Dosen oder durch eine Folge von wiederholten, relativ niedrigen Dosen von Schadstoffen hervorgerufen werden. Dies kann zu mehr oder weniger ausgeprägten Veränderungen des Aufbaus von Pflanzengemeinschaften führen. Akute und chronische Schädigungen können durch einzelne Stoffe oder Stressoren oder durch Kombinationen von Stoffen oder Stressoren ausgelöst werden. Die Schädigung an Pflanzen kann direkt über ihre Sproßteile oder indirekt über den Boden und die Wurzeln erfolgen, wobei die

Wirkung von den Stoffen selbst, oft aber auch von ihren Metaboliten ausgehen kann.

Zum kausalanalytischen Nachweis der langfristigen Auswirkungen chronischer Belastungen terrestrischer Ökosysteme mit luftgetragenen Schadstoffen wird vielfach die Notwendigkeit der Anlage repräsentativer Dauerbeobachtungsflächen betont (Deutsche Forschungsgemeinschaft, 1983; Ellenberg, 1983; Ellenberg et al., 1986). Unter den landwirtschaftlich genutzten Flächen bietet sich das Dauergrünland im Vergleich zum Ackerland wegen der geringen Häufigkeit und Intensität der Bewirtschaftungseingriffe als ein besonders geeignetes System zur langfristigen Untersuchung der Zusammenhänge zwischen stofflicher Belastung und möglichen Wirkungen im Ökosystem an. Zudem stellt das Dauergrünland in der Bundesrepublik Deutschland mit einem Anteil von etwa 40 % der landwirtschaftlich genutzten Flächen einen bedeutenden Wirtschaftsfaktor dar.

Seit 1983 wird am Institut für Produktions- und Ökotoxikologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft untersucht, ob und inwieweit Grünlandökosysteme vor dem Hintergrund der Faktorenkomplexe Bewirtschaftung, Wetter (physikalisches Klima), Boden und Wasserversorgung kurz-, mittel- und langfristig durch das chemische Klima (Stoffkonzentrationen in Luft und Niederschlägen, Stoffdepositionen) beeinflusst werden.

Eine besondere Aufgabe dieser Forschung ist es, durch geeignete Meß- bzw. Überwachungssysteme Schäden möglichst so früh festzustellen, daß sie nicht irreversibel werden, um so mitzuhelfen, die Leistungsfähigkeit des Naturhaushaltes auch im Hinblick auf seine Nutzung durch den Menschen zu bewahren.

In einer Serie von Publikationen soll in dieser Zeitschrift über Zusammenhänge, Arbeits- und Meßkonzepte, Meßtechniken und Meßergebnisse berichtet werden.

#### 1. Das Grünland als Ökosystem - Beziehungen und Umsätze

Die Hauptfunktion des Dauergrünlandes besteht in der Primärproduktion oberirdischer, als Futtermittel verwendbarer Biomasse, die im wesentlichen von perennierenden Gräsern, Kräutern und Leguminosen gebildet wird. Vegetation und Boden des Dauergrünlandes werden durch das Wetter, die Wasserversorgung, die Bewirtschaftung und durch stoffliche Immissionen aus nicht mit der Bewirtschaftung zusammenhängenden Quellen beeinflusst. Die einzelnen Beeinflussungsfaktoren sind vielfältig miteinander vermascht. Abb. 2 gibt einen Überblick über die von uns in Betracht gezogenen Zusammenhänge.

Typisch für Grünlandssysteme sind Fluktuationen der Populationen der einzelnen Arten (Klapp, 1971; Miles, 1979). Neben Zyklen, die durch die im Jahresverlauf sich ändernden Witterungsbedingungen und durch die Nutzungsart und -frequenz bestimmt werden, beobachtet man solche, die Periodendauern von mehreren Jahren oder Jahrzehnten aufweisen.

So können etwa häufig zyklische Veränderungen des Weißkleeanteils („Kleezyklus“) beobachtet werden (Klapp, 1965, 1971). Die offenbar komplexen Ursachen derartiger zyklischer Veränderungen sind derzeit noch nicht geklärt (Klapp, 1965, 1971; Williams, 1978; Van den Bergh, 1981; Elberse et al., 1983). Eine Beurteilung von Entwicklungstendenzen oder Än-

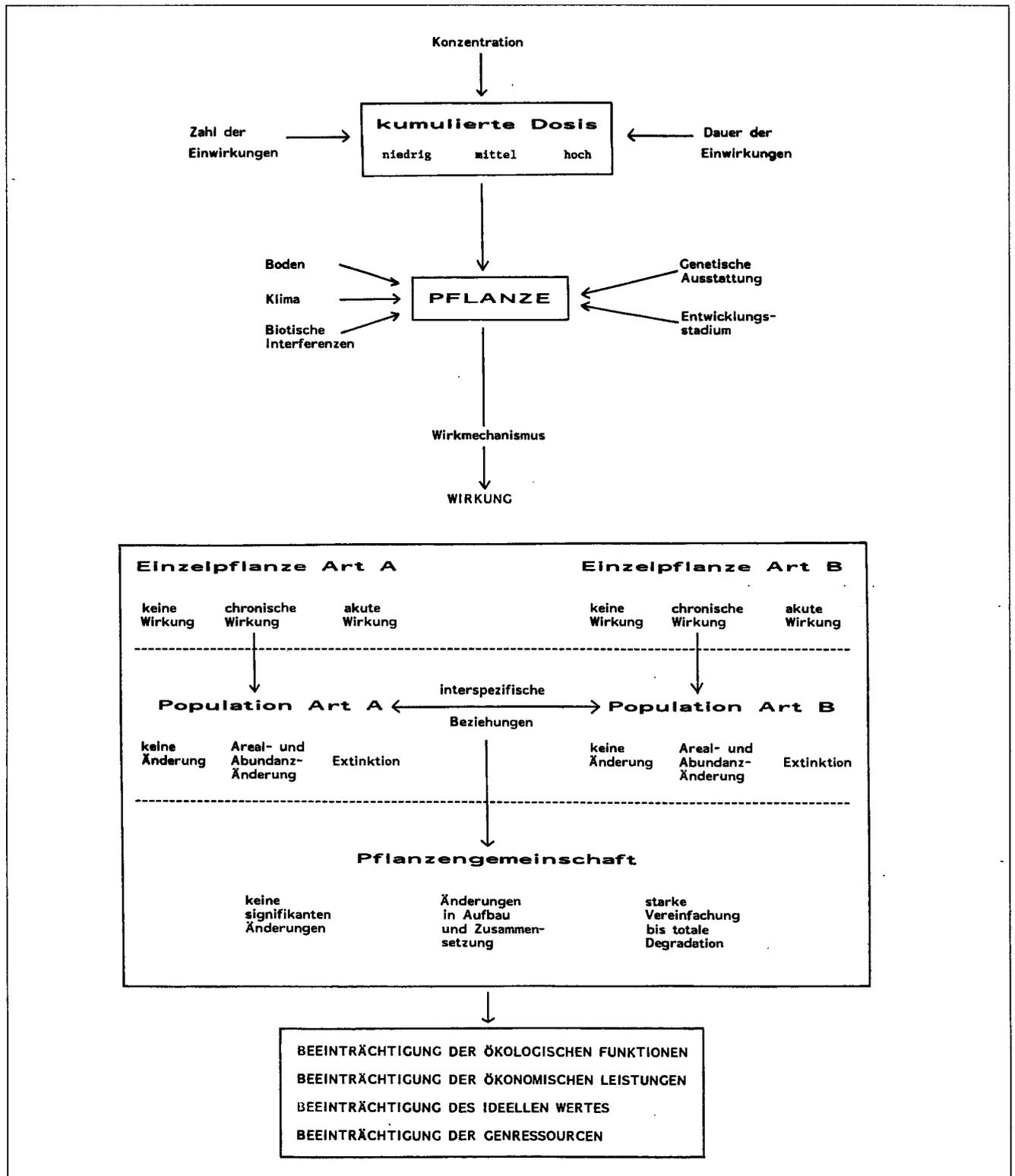


Abbildung 1: Beziehungsgefüge für die Schädigung einer Einzelpflanze, einer Population bzw. einer Pflanzengemeinschaft durch einen Luftschadstoff (verändert nach Guderian et al., 1983)

derungen an derartigen Flächen sind daher erst nach mehrmaligen Durchlaufen solcher Zyklen sinnvoll. Innerhalb einer Vegetationsperiode begegnet man artspezifischen Optima der Stoffproduktion, die z.B. von Keimungszeitpunkt (Annuelle) und Blüte (Perennierende) bestimmt werden.

Vitalität der Individuen und Artenzusammensetzung werden unmittelbar von den biotischen und abiotischen Faktoren des Bodens sowie von der Verfügbarkeit und Zusammensetzung des Bodenwassers beeinflusst.

Aus versuchstechnischen Gründen haben wir im Rahmen unserer Arbeiten als Bewirtschaftungsform die Mähnutzung

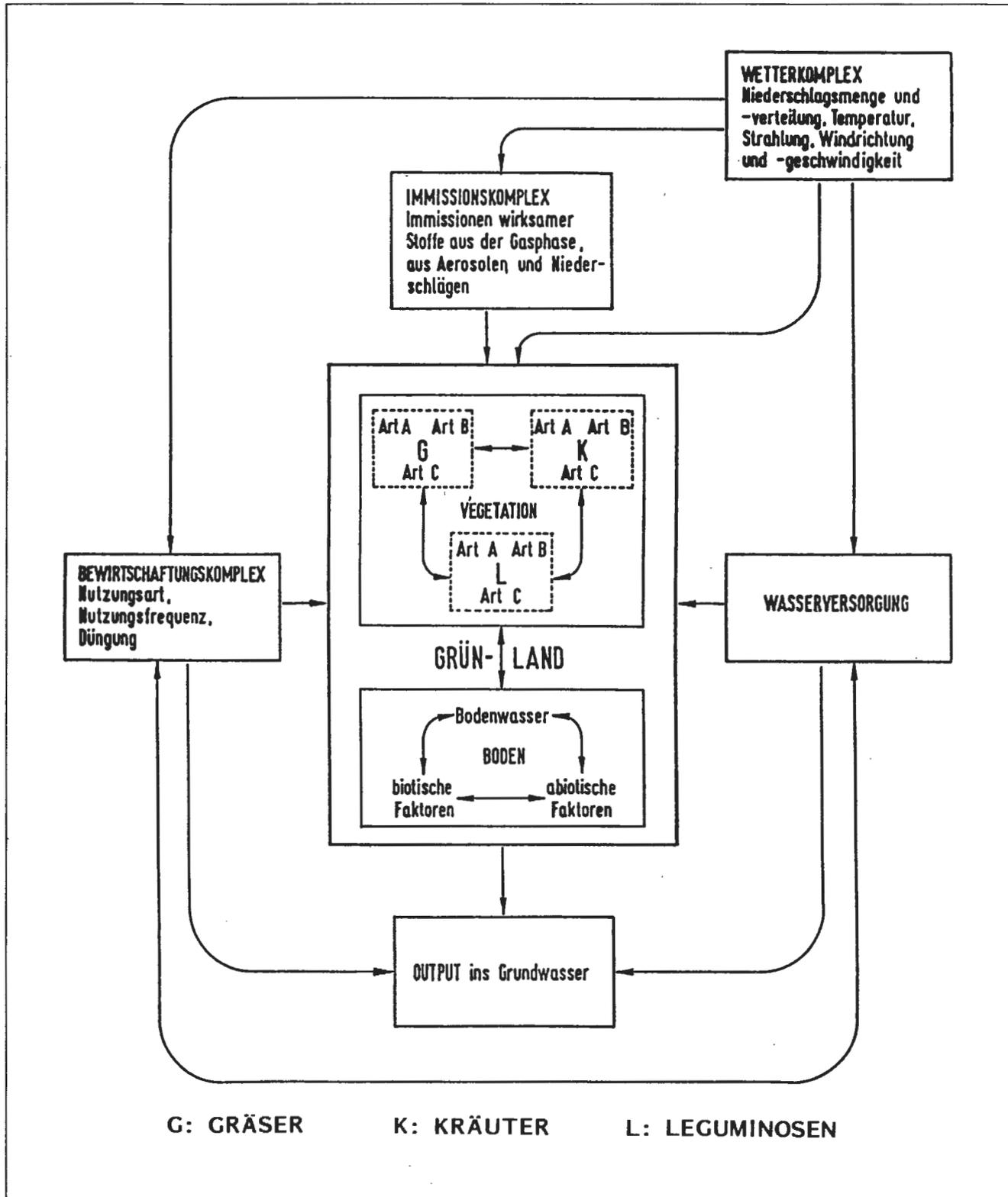


Abbildung 2: Einflüsse auf bzw. Beziehungen im Dauergrünland

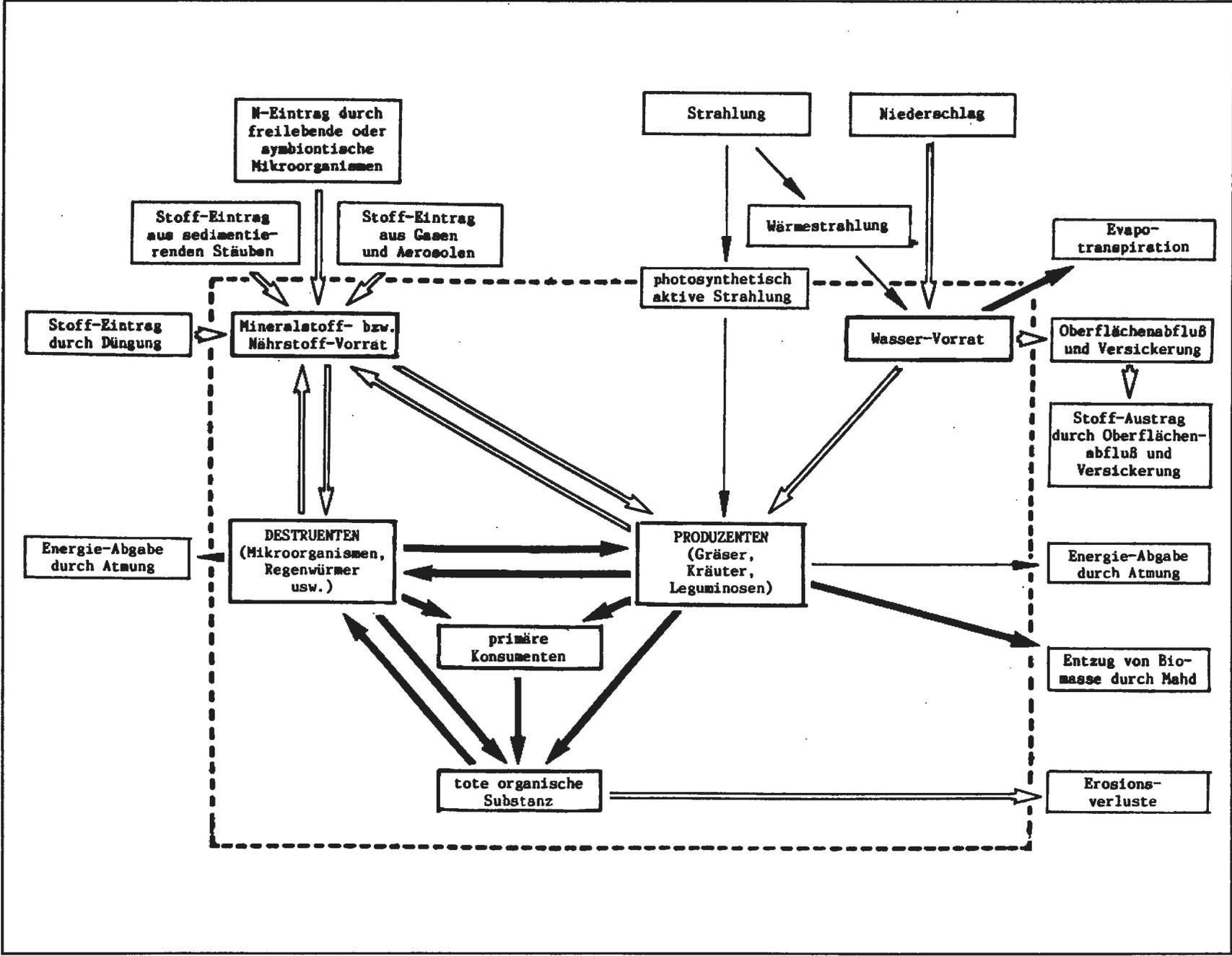


Abbildung 3: Schema wichtiger Beziehungen und Umsätze in einem unter Mähnutzung stehenden Grünlandökosystem (verändert nach Ellenberg et al. 1986). Dünne Pfeile: Energieflüsse; offene Pfeile: Stoffflüsse; dicke schwarze Pfeile: Stoff- und Energieflüsse.

wählt. In Abb. 3 sind die Beziehungen und Umsätze von Stoffen und Energien in einem unter Mähnutzung stehenden Grünlandökosystem schematisiert dargestellt.

Nach Ellenberg et al. (1986) ist bei den biotischen Faktoren der Einfluß von primären Konsumenten (Würmer, Insekten, Wirbeltiere) für den Energie- und Stoffumsatz vernachlässigbar klein. Ungleich wichtiger ist die Rolle der Mikroorganismen unter den heterotrophen Organismen: Für die vollständige Remineralisierung der toten organischen Substanz sorgen in erster Linie die Bakterien. Pilze überführen tote organische Substanz in ihre eigene Hyphensubstanz. Man kann davon ausgehen, daß der überwiegende Teil der Pflanzen im System (wenn nicht gar alle) mykorrhiziert ist (Harley und Harley, 1987). Die Mykorrhizapilze vermitteln den Produzenten Wachstumsstoffe und Nährelemente und erhalten dafür Zucker und andere Stoffwechselprodukte. Ihre Hyphen sind allerdings in der Natur von denen der saprophytischen Pilze kaum zu trennen. Alle Pilze und Bakterien können lebend von Würmern, Kollombolen und anderen Tieren gefressen werden.

Am Wasserumsatz im Ökosystem sind in erster Linie die Pflanzen durch ihre Wasseraufnahme und Transpiration beteiligt. Die Transpiration der heterotrophen Lebewesen ist vergleichsweise unbedeutend. Derjenige Teil des Niederschlagswassers, der nicht durch Evapotranspiration (Summe aus Transpiration und Evaporation der Pflanzen- und Bodenoberfläche) verbraucht wird, dringt in größere Bodentiefen ein und trägt letztlich zur Grundwasserneubildung bei. Für die Evapotranspiration wird ein großer Teil der ins Ökosystem von außen eingestrahlten Energie benötigt.

Einflüsse auf den Wasserhaushalt haben die physikalische und chemische Beschaffenheit des Bodens, darunter insbesondere auch sein Gehalt an organischer Substanz, und die Art und Dichte des Pflanzenbestandes. In landwirtschaftlich genutzten Systemen greifen Bewirtschaftungsmaßnahmen (Dränung, Beregnung, Ernte) maßgeblich in den Wasserhaushalt ein. In Grünlandökosystemen kommt etwa der Schnittfrequenz eine Bedeutung auch für den Wasserhaushalt zu.

Die ins Ökosystem gelangende Energie ist praktisch ausschließlich Strahlungsenergie. Ein kleiner Teil der Strahlung (Albedo) wird von den Oberflächen zurückgestrahlt. Der weitaus größte Anteil wird vom System aufgenommen; davon wiederum dient die Hauptmenge als Verdampfungsenergie bei der Evapotranspiration. Nur ein geringer Anteil wird durch die Photosynthese in Form chemischer Energie gespeichert. Ein geringer Teil dieser Energie wird durch Fraß oder Symbiose an andere Lebewesen weitergegeben oder auf dem Wege über die tote organische Substanz von den Reduzenten verbraucht, ein anderer Teil wird durch Atmung wieder an die Umgebung abgegeben. Bei einem im Gleichgewicht stehenden Ökosystem geben innerhalb eines Zyklus alle Organismen soviel Energie durch Atmung ab, wie durch Photosynthese gewonnen wurde. In Systemen, in denen tote organische Substanz durch Humusbildung angehäuft wird, übersteigt der Energiegewinn durch Photosynthese den Verlust durch Atmung. In landwirtschaftlich genutzten Ökosystemen wird ein großer Teil der Energie durch die Ernte von Biomasse entnommen. Der Stoffumsatz in Ökosystemen ist auf die Dauer dem Fließgleichgewicht nahe. Zur Aufrechterhaltung hoher Stoffproduktion müssen daher in bewirtschafteten Systemen die entzogenen Stoffe durch Düngung wieder zugefügt werden.

Die zum Aufbau der Biomasse benötigten Stoffe werden dem Boden, dem Bodenwasser und der Luft entnommen. In

natürlichen Ökosystemen stellen Boden und Bodenwasser die Quelle und die Senke für nahezu alle Nährelemente außer Kohlenstoff und Stickstoff dar. Für diese beiden Elemente ist die Luft sowohl als Quelle wie auch als Senke bedeutend. So kann Luftstickstoff durch freilebende oder symbiontische Mikroorganismen organisch gebunden werden. In atmosphärisch belasteten Gebieten werden darüber hinaus andere Stoffe in nennenswerten Mengen in die Systeme eingetragen und können zu Düngeeffekten oder auch zu Schädigungen des Bestandes führen. So kann z.B. der Schwefelentzug durch Mahd in einer durch Schwefeldioxid belasteten Region durch Schwefeleinträge aus der Gasphase ( $\text{SO}_2$ ) kompensiert oder überkompensiert werden. Die Deposition von Elementen aus Stäuben und Aerosolen kann zu Anreicherungen von unerwünschten Stoffen in der Vegetation und im Boden führen. Für den Übergang derartiger Stoffe in Vegetation und Boden ist das Wettergeschehen von großer Bedeutung.

Das Gleichgewicht im System wird durch eine Vielzahl verzahnter Regelkreise eingespielt und aufrechterhalten. Abb. 4 soll beispielhaft an einem Grünlandökosystem die Abhängigkeit der Biomasseproduktion von meteorologischen Größen sowie vom Stickstoff- und Bodenwasserhaushalt darstellen. Diese in Anlehnung an Heasley et al. (1984) und Bossel (1985) gewonnene Darstellung berücksichtigt nur die besonders wichtigen Beziehungen:

Hierbei werden die Sonneneinstrahlung, die Windgeschwindigkeit und der Niederschlag als primäre (unabhängige) Variablen angesehen. Lufttemperatur und Luftfeuchte etwa sind Variablen, die wesentlich von der Sonneneinstrahlung bzw. der Niederschlagsmenge und -verteilung abhängig sind; sie sind sekundäre (abhängige) Variablen. Andere Einflußgrößen wie Düngung und Zusatzberegnung werden vom Menschen gesteuert.

Das relative Pflanzenwachstum ist bei optimaler Nährstoff- und Wasserversorgung vom Lichtgenuß der einzelnen Arten abhängig, d.h. von der Menge der die Individuen dieser Arten treffenden photosynthetisch-aktiven Strahlung. Dabei hängt die Lichtaufnahme einer Pflanze z.B. von der Anzahl und Größe ihrer Blätter sowie ihrer Stellung im Raum ab. In mehr oder minder dichten Grünlandbeständen nimmt mit wachsender Blattmasse und Höhe der Wettbewerb um Licht zu; d.h., bei Dominanz einzelner Arten kann der Lichtgenuß anderer Arten eingeschränkt werden. Die Dominanzstruktur eines Bestandes ist deshalb stark abhängig von der Schnittfrequenz.

Der Wasser- und der Stickstoffhaushalt des Systems werden maßgeblich durch die Entwicklung des Bestandes selbst beeinflusst: So ist die Höhe der Mineralisierungsrate von der Bodentemperatur abhängig (vgl. z.B. Beese, 1986), diese aber hängt ab von der vom Boden absorbierten Strahlung. Die Intensität der Einstrahlung selbst ist eine Funktion der Art und des Ausmaßes der Bodenbedeckung, die wiederum abhängt vom Entwicklungszustand des Bestandes. Über den Einfluß der Bodenfeuchte auf die Mineralisierungsrate (vgl. etwa Scheffer und Schachtschabel, 1982) ist der Stickstoff-Umsatz im Boden an den Wasserhaushalt des Systems gekoppelt. Während der Vegetationsperiode wird der Wasserhaushalt seinerseits maßgeblich durch die Evapotranspiration geprägt, die dann wiederum vom Entwicklungszustand des Bestandes abhängig ist. Die Komplexität der Beziehungen und Rückkopplungen geht auch aus Abb. 4 nur andeutungsweise hervor.

Ziel unserer Arbeiten ist die möglichst vollständige Beschreibung eines Grünland-Ökosystems. Die Beziehungen

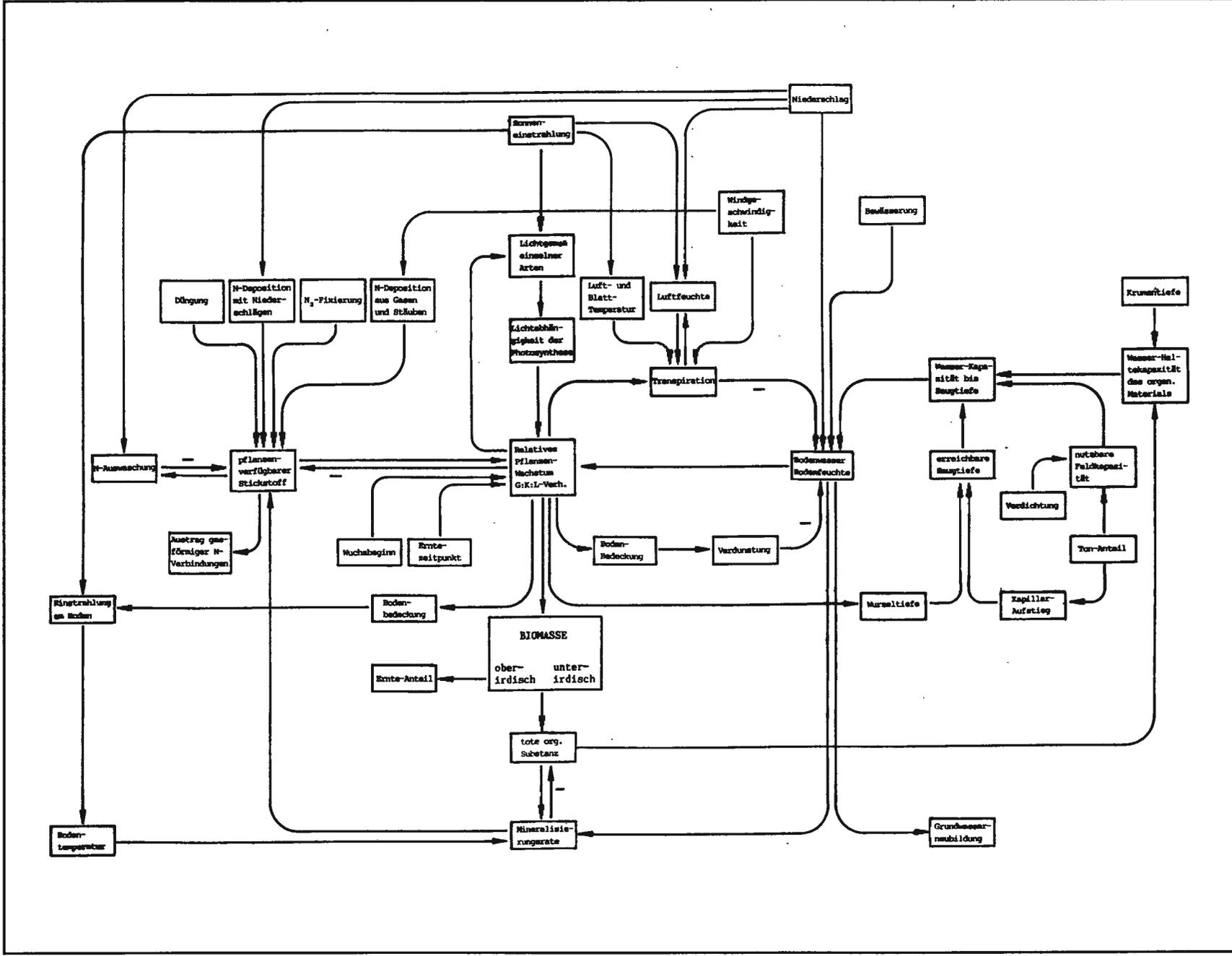


Abbildung 4: Modell für die Biomasseproduktion unter Berücksichtigung des Stickstoff- und des Wasserhaushaltes sowie wichtiger Weitergrößen

Tabelle 1: Luftbelastung durch Schwebstaub und Schwefeldioxid – Vergleichsdaten

	Rotenkamp	Reinluft- gebiete <sup>1)</sup>	wenig belastet <sup>1)</sup>	belastet <sup>1)</sup>	Berlin <sup>2)</sup>	Eifel <sup>3)</sup>	Rhein- Ruhr <sup>3)</sup>	Wald- hof <sup>4)</sup>
Gesamt-Staub ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	52	5	30 - 60	70 - 100	118	32	56	58
Staub-S ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	3,7	0,3	3	5				2,6
Staub-Fe ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	1,0				2,0			
Staub-Pb ( $\text{ng m}^{-3}$ )	140	20	100	500	370			
Staub-Cd ( $\text{ng m}^{-3}$ )	2,6	0,5	3	10	3,2			
SO <sub>2</sub>	42	1 - 3	10 - 30	70 - 100		30	60	23
Meßjahr	1985				1984/85	1984	1984	1984/85

<sup>1)</sup> nach JOST (1984); <sup>2)</sup> nach HEITS & ISRAEL (1982); <sup>3)</sup> nach PFEFFER (1985); <sup>4)</sup> nach MITTEILUNGEN AUS DEM MESSNETZ des UMWELTBUNDESAMTES

und Umsätze werden beispielhaft an einem grundwasserfernen Dauergrünland unter Mähnutzung untersucht.

## 2. Das Meßgebiet und sein physikalisches und chemisches Klima

Das in dieser Arbeit vorgestellte Meßkonzept beruht auf den Erfahrungen, die wir in den Jahren 1984 bis 1986 mit einem Vorlaufmeßprogramm mit ähnlicher Fragestellung gewonnen haben. Die Erkenntnisse über das physikalische und das chemische Klima beeinflussten die Entwicklung dieses Konzeptes maßgeblich. Deswegen wird hier auf diese Voraussetzungen eingegangen.

Das Untersuchungsgebiet (vgl. Abb. 6) liegt in dem Teil Niedersachsens, der von Hoffmeister (1937) als Bördekreis bezeichnet wird. Dieser Klimakreis weist vergleichsweise starke kontinentale Einflüsse auf. Bei mittleren Jahrestemperaturen von 8,0 bis 8,5°C betragen die Jahresschwankungen der mittleren Monatstemperaturen 17,0 bis 17,5 K. Die mittleren Sommertemperaturen (April bis September) bewegen sich zwischen 13,5 und 14,5°C im Flachland und zwischen 13,0 und 13,5°C im Elm. Die Niederschläge im Meßgebiet betragen zwischen 560 und 750 mm Nds./a. Im langjährigen Mittel fallen von April bis September rund 55 % der jährlichen Niederschläge. Innerhalb des Untersuchungsgebietes bewirken klimatische Faktoren, daß Getreide im östlichen Teil im Mittel 10 bis 15 Tage später gesät und geerntet wird als im westlichen Teil (Hoffmeister und Schnelle, 1945).

Als Leitstoff für die Beurteilung des chemischen Klimas diene uns zunächst Schwefeldioxid. Schwefeldioxid wird im Meßgebiet bzw. seiner unmittelbaren Nähe vor allem von den Braunkohlenkraftwerken im Helmstedter Raum emittiert (Harbke, südöstlich von Helmstedt in der DDR; Offleben; seit 1985 zusätzlich Buschhaus). Deutlich geringer sind die Emissionen der Kraftwerke in Mehrum bei Peine, in Salzgitter und Wolfsburg. Die Buntmetallhütten am Harzrand sind weitere Punktquellen. Die Beiträge der Städte Braunschweig und Wolfenbüttel sind demgegenüber vergleichsweise gering. Dies geht aus dem Emissions-Kataster (Abb. 5) hervor. Die sich daraus ergebenden mittleren Schwefeldioxidkonzentrationen in der Umgebungsluft für das Untersuchungsjahr 1985/86 gehen aus Abb. 6 hervor.

Die Abhängigkeit der Schwefeldioxidkonzentrationen von der Windrichtung deutet darauf hin, daß der Ferntransport

von Schwefeldioxid aus westlichen Richtungen unbedeutend ist, daß aber bei anhaltenden Ost- und Südostwinde stark belastete Luftmassen aus den Industriegebieten der DDR advehiert werden (Dämmgen, 1985; Dämmgen et al., 1987 a,b). Nach dem Emissionskataster der DDR (Adam et al., 1987) kommen als Quellen Kraftwerke und Industriebetriebe in den Gebieten um Halle, Bitterfeld und Leipzig in Betracht.

Die Emissions- und Immissionssituation ist seit Mitte 1987 deutlich entschärft, da mittlerweile die Kraftwerke Mehrum, Braunschweig Mitte und Buschhaus vollentschwefelt und die Kraftwerke Offleben und Harbke teilentschwefelt sind.

Schwebstaub-Quellen im Nahbereich sind vor allem die Hütte in Salzgitter, die Kraftwerke im Helmstedter Revier, die Hütten bei Oker sowie verschiedene Punktquellen im Landkreis Wolfenbüttel. Die Stadt Braunschweig fällt als Emittent kaum ins Gewicht. Zur Information über die Abhängigkeit der Schwebstaub-Konzentrationen sowie der Konzentrationen einzelner Staubinhaltsstoffe im Ostbraunschweiger Raum vgl. Dämmgen (1986).

Die Immissionssituation im Untersuchungsgebiet ist bezüglich Schwefeldioxid und Schwebstaub durch zeitweilig hohe und sehr hohe Konzentrationen während der Wintermonate und niedrige Konzentrationen während der Vegetationsperioden geprägt (Dämmgen, 1986; Grünhage et al., 1986). Tab. 1 erlaubt eine Einordnung der Immissionsverhältnisse im Untersuchungsgebiet durch Vergleich mit Meßdaten aus anderen Gebieten.

Das zeitweilige Auftreten phytotoxischer Ozon-Konzentrationen während der Vegetationsperioden konnte mit Hilfe der standardisierten Expositionen der ozonempfindlichen Tabaksorte Bel W3 nachgewiesen werden. Nach Lefohn und Mohnen (1986) treten im Meßgebiet Spitzenkonzentrationen über 300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  Luft (Stundenmittel) auf. Stundenmittel über 200  $\mu\text{g O}_3/\text{m}^3$  Luft sind dabei relativ häufig; während der Vegetationsperiode 1985 z.B. wurde dieser Wert an der Meßstelle Waldhof des Umweltbundesamtes an 15 Tagen überschritten (Grennfelt et al., 1987).

Eine erste Abschätzung von Stoffeinträgen in Grünlandssysteme aus unterschiedlichen Depositionsformen in Südostniedersachsen ist in Tab. 2 angegeben.

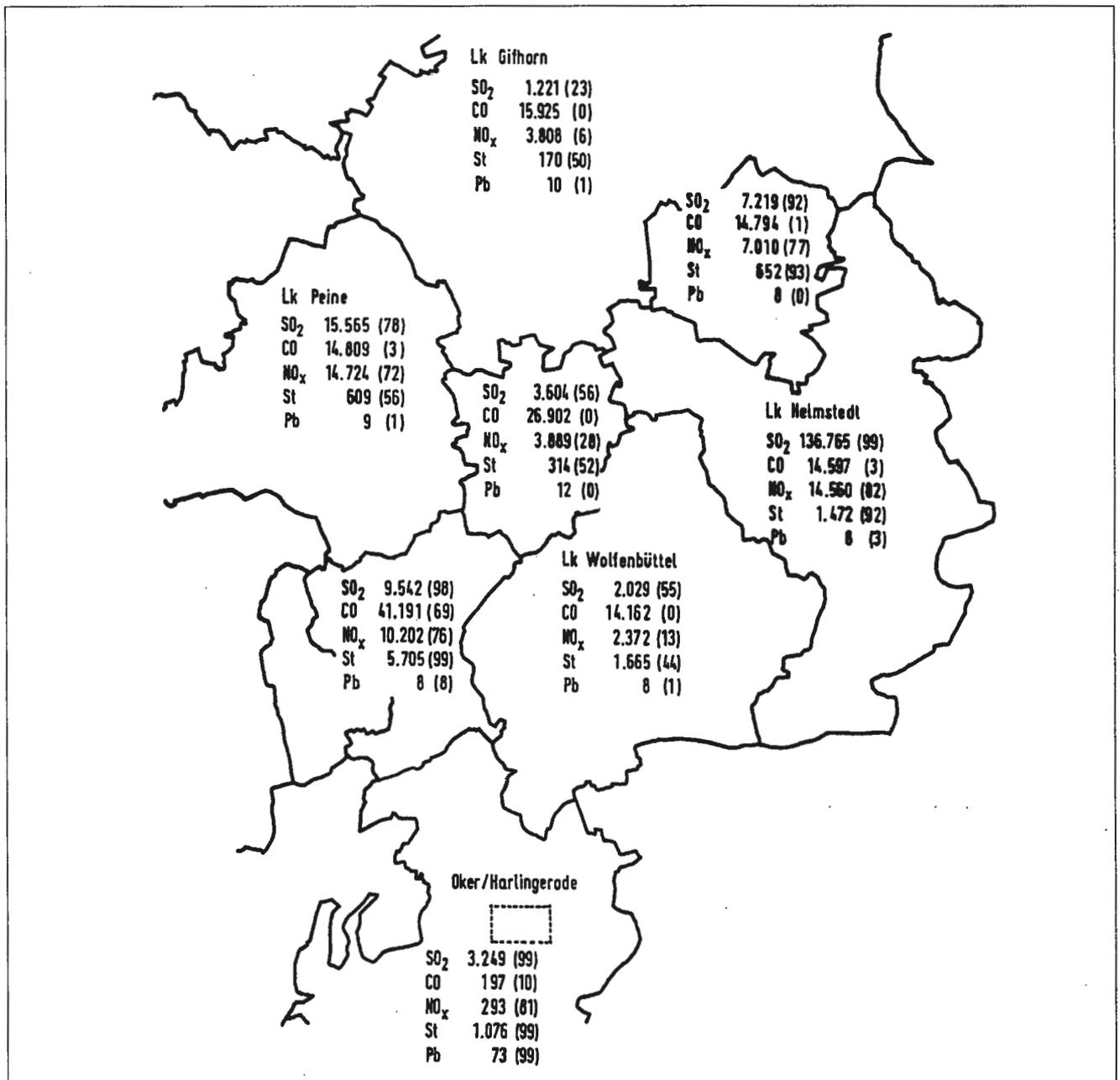


Abbildung 5: Emissionen in Südostniedersachsen. Angaben in Tonnen pro Jahr; in ( ): Anteile aus hohen Schornsteinen in %, nach Nds. Min. f. Bundesangelegenheiten (1983/85), Stand der Erhebungen: 1981 bzw. 1983.

### 3. Meßkonzept

Eine differenzierende Bewertung möglicher direkter und/oder indirekter Einflüsse luftgetragener Schadstoffe auf die dynamische Entwicklung von Grünlandökosystemen kann vor dem Hintergrund der ökosystemaren Zusammenhänge zwischen natürlichen und nutzungsbedingten Faktorenkomplexen (vgl. Abb. 2) nicht erfolgen, solange die tatsächliche stoffliche Belastung aus der Atmosphäre sowie die wichtigsten Bilanzgrößen in Vegetation und Boden nicht ermittelt werden.

#### 3.1 Übergang luftgetragener Stoffe in Vegetation und Boden von Dauergrünland unter Mähnutzung - Erstellung von Stoff-Bilanzen - Messung von Stoff-Flüssen

Die quantitative Ermittlung der Einträge luftgetragener Stoffe in Agrar-Ökosysteme erfordert die Erfassung von Stoff-Einträgen aus unterschiedlichen Depositionsformen an unterschiedlichen Depositionsorten unter Berücksichtigung der Stoff-Arten und Stoff-Artenkombinationen sowie ihrer Teilchengröße (Dämmgen und Jäger, 1987). Dabei ist zwischen sedimentierenden Luftinhaltsstoffen (Bulk-Depositionen) und Aerosol- bzw. Gas-Depositionen zu unterscheiden (Abb. 7). Jede Eintragsart (Depositionsart) hat im Bestand ihre bevorzugten Eintragsorte (Depositionsorte), an die die Stoffe durch Sedimentation, Advektion, Brownsche Bewegung oder Diffusion gelangen. Aus Abb. 8 geht hervor, wie sich Depositionsorte in einem Grünlandbestand zu Depositions-Zonen zusammenfassen lassen und welchen Einflüssen diese durch die Bewegung der Luft unterliegen können. Depositionen können

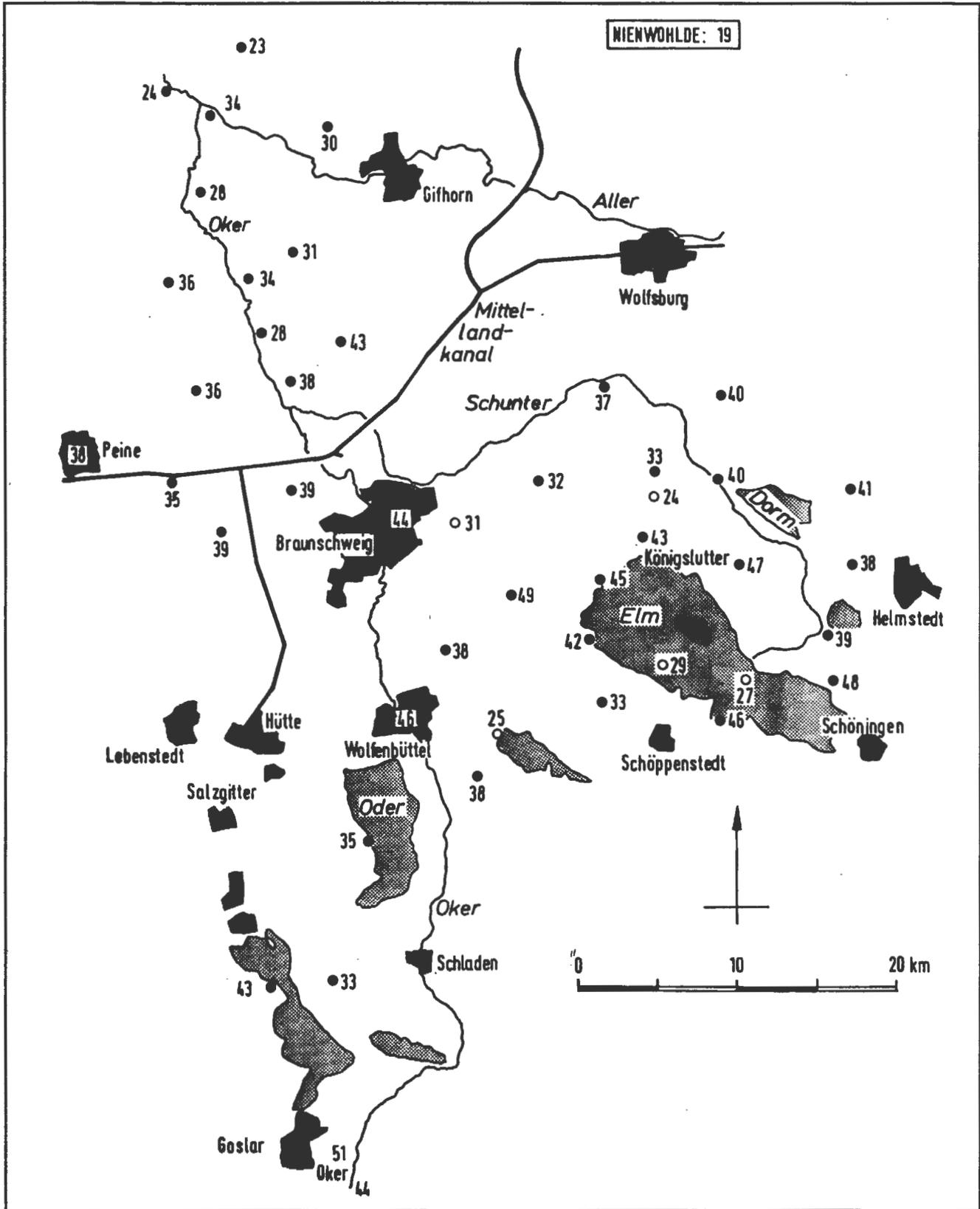


Abbildung 6: Schwefeldioxidkonzentrationen in der Umgebungsluft in Südostniedersachsen (Jahresmittelwerte) Angaben in Mikrogramm SO<sub>2</sub> pro Kubikmeter, ermittelt mit Hilfe des SAM-Verfahrens (schwarze Kreise: frei anströmbar; offene Kreise: nicht frei anströmbar) bzw. nach Angaben des Lufthygienischen Überwachungssystems Niedersachsen (Peine, Braunschweig, Wolfenbüttel, Oker/Harlingerode, Bad Harzburg), Stand der Erhebungen: 4/85 bis 4/86.

Tabelle 2: **Stoffeinträge (in g/ha·a) in Grünlandökosysteme in Südostniedersachsen. Meßjahr 1985/86**

Element	Bulk- Deposition	Aerosol- Deposition	Deposition aus der Gasphase
in g/ha·a			
Na	5.170		
K	1.250		
Mg	1.920		
Ca	10.100		
Al	1.750		
Pb	128	70 <sup>1)</sup>	
N			
- Nitrat-N	8.500	} 2.500 <sup>1)</sup>	17.000 <sup>2)</sup>
- Ammoniak-N	8.000 <sup>3)</sup>		25.000 <sup>4)</sup>
S			
- Sulfat-S	9.700	} 2.300 <sup>1)</sup>	52.400 <sup>5)</sup>
- Sulfit-S	4.300		
Cl	16.400		
Zn	1.510		
Cd	3	1,5 <sup>1)</sup>	
Mn	140		
Fe	3.640		

1) Berechnet aus der Konzentration in der Luft mit einer Depositionsgeschwindigkeit von 0,2 cm/s.  
 2) Berechnet aus den NO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Luft mit einer Depositionsgeschwindigkeit von 0,5 cm/s.  
 3) Geschätzt nach Angaben der VDI-KOMMISSION REINHALTUNG DER LUFT (1983).  
 4) Berechnet aus den NH<sub>3</sub>-Konzentrationen in der Luft mit einer Depositionsgeschwindigkeit von 0,7 cm/s.  
 5) Bestimmt mit Hilfe des SAM-Verfahrens, Depositionsgeschwindigkeit 1,0 cm/s.

aus bewegter und unbewegter Luft erfolgen. Je nach Art des Bestandes und der Höhe der Windgeschwindigkeit ist dabei ein Teil der Luft im Bestand ruhend (anhängende Luft). Aus ruhender Luft sind Diffusion und Sedimentation möglich. Im Bereich der bewegten Luft scheiden sich Schwebstäube und Nebel durch Wirbelbildung hinter Kanten und Spitzen ab. Neben primären Depositionsvorgängen treten durch Abwaschung sekundäre hinzu.

Die in Abb. 8 angegebenen Zonen haben veränderliche Grenzen. Dabei ist die Austauschrate für den Austausch eines gasförmigen Stoffes zwischen der freien Atmosphäre (Umgebungsluft) und dem Innern eines Blattes zunächst eine Funktion des Konzentrationsgradienten sowie einer Reihe von Widerständen (vgl. Abb. 9). Die Einzelwiderstände sind abhängig von den jeweiligen aerodynamischen und physiologisch-biochemischen Eigenschaften der Pflanzen. Der aerodynamische oder Grenzschichtwiderstand  $R_a$  ist stark abhängig von der Windgeschwindigkeit (Konvektion, Turbulenz) und der Oberflächenbeschaffenheit des Blattes. So erhöht sich die Aufnahme von Schwefeldioxid ins Pflanzeninnere mit steigender Windgeschwindigkeit, da dies zu einer Verminderung der Dicke der unmittelbar an der Blattoberfläche anhängenden Luftschicht führt; der Diffusionsweg wird kleiner (Klein et al., 1978; Jäger und Klein, 1980; Tingey und Taylor, 1982).

Die Eigenschaften des Bestandes als Senke ändern sich deshalb schon mit der Windgeschwindigkeit. Sie sind darüber hinaus auch von anderen Größen abhängig, etwa von der Luftfeuchte und der Sonneneinstrahlung; Unterschiedliche Atemaktivität der Pflanzen hat unterschiedliche Konzentrationsgradienten und damit unterschiedlich große Diffusionsströme zur Folge. Ebenso haben der Entwicklungszustand des Bestandes und die Bodenbeschaffenheit Einfluß auf die Qualität der Senke. Die Kenntnisse über die Qualität der Senken sind deshalb Voraussetzung für jegliche Bilanzierung.

Zur Bilanzierung werden die Ein- und Austräge jeweils eines Elementes in einem räumlich und zeitlich abgegrenzten System erfaßt. Den Bezugsraum, an dessen Grenzen die Zu- und Abgänge saldiert werden, stellen der durchwurzelte Bodenbereich und die oberirdische Biomasse dar. Die Beschreibung von Input-Output-Bilanzen in Grünlandökosystemen erfordert demnach eine quantitative Erfassung der Element-Einträge aus der Atmosphäre und der Einträge über eine eventuelle Düngung sowie Angaben über die Element-Entzüge durch Mahd und über den Element-Austräge mit dem Sickerwasser (Abb. 10). Wasserhaushaltsuntersuchungen sind deshalb notwendige Voraussetzungen einer Bilanzierung. Im Falle des Stickstoffs kann die Bilanz durch die Denitrifikation und die symbiontische bzw. asymbiontische N<sub>2</sub>-Fixierung maßgeblich beeinflußt werden.

In einem grundwasserfernen Grünlandökosystem unter Mähnutzung läßt sich die Input-Output-Bilanz durch folgende Größen und Gleichungen beschreiben:

- (1) Bulk-Deposition
- (2) Aerosol-Deposition
- (3) Deposition aus der Gasphase
- (4) Düngung (und N<sub>2</sub>-Fixierung)
- (5) Entzug durch Mahd
- (6) Austrag mit Sickerwasser und Oberflächenabfluß
- (7) Interne Vorratsänderung

$$\text{Bilanz 1: } (7) = (1) + (2) + (3) + (4) - (5) - (6)$$

Die internen Vorratsänderungen lassen sich z.B. durch folgende Pool-Größen und Gleichungen beschreiben:

- (8) Element-Vorratsänderung in der restlichen oberirdischen Biomasse (Stoppeln)
- (8a) Element-Vorrat im Jahr n
- (8b) Element-Vorrat im Jahr n+1

$$(8) = (8b) - (8a)$$

- (9) Element-Vorratsänderung in der unterirdischen Biomasse (Wurzeln und Mikroorganismen)

- (9a) Element-Vorrat im Jahr n
- (9b) Element-Vorrat im Jahr n+1

$$(9) = (9b) - (9a)$$

- (10) Element-Vorratsänderung im Mineralboden

- (10a) Element-Vorrat im Jahr n
- (10b) Element-Vorrat im Jahr n+1

$$(10) = (10b) - (10a)$$

(11) Summe der internen Vorratsänderungen

**Bilanz 2:** (11) = (8) + (9) + (10)

**Bilanz 3:** (7) =!(11)

Von diesen zur Beschreibung der Bilanzen wichtigen Größen sind zur Zeit einige kaum oder nur ungenau bestimmbar:

- Bulk-Deposition: Alle gebräuchlichen Bulk-Sammler erfassen auch Schwebstaubeinträge in unterschiedlichem Ausmaß; notwendig ist die Entwicklung von Sammlern ohne oder mit exakt definierter Schwebstaubabscheidung.
- Aerosol-Deposition: Über die Abscheidung von Schwebstäu-

ben an kurzer Vegetation ist bislang nur sehr wenig bekannt; notwendig ist die Ermittlung realistischer Depositionsgeschwindigkeiten für Schwebstäube und ihre Inhaltsstoffe im Jahresverlauf und die Entwicklung und Eichung von Sammlern, die im Mittel gleiche Sammeleigenschaften wie ein Grünlandbestand aufweisen.

- Depositionen aus der Gasphase: Die Depositionsgeschwindigkeiten einiger reaktiver Gase sind nur in Einzelfällen bekannt; notwendig ist die Ermittlung realistischer Depositionsgeschwindigkeiten für alle reaktiven Gase im Jahresverlauf und die Entwicklung und Eichung passiver Sammler, die im Mittel ähnliche Sammeleigenschaften wie ein Grünlandbestand besitzen.

Tabelle 3: Beschreibung des in Abb. 13 wiedergegebenen Bodenprofils

Tiefe	Horizont	Beschreibung
0 - 20 cm	I Ah	dunkel-braungrau humoser, schwach lehmiger Sand krümelig-locker stark durchwurzelt (Gräser) durch Tiertätigkeit (Maulwurf, Nager, Würmer) taschiger, unregelmäßiger Übergang nach unten
20 - 30/60 cm	I Bv/Al	mittelbraun oben noch schwach humos schluffiger Sand kohärent, röhrig durchport (Wurzelröhren und senkrechte Wurmgänge)
30/60 cm		Grenze des Decksedimentes Sandlöß
30/60 - 80/120 cm	II Al/Bv	Geschieberest, teilweise stark sandig-kiesig mit einigen gerundeten Steinen, unsortiert Feinbodenanteil fahl-hellbrauner schwach lehmiger Sand mit rostbraunen Zonen, wenig kohärent andere Teile mit geringerem Kiesanteil und stark von schluffigem Sand durchsetzt (eingemischtes Decksediment), fahl-hellbraun, wenig kohärent senkrechte Regenwurmgänge mit dunkel-humoser Füllung
80/120 - >140 cm	III Bv/Bt	hell gelblichbraun, wenig gegliedert Sand mit undeutlicher Feinschichtung deutliche, meist horizontal wellenförmig verlaufende Bänder durch sattbraune Feinton-Einlagerung senkrechte Regenwurmgänge mit dunkel-humosem Füllmaterial

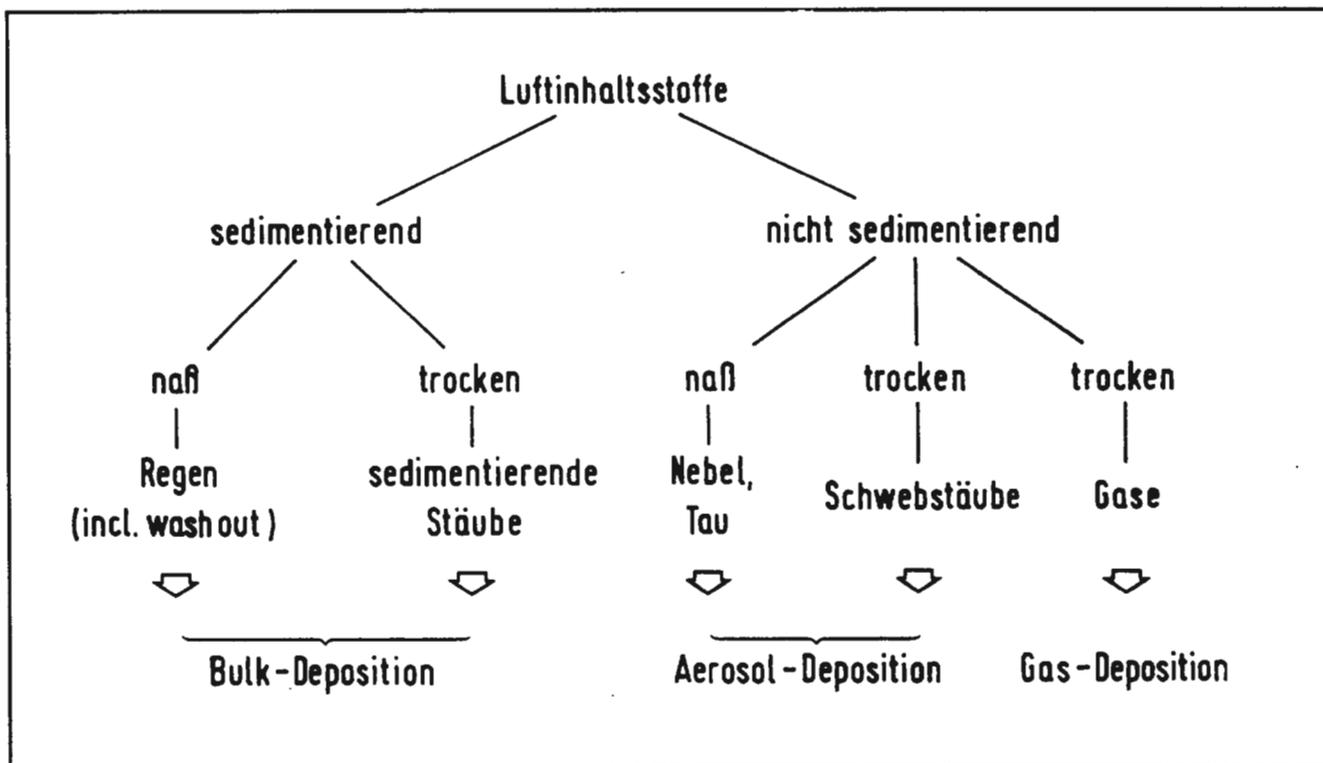


Abbildung 7: Übersicht über Depositionsformen von Luftinhaltsstoffen

- Austrag mit dem Sickerwasser: Die Bestimmung des Austrags mit dem Sickerwasser soll mit Hilfe des Modells von Rohdenburg et al. (1986) erfolgen; notwendig ist die Anpassung des Modells an die Standortgegebenheiten und spezifischen Fragestellungen.

Die Element-Bilanzierung läßt sich umgekehrt zu einer Überprüfung der ermittelten Depositionsgeschwindigkeiten heranziehen:

$$\text{Bilanz 4: } (2) + (3) = (11) - (1) - (4) + (5) + (6)$$

Die Validität und Plausibilität der gemessenen Einträge bzw. der Stoff-Konzentrationen in der Luft in zeitlicher und stofflicher Hinsicht und die großräumige Repräsentativität der ermittelten Daten wird anhand weiterer Meßstellen überprüft. Plausible und für Grünlandökosysteme repräsentative Erkenntnisse müssen sich prinzipiell auch auf verwandte Ökosysteme anwenden lassen. Die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf anders genutzte Agrarökosysteme wird in Zusammenarbeit mit dem Sonderforschungsbereich „Wasser- und Stoffdynamik in Agrar-Ökosystemen“ (SFB 179) an der TU Braunschweig untersucht.

### 3.2 Kausalanalytischer Nachweis möglicher Auswirkungen von Luftschadstoffen im Dauergrünland

Die Komplexität natürlicher Ökosysteme bedingt, daß es aus methodischen und arbeitstechnischen Gründen prinzipiell nicht möglich ist, die Struktur und Entwicklung eines Ökosystems in allen Einzelheiten zu erfassen. Die zu lösenden Probleme können letztlich nur anhand eines reduktionistischen Erfassungsmodells erarbeitet werden, das aber lediglich ein vereinfachtes Bild des realen Ökosystems mit einer Einengung

auf grobe Strukturen liefern kann (Schwarzenbach, 1985). Mit der Beschränkung auf eine überschaubare Zahl ausgewählter Informationen soll versucht werden, das Ökosystem „Grünland“ so weit zu charakterisieren, daß Aussagen über den Verlauf der Entwicklung und über die begleitenden und verlaufsbestimmenden Vorgänge möglich werden.

Nach Schwarzenbach (1987) kann die immissionsökologische Grundfrage:

„Unter welchen Voraussetzungen und auf welchen Wegen führen Belastungen mit luftgetragenen Stoffen zu irreversiblen Veränderungen natürlicher oder vom Menschen beeinflusster Ökosysteme?“

beantwortet werden, wenn folgende drei Teilprobleme zufriedenstellend gelöst werden können:

- Wie lassen sich Veränderungen eines Ökosystems in Abhängigkeit von der Zeit mit hinreichender Zuverlässigkeit erkennen und quantifizieren?
- Wie lassen sich beobachtete Veränderungen eines Ökosystems zur Prognose über den mutmaßlichen Verlauf der künftigen Entwicklung heranziehen?
- Können bestimmte Veränderungen eines Ökosystems als Warnzeichen einer bevorstehenden Fehlentwicklung mit irreversiblen Auswirkungen dienen?

Art, Ausmaß und Richtung eigendynamischer Steuerungsprozesse können Aufschluß über den Zustand und die Entwicklungstendenz eines Ökosystems geben. Als Warnzeichen einer drohenden Destabilisierung des untersuchten Ökosystems können z.B. nach Schwarzenbach (1987) angesehen werden

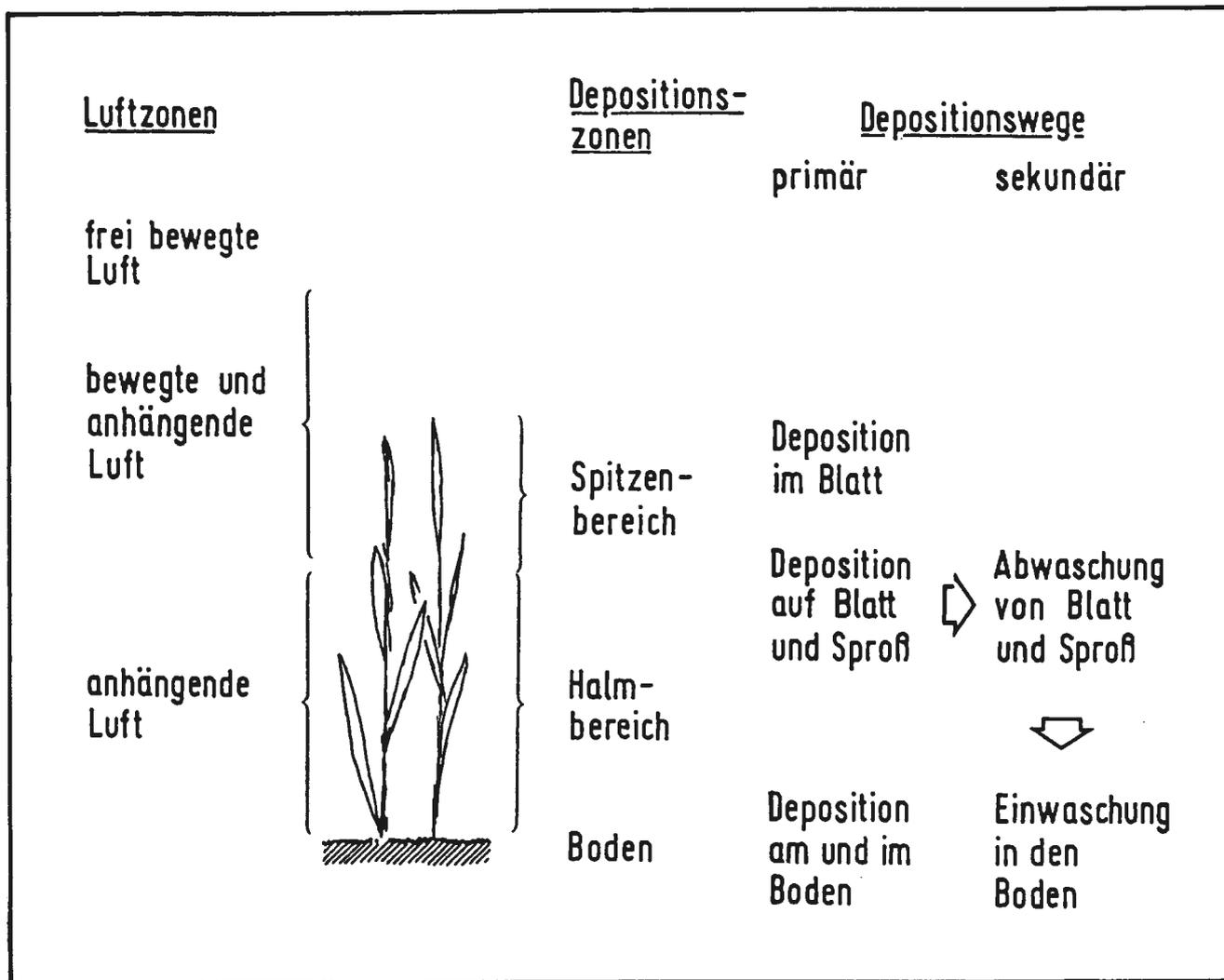


Abbildung 8: Depositions-zonen und -wege für Stoffeinträge aus der Luft in Grünlandökosystemen

- eine Diversitätsänderung der Lebensgemeinschaft,
- eine Massenvermehrung bisher unauffälliger Arten,
- ein Massensterben der Individuen einzelner Arten,
- eine Verschiebung im Spektrum der Leitarten,
- ein vermehrtes Auftreten von Kümmerformen und subvitalen Individuen bei bisher optimal gedeihenden Leitarten, - ein vermehrtes Vorkommen von Stresssymptomen,
- ein epidemisches Auftreten von Krankheiten (vor allem bei den bisher optimal gedeihenden Leitarten des Ökosystems),
- eine zunehmende Zahl auftretender Entwicklungsstörungen sowie
- Fortpflanzungsstörungen (wie eine ungenügende Keimrate von Samen der wichtigsten Leitarten).

Zur Beantwortung der oben aufgeführten Fragen wurden vor dem Hintergrund der in Abschnitt 2 beschriebenen Immissions- und Depositionsverhältnisse (chemisches Klima) folgende Lösungsansätze gewählt:

- Beschreibung der dynamischen Entwicklung des Grünlandökosystems unter Berücksichtigung der Faktorenkomplexe „Wetter“, „Bewirtschaftung“ (Düngungsvarianten) und „Wasserversorgung“ (Zusatzberegnung).

- Schaffung eines künstlichen Belastungsgradienten durch den Einsatz von Open-top-Kammern, die mit gefilterter bzw. ungefilterter Umgebungsluft versorgt werden.

- Durchführung von Modellexperimenten mit geklontem Pflanzenmaterial vom Standort (Reinkulturen, Mischkulturen) unter Berücksichtigung der genetischen Variabilität unter standardisierten Bedingungen (Konkurrenzexperimente, Begasungsexperimente, Düngungsexperimente usw.)

#### 4. Die zur Erfassung der Struktur und der Veränderung eines Grünlandökosystems notwendigen Meßgrößen

##### 4.1 Die Einteilung des Gesamtsystems in Kompartimente

Engere Ziele der Arbeiten sind deshalb

- die Erfassung von Stoffflüssen im Ökosystem,
- die Erfassung von Wirkungen luftgetragener Stoffe auf Vegetation und Boden einschließlich der Bodenmikroorganismen,
- die Charakterisierung ökosystemarer Zusammenhänge und
- die Entwicklung geeigneter Monitoring-Systeme zur Frühdiagnose von Schadeinflüssen.

$$J = C / (R_a + R_s + R_c + R_r)$$

### GASPHASE

#### DURCHLÄSSIGKEIT

Widerstände ( $R_L$ )

Grenzschicht ( $R_a$ )

Stomata ( $R_s$ )

Kutikula ( $R_c$ )

Konzentrationsgradient ( C )

Außenluftkonzentration ( $C_a$ )

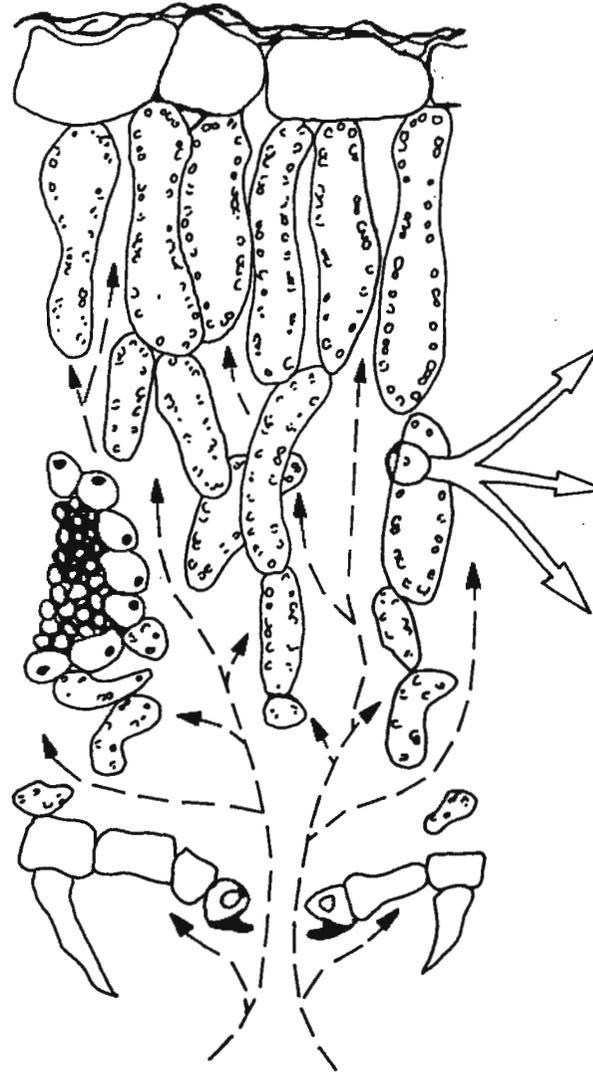
Konz. im Blattinnern ( $C_i$ )

Schadgasfluß

Fluß zur Blattoberfläche ( $J_{\text{Oberfl.}}$ )

Fluß in das Blattinnere ( $J_{\text{innen}}$ )

$J_{\text{gesamt}} = J_{\text{Oberfl.}} + J_{\text{innen}}$



### FLÜSSIGPHASE

#### DURCHLÄSSIGKEIT

Widerstände

Chemische/Mesophyll-/Sonstige ( $R_r$ )

Durchlässigkeit des Mediums

Diffusion

Massenstrom

Chemischer Potentialgradient ( C )

Konzentration beim Phasenwechsel ( $H_m C_i$ )

Wasserlöslichkeit

Größe der inneren Oberfläche

Chemische Umwandlungen

Konzentration am Wirkort ( $C_p$ )

Konzentration im Stoffwechsel ( $C_s$ )

Entgiftungsreaktionen

Flußbeschleunigung

Indirekte chemische Umwandlungen.

Abbildung 9: Einflußgrößen des Schadstoffflusses (J)  $J = C / (R_a + R_s + R_c)$  (verändert nach Jäger und Klein, 1980 und Tingey und Taylor, 1982)

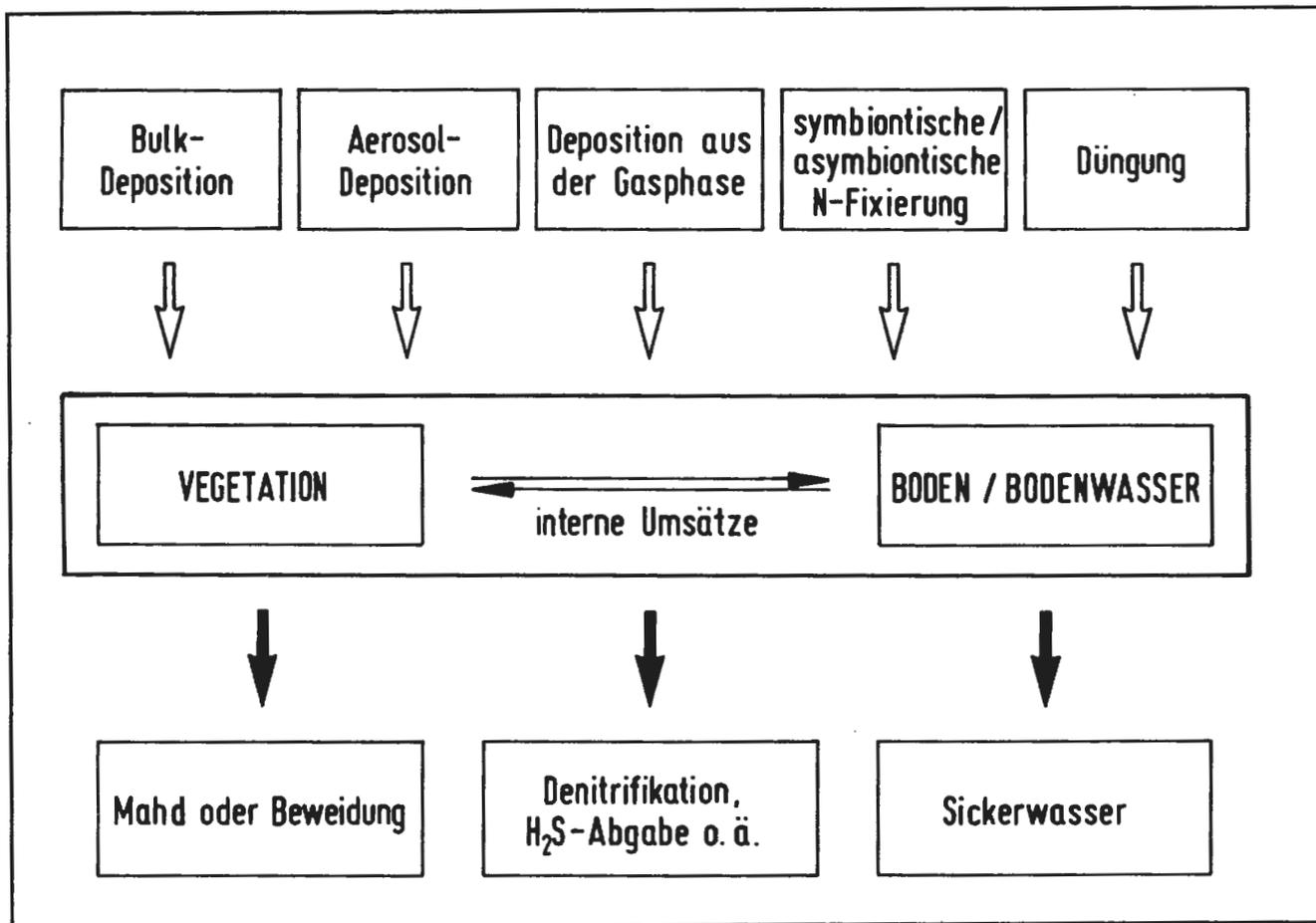


Abbildung 10: Stoffflüsse in einem grundwasserfernen Grünlandökosystem unter Mähnutzung

Zur Beantwortung unserer Fragen mit experimentellen Mitteln ist es zweckmäßig, das zu untersuchende Ökosystem in die Kompartimente Atmosphäre, Vegetation (oberirdische Biomasse) und Boden/Bodenwasser (unter Einschluß der unterirdischen Biomasse) zu unterteilen. Das Kompartiment Boden/Bodenwasser wird bei Bedarf in die Bereiche

- Mikroorganismen,
- Wurzeln,
- tote organische Substanz,
- Mineralvorrat und
- Bodenwasser

eingeteilt. Die Untergrenze des Kompartiments Boden/Bodenwasser wird in 120 cm Tiefe (unterhalb der Durchwurzelungstiefe) angesetzt. Die Obergrenze des Kompartiments Luft liegt bei 10 m über Geländeoberfläche.

Diese Untersuchungen sollen letztlich in die Formulierung von Modellen münden (ecological modelling). Im folgenden werden die Meßgrößen, die als mögliche Einflußgrößen gelten oder zur Charakterisierung eines Kompartiments notwendig erscheinen, aufgeführt.

#### 4.2 Kompartiment Luft

Im Kompartiment Luft werden meteorologische Daten (physikalisches Klima) sowie die Konzentrationen von luftgetragenen Stoffen und ihre Deposition (Depositionen von Gasen, Aerosolen und sedimentierenden Niederschlägen; chemisches Klima) erfaßt:

#### Wettergrößen

Niederschlagsmenge und -verteilung, Windrichtung und -geschwindigkeit in mehreren Höhen, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Strahlungsbilanz und photosynthetisch-aktive Strahlung.

#### chemisches Klima

Stoffkonzentrationen in der Luft: SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, O<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>, HCl, Schwebstaub, Staubinhaltsstoffe

Stoffdepositionen aus der Gasphase: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, HCl  
 Stoffdepositionen aus Aerosolen: Schwebstaub, Staubinhaltsstoffe  
 Stoffdepositionen aus sedimentierenden Niederschlägen: Niederschlagsinhaltsstoffe

#### 4.3 Kompartiment Vegetation

Im Kompartiment Vegetation werden

- die botanische Zusammensetzung,
- die Erträge,
- die Futterqualität,
- der Ionenhaushalt und
- biochemisch-physiologische Stressindikatoren untersucht.

#### 4.4 Kompartiment Boden/Bodenwasser

Zur Beschreibung des Kompartiments Boden/Bodenwasser erfassen wir

- die Bodentemperatur in mehreren Tiefen,
- die Bodenfeuchte in mehreren Tiefen,
- die chemischen Eigenschaften des Bodens bzw. des Bodenwassers sowie
- bodenbiologischen Parameter, Wurzeldynamik und Mykorrhizierung

### 5. Beschreibung der Versuchsfläche und der im Untersuchungsprogramm eingesetzten Meßeinrichtungen

#### 5.1 Standortbeschreibung

Auf dem Freigelände der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) wurde 1983/84 eine Versuchsfläche eingerichtet, die vom Institut für Grünland- und Futterpflanzenforschung zur Verfügung gestellt wurde. Die Fläche enthält die für die Untersuchungen notwendigen Parzellen (Originalbestände und Transplantate), Einrichtungen für den Ausschluß von Schadgasen und Lysimeter zusammen mit Meßeinrichtungen für meteorologische Daten und Daten des chemischen Klimas. Abb. 11 und 12 geben einen Überblick über die Ausrüstung und ihre räumliche Anordnung.

Vor 1983 wurde die Fläche als Mähweide zur Futterproduktion für die Rinderhaltung intensiv genutzt. Die Ende der Sechzigerjahre eingesäten Flächen wurden bis 1977 mit Handelsdünger (NPK) gedüngt, von 1978 bis 1982 mit Gülle. Die Bestände sind reine Weidelgrasweiden (*LOLIUM-CYNOSURETUM TYPICUM*), die standörtlich zur Ausbildung einer *Poa pratensis*-Fazies neigen. Gute bis sehr gute Futterpflanzen (z.B. *Lolium perenne*, *Poa pratensis*, *Poa trivialis*, *Dactylis glomerata*, *Trifolium repens*) dominieren im Bestand. Aber auch mittelwertige Gräser und Kräuter erreichen z.T. hohe Ertragsanteile (z.B. *Bromus hordeaceus*, *Achillea millefolium*).

Der Boden ist eine Braunerde aus Sandlöß wechselnder Mächtigkeit über sandig kiesigem Geschieberest über älteren fluvioglazialen Sanden. (Vorausgegangene Bodenentwicklung: Parabraunerde/Bänderparabraunerde. FAO-Beschreibung: *dystric-luvisol-cambisol on silty-sandy cover-sediments overlying gravelly-sandy morainic deposits and glaci-fluviatile sands*).

Die Beschreibung eines Bodenprofils (Abb. 13) ist in Tab. 3 wiedergegeben, die Ergebnisse der Schlämmanalyse sind in Tab. 4, die zur bodenchemischen Charakterisierung notwendigen Parameter in Tab. 5 zusammengefaßt.

In diesen Beständen wurden Dauerbeobachtungspartellen angelegt, die unterschiedliche Düngergaben erhalten. Die hierbei gewählten Varianten gehen aus Tab. 6 hervor. Von diesen Flächen ist eine ungedüngte Parzelle, die an anderer Stelle der FAL entnommen worden war, besonders erwähnenswert: Sie repräsentiert eine Magerweidegesellschaft (*LUZULO-CYNOSURETUM*), die sich als Folge einer über dreißigjährigen Bewirtschaftung ohne zusätzliche Düngung ausgebildet hat. Die Unterschiede der floristischen Artenzusammensetzung der gedüngten und der ungedüngten Flächen gehen aus Tab. 7 hervor.



Abbildung 11: Ansichten der Versuchsfläche

#### 5.2 Open-top-Kammern. Aufbau, Funktionsweise und Erfahrungen

Zum Nachweis möglicher Auswirkungen luftgetragener Stoffe auf Vegetation und Boden des untersuchten Ökosystems wurden im Herbst 1986 zehn Open-top-Kammern, die mit gefilterter (CF = charcoal-filtered) bzw. ungefilterter (NF = non-filtered) Umgebungsluft versorgt werden, aufgebaut (Stichtag für die Inbetriebnahme: 26.11.1986). Mit zwei weiteren Open-top-Kammern (CF5 und NF5) werden Untersuchungen zur Bioindikation durchgeführt.

Der Aufbau der von uns eingesetzten Open-top-Kammern entspricht weitgehend den Anfang der siebziger Jahre gleichzeitig im Boyce Thompson Institute for Plant Research in Yorkers (N.Y.) (Mandl et al., 1973) und im U.S. Department of Agriculture/U.S. Environmental Protection Agency (Heagle et al., 1973) entwickelten Kammern. Einzelheiten der Konstruktion gehen aus Abb. 14 hervor.

Jede Kammer besteht aus einem Aluminiumgestell und ist mit einer Polyethylenfolie bespannt. Mit Hilfe eines Gebläses wird in den unteren Teil der Kammern Luft eingepulst, die einen Staub-Vorfilter und bei den CF-Kammern zusätzlich ein Aktivkohle-Filter passiert hat. Die Betriebskenngrößen sind ebenfalls Abb. 14 zu entnehmen. Die Luft entweicht durch den oberen offenen und sich konisch verengenden Teil der Kammern, wodurch ein Eindringen von Außenluft durch Diffusion und Turbulenz weitgehend verhindert wird (Hogsett et al., 1985).

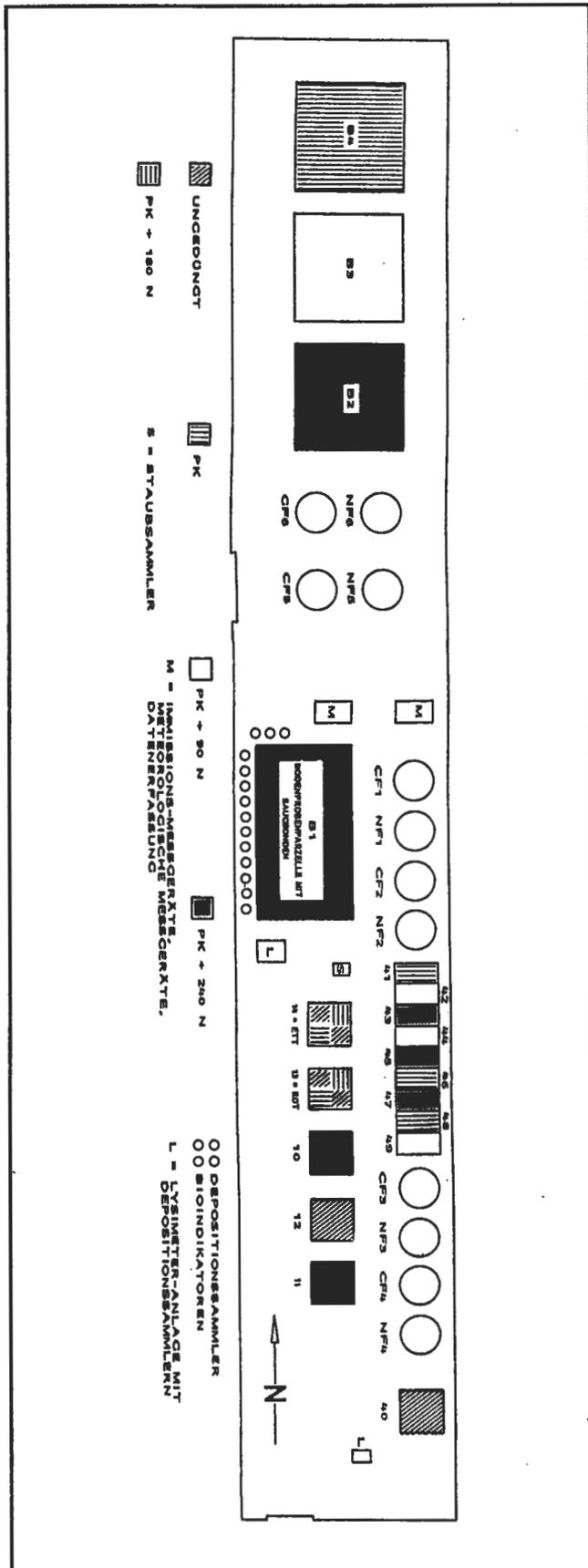


Abbildung 12: Ausstattung der Meßstelle FAL (Übersicht)

Die vegetationskundlichen Untersuchungen erfolgen auf 150 cm x 100 cm großen Flächen im Zentrum der Kammern, da Randeffekte (z.B. durch an den Folien herablaufendes Niederschlagswasser) nicht zu vernachlässigen sind.

Obwohl wichtige Klima-Variablen für die Bestände im Freiland und in den Open-top-Kammern in gleicher Weise wirksam sind (z.B. jahreszeitliche Klimaänderungen), sind Abweichungen der Bedingungen innerhalb der Kammern von den Freilandverhältnissen bei den Faktoren

- Windgeschwindigkeit
  - Licht
  - Temperatur
  - Niederschlag
  - Luftfeuchte
- zu beobachten.

Die Windgeschwindigkeit und Windrichtung innerhalb der Kammern sind im Gegensatz zum Freiland konstant. Durch die Verwendung von Polyethylenfolie zur Kammerbespannung ist der Anteil der photosynthetisch-aktiven Strahlung, der in die Kammern gelangt, geringer als im Freiland. Nach Jäger et al. (1987) liegen die Lichtverluste im Mittel zwischen 15 und 20 %. Der Lichtverlust ist dabei abhängig von der Tages- und Jahreszeit; er ist als Folge der flacheren Sonneneinstrahlung im Frühjahr und Herbst größer als im Sommer. Durch Verwendung von Polytetrafluorethylen-(PTFE)-folien dürften die Lichtverluste deutlich verringert werden. Die durchschnittlichen Lufttemperaturen können nach Jäger et al. (1987) ca. 0,5 bis 2 K höher liegen als im Freiland.

Messungen von Blatt-Temperaturen in Open-top-Kammern zeigen, daß diese Werte ebenfalls ca. 0,5 bis 2 K höher sein können als unter Freilandbedingungen. Durch den konisch verengten oberen Rand der Kammern gelangen bis zu 40% (Vier-Wochen-Mittel) des Freilandniederschlages nicht ins Kammerinnere. Zur Vermeidung artefizieller Wasserstresseffekte werden die Bestände mit Deionat beregnet, wenn die Wasserspannung im durchwurzelten Bodenbereich in 5 cm Tiefe 0,50 bar übersteigt; daher erfolgt während der Vegetationsperioden grundsätzlich ein Ausgleich zum Freilandniederschlag.

Die in Abb. 15 wiedergegebenen Gänge der photosynthetisch-aktiven Strahlung, der relativen Luftfeuchten sowie der Lufttemperaturen in den verwendeten Open-top-Kammern und im Freiland für drei Tage mit unterschiedlicher Strahlungsintensität veranschaulichen die beschriebenen Veränderungen des physikalischen Klimas in Open-top-Kammern.

Diese Verschiebungen im physikalischen Klima rufen Änderungen der Struktur artenreicher Bestände (vgl. Tab. 7 und Abb. 16) in signifikanter Weise hervor. Durch die mit dem Einsatz von Open-top-Kammern geschaffenen „Standortveränderungen“ erlangt *Agropyron repens* eindeutige Wettbewerbsvorteile gegenüber den anderen Arten. Eindeutige Wettbewerbsnachteile durch Open-top-Kammern sind unter den Gräsern für *Bromus mollis* (= *Bromus hordeaceus*), unter den Kräutern für *Taraxacum officinalis* und *Achillea millefolium* sowie für die Leguminose *Trifolium repens* festzustellen. Insgesamt nimmt unter den Bedingungen der Open-top-Kammern der Ertragsanteil der Gruppe der Gräser zu, während sich die Ertragsanteile der Gruppen der Kräuter und Leguminosen verringern.

Zur Ermittlung der aktuellen Schadgaskonzentrationen ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_3$ ) in den Open-top-Kammern wurde im Herbst 1987 ein Probegas- Absaug-System (Hersteller: Messer Griesheim GmbH, Frankfurt) gemäß Abb. 17 installiert. Die

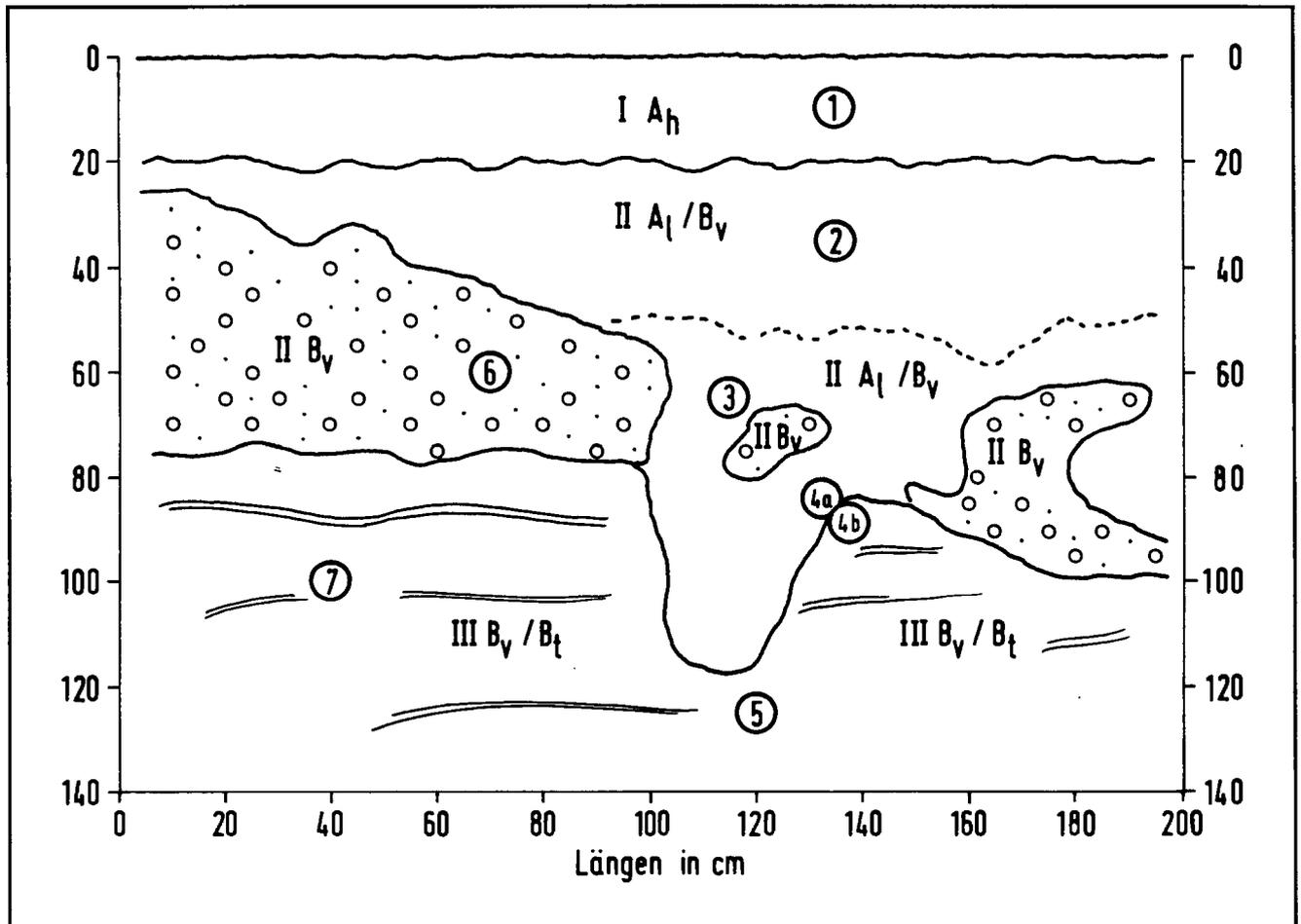


Abbildung 13: **Bodenprofil Standort FAL. Die Beschreibung des Bodenprofils und die Ergebnisse der Schlämmanalysen sind den Tab. 3 und 4 zu entnehmen.**

Messung der Schadgaskonzentrationen erfolgt mit Hilfe der in Kap. 5.3 angegebenen Meßverfahren.

### 5.3 Meßeinrichtungen

#### 5.3.1 Depositionen und Konzentrationen

##### 5.3.1.1 Die Bestimmung der Konzentrationen von Gasen und Stäuben in der Umgebungsluft

#### SCHWEFELDIOXID MIT HILFE EINES UV-FLUORESCENZ-DETEKTORS

Verwendet wird ein Meßgerät der Fa. Monitor Technologies GmbH, Allershausen, Modell ML 8850.

#### SCHWEFELDIOXID COULOMETRISCH

Zur Messung niedriger Schwefeldioxid-Konzentrationen wird das COSO<sub>2</sub>-Gerät der Fa. LFE Laboratorium für Industrielle Forschung, Maintal, eingesetzt.

#### SCHWEFELDIOXID NACH DEM TCM-VERFAHREN

Benutzt wird eine Anlage, wie sie für die Probenahmestellen

des Umweltbundesamtes entwickelt wurde. Dabei wird das Standard-Verfahren (VDI-RdL, 1968) so modifiziert, daß es für die kontinuierliche Probennahme im Tagesverlauf geeignet ist (Umweltbundesamt, 1981 a; Dämmgen et al., 1988). Die Meßergebnisse können mit Fehlern von ±5%, bei extrem hohen und bei sehr kleinen Werten auch größeren Fehlern, behaftet sein.

#### STICKOXIDE UND AMMONIAK MIT HILFE DES CHEMILUMINESZENZ-VERFAHRENS

Wir setzen den NO<sub>x</sub>-Analysator Modell ML 8840 mit Ammoniak-Modifikation der Fa. Monitor Technologies GmbH, Allershausen, ein.

#### AMMONIAK NACH DEM INDOPHENOL-VERFAHREN

Die Bestimmung erfolgt in Anlehnung an die von VDI-RdL (1974) gegebene Vorschrift. Die Analyse der Proben wird mit Hilfe eines Autoanalyzers und einer angepaßten Analysenvorschrift durchgeführt. Für den Probenwechsel und die Dosierung des Luftstroms gilt das für Schwefeldioxid gesagte.

#### STICKSTOFFDIOXID NACH DEM MODIFIZIERTEN SALTZMAN-VERFAHREN

Eingesetzt wird eine Dämmgen et al. (1988) entsprechende Anlage. Dabei wird das Sammel-Verfahren nach Jacobs und

Tabelle 4.: Korngrößenverteilung

Lage im Profil	SAND			SCHLUFF			TON < 2 µm	Bodenart
	2000 - 630 µm	630 - 200 µm	200 - 63 µm	63 - 20 µm	20 - 6,3 µm	6,3 - 2 µm		
1	14,26 ‰	44,32 ‰	14,41 ‰	14,64 ‰	5,51 ‰	1,42 ‰	5,44 ‰	t'S
		72,99 ‰			21,57 ‰		5,44 ‰	
2	6,68 ‰	39,15 ‰	27,39 ‰	17,48 ‰	4,37 ‰	1,28 ‰	3,65 ‰	uS
		73,22 ‰			23,13 ‰		3,65 ‰	
3	5,82 ‰	48,11 ‰	35,70 ‰	8,02 ‰	0,84 ‰	1,35 ‰	2,16 ‰	uS
		87,63 ‰			10,21 ‰		2,16 ‰	
4a	7,97 ‰	41,75 ‰	25,67 ‰	13,74 ‰	5,45 ‰	1,46 ‰	3,96 ‰	uS
		75,39 ‰			20,65 ‰		3,96 ‰	
4b	11,95 ‰	39,75 ‰	24,25 ‰	6,05 ‰	3,38 ‰	1,43 ‰	13,19 ‰	t'S
		75,95 ‰			10,86 ‰		13,19 ‰	
5a	2,06 ‰	79,27 ‰	12,50 ‰	1,58 ‰	1,09 ‰	0,84 ‰	2,66 ‰	S
		93,83 ‰			3,51 ‰		2,66 ‰	
5b	1,51 ‰	70,23 ‰	13,90 ‰	2,77 ‰	0,95 ‰	1,10 ‰	9,54 ‰	t'S
		85,64 ‰			4,82 ‰		9,54 ‰	
6	38,78 ‰	41,45 ‰	6,55 ‰	4,94 ‰	1,72 ‰	0,66 ‰	5,90 ‰	t'S
		86,78 ‰			7,32 ‰		5,90 ‰	
7a	3,53 ‰	72,97 ‰	18,05 ‰	1,89 ‰	0,04 ‰	1,28 ‰	2,24 ‰	S
		94,55 ‰			3,21 ‰		2,24 ‰	
7b	3,12 ‰	75,40 ‰	9,26 ‰	1,82 ‰	0,98 ‰	1,20 ‰	8,22 ‰	t'S
		87,78 ‰			4,00 ‰		8,22 ‰	

Hochheiser (1958) in der von Huygens und Steeman (1971) optimierten Variante angewendet.

schriebene Verfahren mit halbkonz. HNO<sub>3</sub> versetzt und die Inhaltsstoffe in der Wärme gelöst.

#### OZON NACH DEM UV-PHOTOMETRISCHEN VERFAHREN

Wir verwenden ein Ozon-Meßgerät Modell ML 8810 der Fa. Monitor Technologies GmbH, Allershausen.

#### BESTIMMUNG DER STAUB-KORNGRÖSSEN-VERTEILUNG

Verwendet wird ein High-Volume-Kaskadenimpaktor Serie 230 der Fa. K. Schaefer Gesellschaft für Verfahrenstechnik, Langen.

#### SCHWEBSTAUB MIT HILFE DES FILTERVERFAHRENS

Als Sammler dienen Kleinfiltergeräte GS 050 entsprechend VDI-RdL (1982), die im Laufe von 24 h etwa 50 m<sup>3</sup> Luft (Meßgenauigkeit ±0,005 m<sup>3</sup>) durch ein Glasfaser-Filter (Schleicher und Schuell GF 010) saugen. Die Geräte werden entweder mit täglicher Probenahme oder mit Probenahme an jedem zweiten Tag betrieben. Zur Aussagekraft derartiger quasikontinuierlicher Messungen vgl. Umweltbundesamt (1981 b). Der Gesamtstaub wird durch Wägung der exponierten Filter auf 0,01 mg genau bestimmt. Die zum Einsatz gelangenden Filter werden vor der Exposition mit bidest. H<sub>2</sub>O gewaschen; sie werden vor den Wägungen im Exsikkator über Silicagel äquilibriert. Zur Bestimmung von Schwebstaub-Inhaltsstoffen werden die Filter in Anlehnung an das bei Seifert und Drews (1978) be-

#### DENUUDER-SYSTEME

Zur simultanen Bestimmung der Konzentrationen von SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> und Schwebstaub mit hoher zeitlicher Auflösung zur Ermittlung von Depositionsgeschwindigkeiten werden ab 1988 zusätzlich Kananaskis Atmospheric Pollutant Sampler (KAPS) (Peake und Legge, 1987) in Betrieb genommen.

#### 5.3.1.2 Bestimmung von Depositionen

#### BESTIMMUNG VON DEPOSITIONEN AUS DER GASPHERE

Zur Erfassung der Depositionen von Schwefeldioxid, Stickoxiden, Ammoniak und Hydrogenchlorid aus der Gasphase wird das Immissionsratenmeßgerät SAM (surface active monitor) nach Umweltbundesamt (1984, 1986) bzw. Fukui (1966)

Tabelle 5: Bodenchemische Charakterisierung

	cm unter Geländeoberfläche						
	0 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 50	50 - 75	75 - 100
pH (CaCl <sub>2</sub> )	5,58	5,40	5,75	6,05	6,11	6,22	6,20
Pufferkapazitätsindex (BCI)	22	13	22	31	32	28	22
N (in mg kg <sup>-1</sup> )	1965	1155	734	464	218	83	22
S (in mg kg <sup>-1</sup> )	348	216	149	20	12	<10	<10
C (in %)	2,54	1,69	1,09	0,68	0,39	0,16	0,07
Ca *) (in %)	0,35	0,28	0,24	0,22	0,18	0,12	0,10
K *) (in %)	0,14	0,14	0,13	0,12	0,09	0,08	0,08
lactatlösliches K (in mg kg <sup>-1</sup> )	318	285	241	202	136	93	73
P *) (in mg kg <sup>-1</sup> )	861	827	742	648	435	204	137
lactatlösliches P (in mg kg <sup>-1</sup> )	137	131	132	133	98	48	29
Mg *) (in mg kg <sup>-1</sup> )	437	376	361	330	283	291	222
Mg-Schachtschabel (in mg kg <sup>-1</sup> )	140	72	48	33	29	27	32
Fe *) (in %)	0,64	0,68	0,66	0,63	0,51	0,45	0,43
Mn *) (in mg kg <sup>-1</sup> )	378	376	348	310	229	85	41
Zn *) (in mg kg <sup>-1</sup> )	59	54	52	44	32	23	17
Cu *) (in mg kg <sup>-1</sup> )	18	20	22	21	15	9	7
Pb *) (in mg kg <sup>-1</sup> )	51	53	52	50	25	12	8
Cd *) (in mg kg <sup>-1</sup> )	0,4	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
CEC (in mmol Ionenäquivalente/100 g)	11,5	6,8	6,7	5,3	3,1		
Basensättigung (in %)	52	48	49	54	58		
*) HNO <sub>3</sub> -Druckaufschluß							

in modifizierter Form eingesetzt. Das SAM-Gerät besteht im wesentlichen aus Glasfaser-Filtern, die zur Erfassung der Depositionen von Schwefeldioxid und Hydrogenchlorid mit basischen (Kaliumcarbonat) Lösungen getränkt sind (vgl. Dämmgen et al., 1985).

#### BESTIMMUNG DER DEPOSITIONEN AUS SCHWEBSTÄUBEN

Zur Abscheidung von Schwebstäuben werden Sammelflächen mit definierter Rauigkeit erprobt.

#### BESTIMMUNG DER DEPOSITIONEN AUS SEDIMENTIERTEN NIEDERSCHLÄGEN

##### Bulk-Depositionen

Zur Messung von Stoffeinträgen aus nassen Niederschlägen und Sinkstäuben werden Flasche-Trichter-Sammler einer eigenen Bauart eingesetzt. Die Sammelflaschen enthalten geringe Menge an HCl bzw. NaOH derart, daß in der einen Flasche für die Dauer der Exposition ein ausgeprägt saures, in der anderen ein ausgeprägt basisches Milieu aufrecht erhalten werden kann. Dadurch wird gewährleistet, daß die Sammler für reaktive Gase bzw. deren Lösungen in Niederschlagswässern eindeutig definierte Senken darstellen. Zu weiteren Einzelheiten siehe Dämmgen et al. (1985) und Dämmgen et al. (1986).

##### Nasse und trockene Depositionen

Als Naß-Trocken-Sammler werden Trichter-Flasche- bzw. Topf-Sammler mit beweglicher Abdeckhaube eingesetzt, wie sie im Prinzip bei Georgii et al. (1980) beschrieben sind. Die Abdeckhaube wird von einem widerstandsgesteuerten Elektromotor mit Getriebe bewegt.

#### 5.3.2. Meteorologische Daten

##### TEMPERATUREN

Boden- und Lufttemperaturen werden mit Widerstandsfühlern Pt 100 gemessen.

##### STRAHLUNG

Zur Messung der Globalstrahlung wird der Strahlungsgeber nach Dirmhirn (Hersteller: Fa. Thiess, Göttingen) eingesetzt, zur Messung der photosynthetisch-aktiven Strahlung dienen Quantum-Sensoren LI-190 SB (Vertrieb: Fa. Walz, Effeltrich). Strahlungsbilanz-Daten werden von der Zentralen Agrarmeteorologischen Forschungsstelle des Deutschen Wetterdienstes (ZAMP), deren Meßeinrichtungen sich in unmittelbarer Nachbarschaft des Untersuchungsflächen befinden, übernommen.

Tabelle 6: Bewirtschaftung der Beobachtungsflächen

	Düngung <sup>1)</sup>				Anzahl der Schnitte
	Thomaskali kg K <sub>2</sub> O/ha-a	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha-z	Kalkammonsalpeter kg N/ha		
Parzelle 10	100	50	60 + 60 + 60 + 60	seit Herbst 1984	4
Parzelle 11	100	50	60 + 60 + 60 + 60	seit Herbst 1984	4
Parzelle B1	100	50	60 + 60 + 60 + 60	seit Herbst 1984	4
Parzelle 12	-	-	-	seit 1952	3
Parzelle 13	100	50	60 + 60 + 60	seit Herbst 1986	3
Parzelle 14	100	50	60 + 60 + 60	seit Herbst 1986	3
Parzelle 40 <sup>3)</sup>	-	-	-	seit 1983	4
Parzellen 41, 46, 48 <sup>2) 3)</sup>	100	50	-	seit Herbst 1986	4
Parzellen 42, 44, 49 <sup>2) 3)</sup>	100	50	30 + 30 + 30 + -	seit Herbst 1986	4
Parzellen 43, 45, 47 <sup>2) 3)</sup>	100	50	60 + 60 + 60 + 60	seit Herbst 1986	4
Parzellen CF1 - NF4 <sup>2) 3)</sup>	100	50	30 + 30 + 30 + -	seit Herbst 1986	4
Parzelle B2	100	50	60 + 60 + 60 + 60	seit Herbst 1986	4
Parzelle B3	100	50	30 + 30 + 30 + -	seit Herbst 1986	4
Parzelle B4	100	50	-	seit Herbst 1986	4

<sup>1)</sup> Die Düngung mit Thomaskali erfolgt jeweils Mitte November; die Düngung mit Kalkammonsalpeter erfolgt zu Vegetationsbeginn und im Anschluß der Ernten. Der Vegetationsbeginn ist dann erreicht, wenn alle ab dem 1. Januar positiven Tagesmitteltemperaturen zusammengezählt den Wert 200 ergeben; dabei zählen jedoch die Werte des Januar nur zu 50 % und die des Februar nur zu 75 %.

<sup>2)</sup> 1986 wurden die Flächen mit 120 kg N/ha gedüngt.

<sup>3)</sup> Die Flächen werden mit Deionat zusätzlich beregnet, wenn die Wasserspannung im Boden in 5 cm Tiefe unter Geländeoberfläche 0,2 bar übersteigt. Grundsätzlich erfolgt während der Vegetationsperioden in den Open-top-Kammern ein Ausgleich zum Freilandniederschlag.

#### NIEDERSCHLÄGE

Zur Messung der Niederschlagsmenge und -verteilung werden automatische Regenmesser nach Joss-Tognini (Hersteller: Fa. Lambrecht, Göttingen) verwendet.

#### LUFTFEUCHTE

Die Bestimmung der relativen Luftfeuchte erfolgt mit Hydrogebern (Haarhygrometer, Hersteller: Fa. Thiess, Göttingen).

#### BODENFEUCHTE

Zur Untersuchung des Wasserhaushaltes werden Tensiogeber mit Druckaufnehmer PDCR 840 (Vertrieb: Fa. Druck Messtechnik, Gießen) sowie Tensiogeber nach Czeratzki der Fa. Thiess, Göttingen, eingesetzt.

#### WINDRICHTUNG UND -GESCHWINDIGKEIT

Eingesetzt werden kombinierte Windgeber (Hersteller: Fa. Thiess, Göttingen).

#### 5.3.3 Wasserhaushalt und Boden

Zur Gewinnung von Bodenlösung werden Saugkerzen nach Baar und Westing (1984) eingesetzt.

#### 5.3.4 Datenerfassung

Alle on line anfallenden Daten werden mit Hilfe einer Datenerfassungsanlage nach dem in Abb. 18 angegebenen Fließschema aufgezeichnet und bearbeitet. Die Anlage genügt folgenden Ansprüchen:

- Sie gestattet die Erfassung von Einzelzyklen bzw. von Halbstunden-Mittelwerten gemäß den bundeseinheitlichen Richtlinien (Bundesminister des Innern, 1983).

- Variabilität, Austauschbarkeit und Erweiterungsmöglichkeiten für zusätzliche Meßwertgeber sind in großem Umfang gegeben.

- Die Erfassungsanlage ist mit den bereits vorhandenen Rechnersystemen kompatibel.

Eingesetzt werden Commodore-Tischcomputer Modell 8032 mit Input-Output-Controllern, die in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, zur Datenerfassung entwickelt wurden. Der I/O-Controller besteht aus einem Grundgerät mit Hilfsspannungsversorgung für die Meßfühler, einem Multiplexer, einem Timer/Zähler als Zeitgeber und Impulsmesser sowie einer Anschaltung zum Rechner, der hierzu mit einer Treiberplatine bestückt ist. Der I/O-Controller ist so ausgelegt, daß die jeweils möglichen Maximalsignale in 4096 Digits zerlegt werden. Die angeschlossenen Meßstellen werden alle 10 Sekunden abgefragt und die Meßwerte im Kernspeicher des Computers zur Errechnung der Mittelwerte für Einzelzyklen (z.B. Halbstundenmittel) addiert. Die Mittelwerte werden mit Tag- und Uhrzeitzuweisung

Tabelle 7: Qualitative und quantitative Artenzusammensetzung auf unterschiedlich gedüngten Untersuchungsflächen im Verlauf der Vegetationsperiode 1986

NPK-gedüngte Flächen <sup>1)</sup>					seit 1985 ungedüngte Flächen		
Aufnahmetermine	22.05.	15.07.	25.08.	10.10.	11.08.	05.09.	
Größe der Aufnahmeflächen (in m <sup>2</sup> )	2	2	2	1,5	16	16	
Anzahl der Flächen/Aufnahmen	12	12	12	17	1	1	
Ertrag der oberirdischen Biomasse (in g/m <sup>2</sup> )	418,3 ± 48,4	285,8 ± 36,0	307,3 ± 19,6	89,3 ± 23,1	151,0 ± 38,0	162,9 ± 10,3	
mittlerer Ertragsanteil (in %)							
- Gräser	79,0	73,4	59,9	64,0	89,3	61,6	
- Kräuter	14,8	16,4	31,8	28,3	6,4	30,8	
- Leguminosen	6,2	10,2	10,2	13,7	2,2	6,9	
- Moos					+	+	
Gesamtartenzahl	17	21	20	16	21	19	
mittlere Artenzahl/Aufnahme	11,3 ± 1,0	11,9 ± 1,2	10,7 ± 1,4	8,7 ± 1,1			
Zeigerwert <sup>2)</sup>							
N R Fu							
7 x 8	Trifolium repens <sup>3)</sup>	v 19,7	v 23,8	v 18,6	v 27,4	I 2,6	I 5
7 x 5	Taraxacum officinale	v 21,0	v 18,8	v 31,7	v 32,9	I +	I +
6 x 8	Poa pratensis	v 16,9	v 13,1	v 7,8	v 7,0	I +	I +
5 x 5	Achillea millefolium	v 2,9	v 10,3	v 10,5	IV 1,5	I 10	I 20
5 x 3	Cerastium holostoides	IV +	II +	I +	.	I 1,5	I +
x x 5	Festuca rubra	s +	I +	s +	.	I 15	I 15
7 x 8	Lolium perenne	v 21,3	v 27,5	v 22,5	v 20,4	.	.
6 x 7	Dactylis glomerata	v 9,9	v 9,2	v 8,0	v 5,2	.	.
8 x 6	Elymus (=Agropyron) repens	v 3,8	v 10,6	v 8,0	v 2,4	.	.
7 x 7	Poa trivialis	v 9,4	v 3,6	v 2,4	v 7,9	I (+)	.
3 x 3	Bromus hordeaceus	v 13,3	v 8,8	IV +	.	.	.
8 x 5	Poa annua	v 2,2	IV 2,1	II +	I +	.	.
6 x 2	Plantago major	I +	IV 1,8	III +	II +	.	.
8 7 2	Stellaria media	II +	I +	II +	II +	I (+)	.
4 5 1	Geranium molle	s +	I +	II +	I +	.	.
5 8 5	Bromus inermis	I +	II +	s +	I +	.	.
x 6 1	Veronica arvensis	II +	s +	.	.	.	.
7 x 1	Sisymbrium officinale	.	s +	s (+)	.	.	.
9 x 1	Rumex obtusifolius	.	.	s +	s +	.	.
5 x 7	Agrostis stolonifera	.	s +	.	I +	.	.
x x 1	Polygonum aviculare	.	.	s +	.	.	.
5 x 1	Capsella bursa-pastoris	.	.	.	s (+)	.	.
3 3 5	Agrostis vulgaris	.	I +	.	.	I 25	I 25
x x 2	Ranunculus repens	.	s +	s (+)	.	I 10	I 15
x 5 3	Anthoxanthum odoratum	.	.	.	.	I 55	I 15
x 4 2	Prunella vulgaris	.	.	.	.	I 10	I 20
	Rhithidadelphus squarrosus	.	.	.	.	I 5	I 5
4 x 4	Holcus lanatus	.	.	.	.	I +	I +
5 3 1	Carex pilulifera	.	.	.	.	I +	I +
5 x 5	Leontodon autumnalis	.	.	.	.	I +	I +
4 2 1	Veronica officinalis	.	.	.	.	I +	I +
3 3 1	Hypericum humifusum	.	.	.	.	I (+)	I (+)
	Lupinus polyphyllus	.	.	.	.	I (+)	I (+)
2 3 2	Luzula campestris	.	.	.	.	I +	.
3 5 2	Luzula multiflora	.	.	.	.	I +	.
6 x 0	Calamagrostis epigeios	.	.	.	.	.	I (+)
3 5 4	Crepis capillaris	.	.	.	.	.	I (+)

<sup>1)</sup> 8 der ursprünglich 12 Aufnahmeflächen liegen im Zentrum der späteren Untersuchungsparzellen CF1 - NF4. Die 17 Aufnahmeflächen im Oktober 1986 repräsentieren die Untersuchungsparzellen 41 - 49 und CF1 - NF4; vgl. Tab. 6, Abb. 12.

<sup>2)</sup> Zeigerwerte der Pflanzenarten für die Stickstoffversorgung während der Vegetationszeit (N1 - N3 = schlecht - übermäßig) und die Bodenreaktion (R1 - R3 = sauer - basisch) nach Eilenberg (1979) sowie die Futterwertzahl (Fu0 - Fu8 = schlechte - sehr gute Futterpflanzen) nach Klapp (1965).

<sup>3)</sup> Nomenklatur nach Oberdorfer (1983).

<sup>4)</sup> Stetigkeit und mittlerer prozentualer Deckungsgrad. Stetigkeitsklasse s bzw. I, II, ..., V = in weniger als 10 % bzw. in 10 - 20 %, 21 - 40 %, ..., 81 - 100 % der Aufnahmeflächen vorhanden; mittlerer Deckungsgrad + bedeutet  $\leq 1$  % Deckung, (+) bedeutet nur ein Individuum vorhanden.

Tabelle 8: Lage und Ausstattung der Meßstellen des Depositionsmeßnetzes

Standort	Gitterkoordinaten UTM-Netz Zone 32U	Höhe üNN in m	Ausstat- tung Typ	in Betrieb von - bis
Nienwohlde I	6.045/58.582	63	B, S, N	7/85-
Nienwohlde II	6.055/58.566	103	S, N	10/87-
Hahnenhorn	5.942/58.236	48	B, S, N	10/84- 4/86
Flettmar	5.901/58.216	48	B, S	10/84- 4/86
Wilsche	6.002/58.189	53	B, S	10/84- 4/86
Ettenbüttel	5.955/58.187	48	B, S, N	4/84-10/86
Meinersen	5.920/58.161	59	B, S	4/84- 4/86
Leiferde	5.983/58.116	59	B, S, N	4/84- 4/86
Rietze	5.900/58.086	58	B, S	10/84- 4/86
Hillerse	5.955/58.090	60	B, S	4/84- 4/86
Didderse	5.956/58.048	59	B, S	4/84- 4/86
Rethen	6.008/58.038	82	B, S, N	4/84- 4/86
Rüper	5.917/58.019	69	B, S	4/84-10/86
Groß Schwülper	5.977/58.023	66	B, S	4/84- 4/86
Wenden	6.030/57.996	69	B, S	4/84- 4/86
Woltorf	5.903/57.960	73	B, S	10/84- 4/86
Wahle	5.943/57.926	77	B, S	10/84- 4/86
FAL	5.978/57.957	70	siehe Kap. 5	4/84-
Riddagshausen	6.078/57.931	78	B, S, N	4/84- 5/88
Hordorf	6.133/57.958	94	B, S	4/84- 4/86
Beienrode	6.179/58.023	85	B, S	10/84- 4/86
Neindorf	6.253/58.013	110	B, S	10/84- 4/86
Rotenkamp	6.208/57.966	95	siehe Kap. 6	3/83-
Bornum	6.200/57.922	130	B, S, N	4/84- 5/88
Beienrode (Dorm)	6.245/57.960	92	B, S, N	3/83- 4/86
Sunstedt	6.252/57.900	137	B, S, N	4/84- 5/88
Barmke	6.324/57.949	114	B, S, N	4/84- 5/88
Emmerstedt	6.325/57.900	126	B, S, N	4/84- 5/88
Frellstedt	6.317/57.859	114	B, S, N	4/84- 5/88
Warberg/St. Ludgeri	6.342/57.830	130	B, S, N	3/83- 5/88
Brunleberfeld	6.259/57.830	198	B, S, N	3/83- 4/86
Groß Rode	6.218/57.842	290	B, S, N	3/83- 4/86
Eitzum	6.223/57.813	175	B, S	4/84- 4/86
Eilum	6.179/57.812	125	B, S	4/84- 4/86
Erkerode	6.172/57.853	180	B, S, N	3/85-10/85
Salzdahlum	6.078/57.849	95	B, S, N	10/84- 5/88
Obersicke	6.113/57.870	103	B, S, N	4/84- 5/88
Destedt	6.175/57.894	195	B, S, N	4/84- 5/88
Groß Denkte	6.114/57.785	160	B, S, N	3/85-10/85
Neindorf (Ösel)	6.090/57.768	133	B, S, N	3/85- 5/86
Flöthe	6.032/57.722	155	B, S, N	3/85- 4/87
Othfresen	5.968/57.624	205	B, S, N	3/85- 4/87
Neuenkirchen	6.018/57.629	135	B, S, N	10/85-
Klein Döhren	6.010/57.620	151	S, N	6/86-

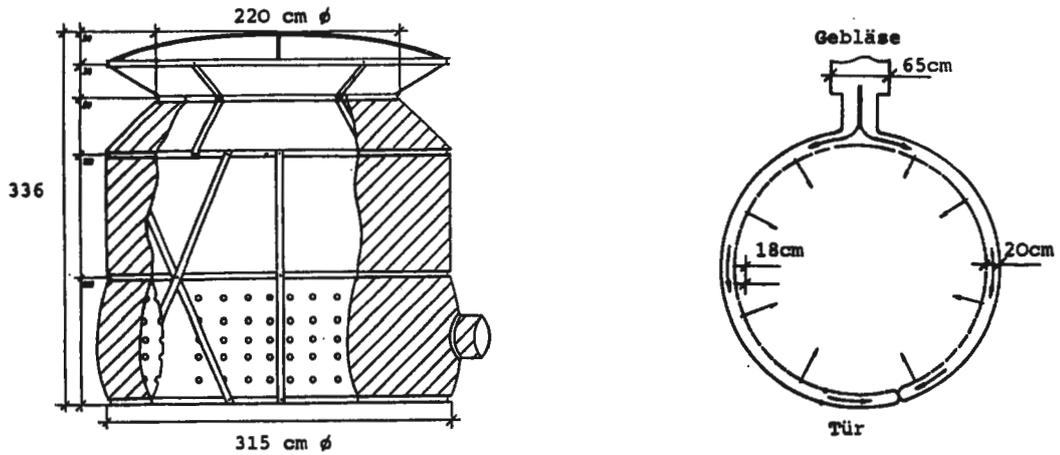
B: Biomonitoring mit Hilfe der Standard-Graskultur (vgl. DÄMMGEN et al. 1985); S: Messung der Deposition aus der Gasphase mit Hilfe des SAM-Verfahrens; N: Messung der Deposition aus sedimentierenden Niederschlägen.

auf einem Datenträger abgespeichert. Durch entsprechende Schutzmaßnahmen wird verhindert, daß der Rechner durch Netzausfälle abstürzt und daß die Einstreuung von Funksignalen und Überspannungen bei Gewitter die Datenerfassung beeinträchtigt. Die Datenträger werden wöchentlich ausgetauscht und im Labor aufgearbeitet, so daß die für das Untersuchungsprogramm erforderlichen Dateien erstellt werden können.

#### 6. Referenzmeßstellen und Depositionsmeßnetz

Zur Kontrolle der Plausibilität und der Repräsentativität der am Standort FAL erhaltenen Meßwerte des chemischen Klimas werden in einem Depositionsmeßnetz in Südostniedersachsen Vergleichsdaten erhoben. Die Lage der einzelnen Meßstellen geht aus Abb. 19 hervor, weitere Einzelheiten bezüglich Ausstattung und Betriebsdauer sind Tab. 8 zu entnehmen. An

### OPEN-TOP-KAMMER

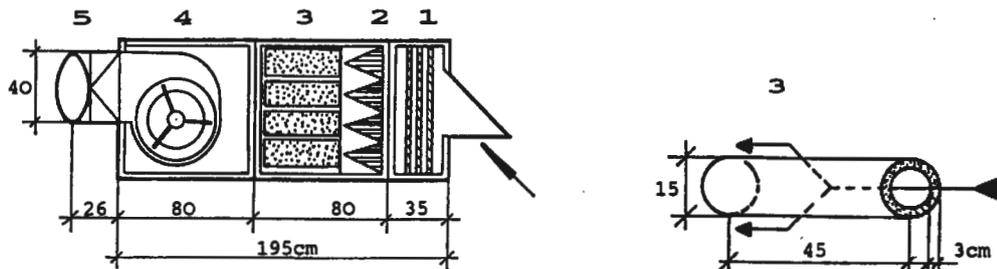


Grundfläche	:	7,8 m <sup>2</sup>
Volumen	:	21,4 m <sup>3</sup>
Durchmesser des Gebläsestutzens:	:	40 cm
Folienschlauchperforation	:	2,5 cm Durchmesser; 5 Reihen
Gestell	:	Aluminium
Folie	:	Low Density Polyethylene LDPE; UV-stabilisiert; 0,2 mm dick

---

Luftdurchsatz	:	ca. 2200 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel/min	:	ca. 1,7

### GEBLÄSE UND FILTERSYSTEM



1. Vorfilter
2. Staubfilter EU 4
3. Aktivkohle-Patronen (4 x 4 CAMCARB 2600<sup>(R)</sup>) imprägniert mit 10 % K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)
4. Gebläse: FISCHBACH (5-Stufen Regulator; 180-380 V;  
2600 m<sup>3</sup>/h bei 550 Pa Gegendruck)
5. Gebläsestutzen

Abbildung 14: Schematisierte Darstellung einer Open-top-Kammer

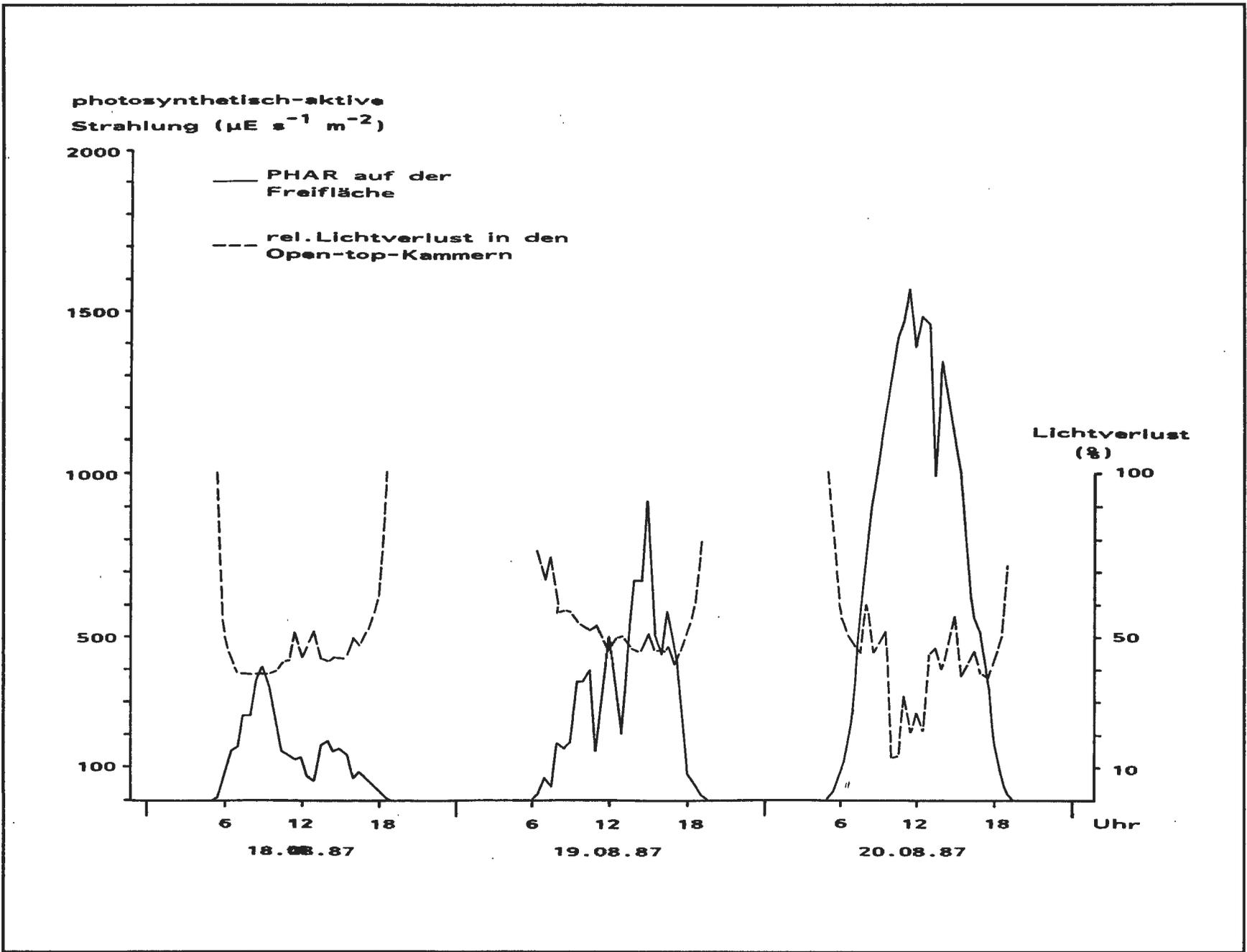


Abbildung 15a: Gänge der photosynthetisch-aktiven Strahlung in Open-top-Kammern bzw. im Freiland für drei Tage mit unterschiedlicher Strahlungsintensität

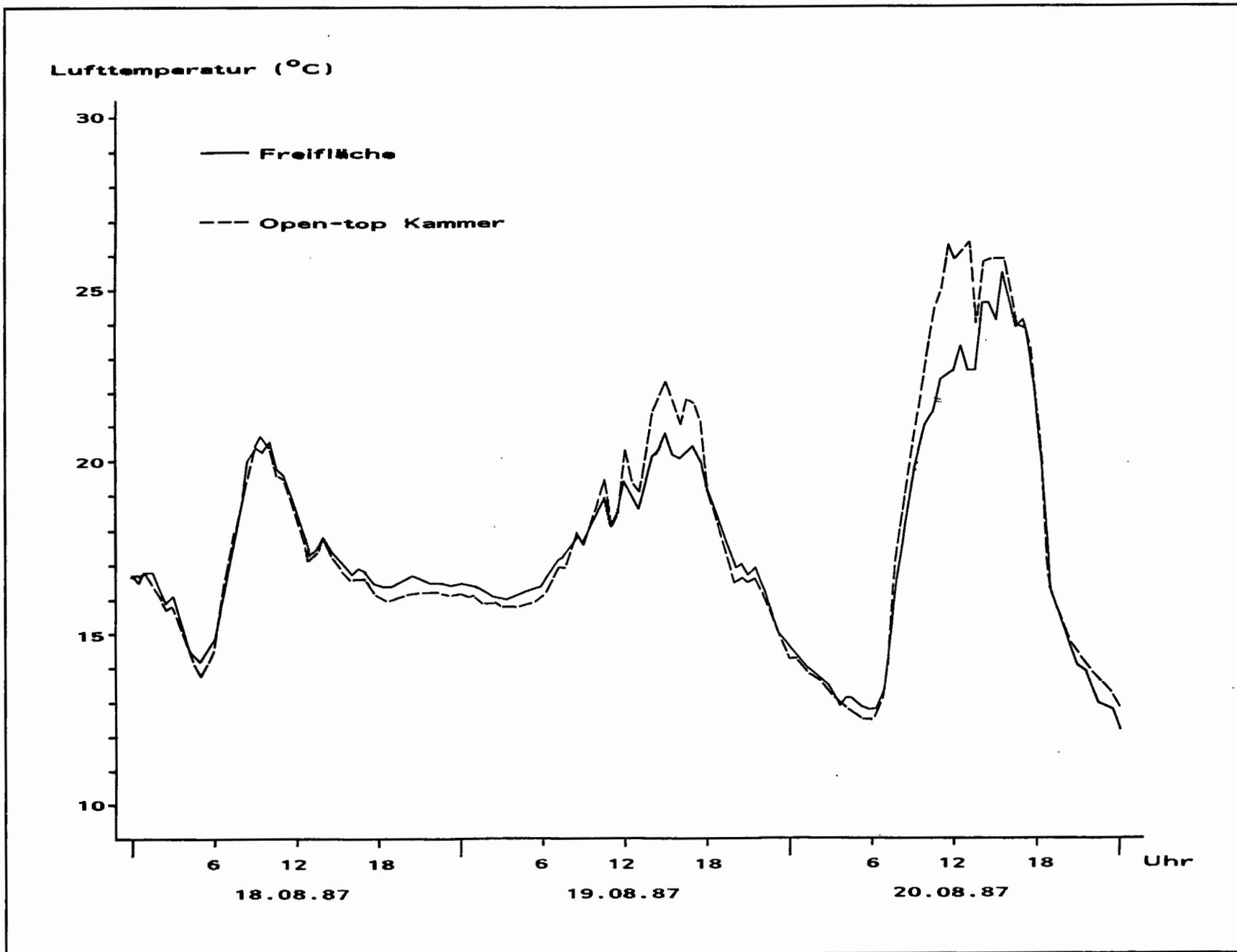


Abbildung 15b: Gänge der Lufttemperaturen in Open-top-Kammern bzw. im Freiland für drei Tage mit unterschiedlicher Strahlungsintensität

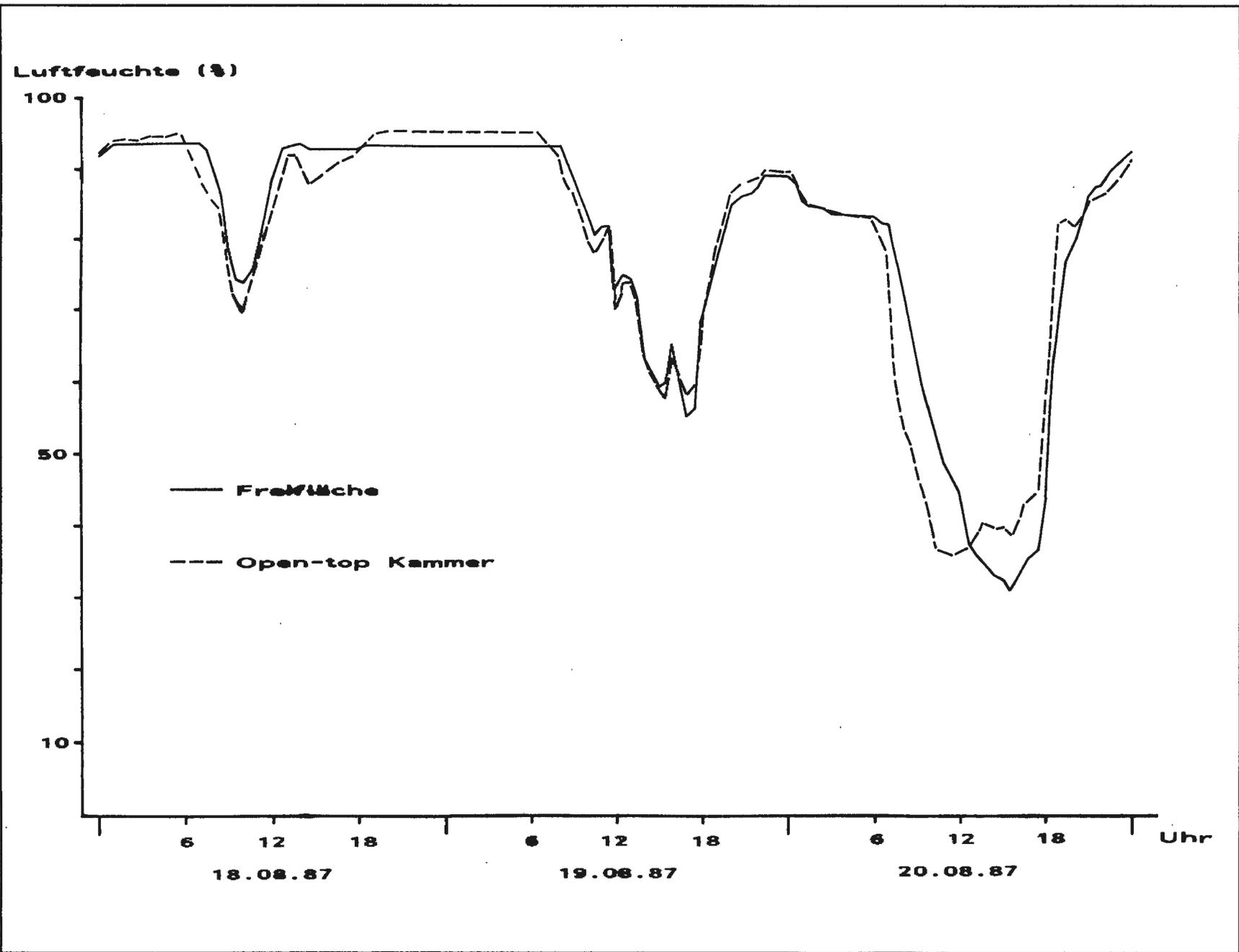


Abbildung 15c: Gänge der relativen Luftfeuchten in Open-top-Kammern bzw. im Freiland für drei Tage mit unterschiedlicher Strahlungsintensität

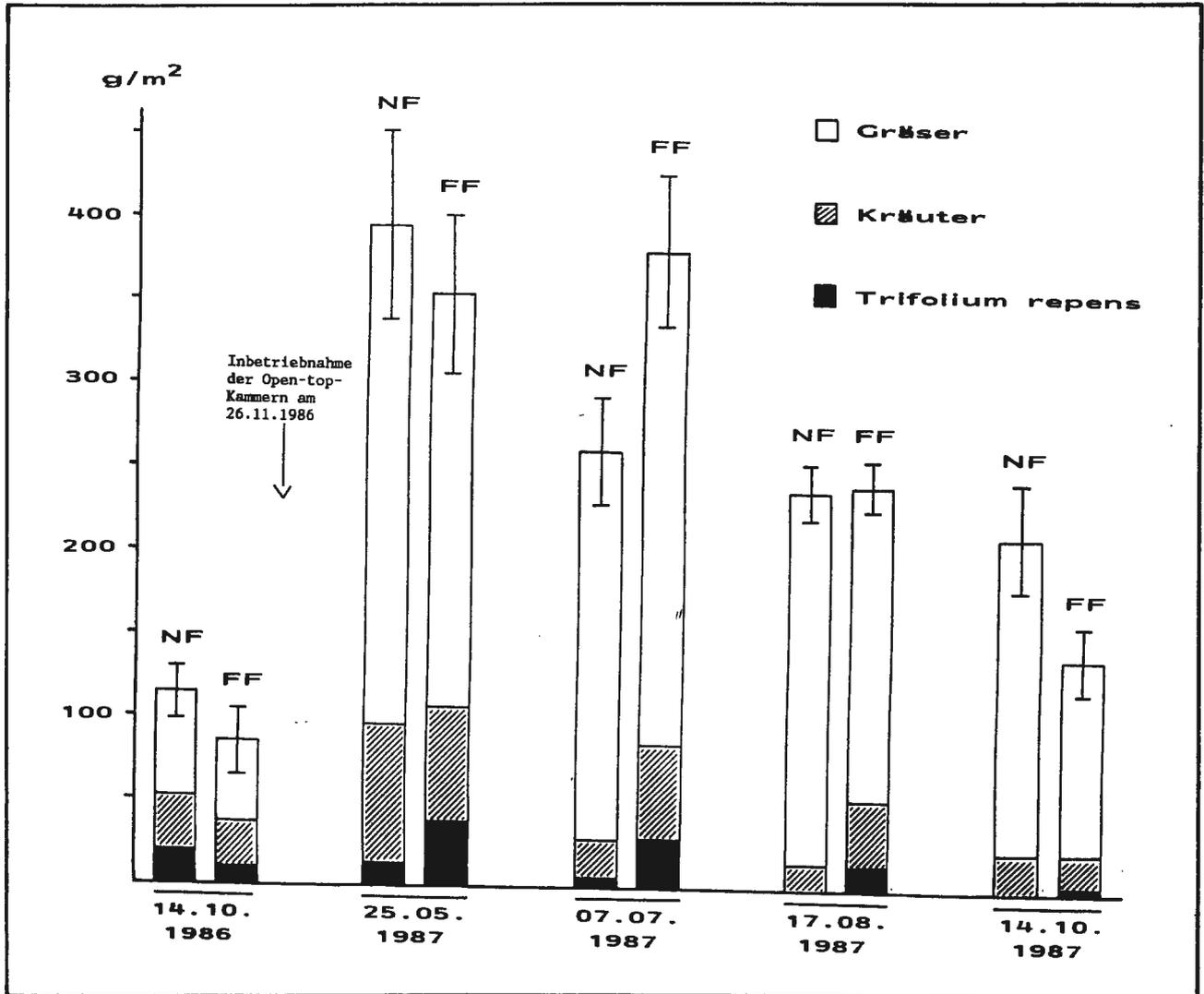


Abbildung 16: Produktion oberirdischer Biomasse und Ertragsanteile der Hauptgruppen Gräser, Kräuter und Leguminosen (in g TS/m<sup>2</sup>) in mit ungefilterter (NF) Umgebungsluft versorgten Open-top-Kammern sowie unter Freilandbedingungen (FF; Probeflächen 42, 44, 49).

der Meßstelle Rotenkamp werden zusätzlich zu den Depositionen die Konzentrationen von SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> und Schwebstaub in der Umgebungsluft sowie das physikalische Klima erfaßt. Entsprechende Meßeinrichtungen zur Erfassung des chemischen Klimas werden 1988 an der Meßstelle des SFB 179 in Neuenkirchen aufgebaut. Die Analysen erfolgen naßchemisch. Zur Erfassung der on line Daten wird das Ökologger-System nach Max und Rohdenburg (1985) eingesetzt.

## 7. Zusammenfassung

Es wird ein Meßkonzept vorgestellt, das in der Lage ist, wesentliche Stoff- und Energieflüsse, deren Vernetzung und mögliche Kausalzusammenhänge zwischen Immissionsbelastung und dynamischer Entwicklung im Grünlandökosystem zu erfassen. Die Beziehungen und Umsätze im Ökosystem „Dauergrünland“ werden beispielhaft dargestellt. Aus ihnen wird ein reduktionistisches Erfassungsmodell abgeleitet, dessen Meßgrößen und -methoden im einzelnen vorgestellt werden.

## Effects of air pollutants on vegetation and soils of grassland ecosystems

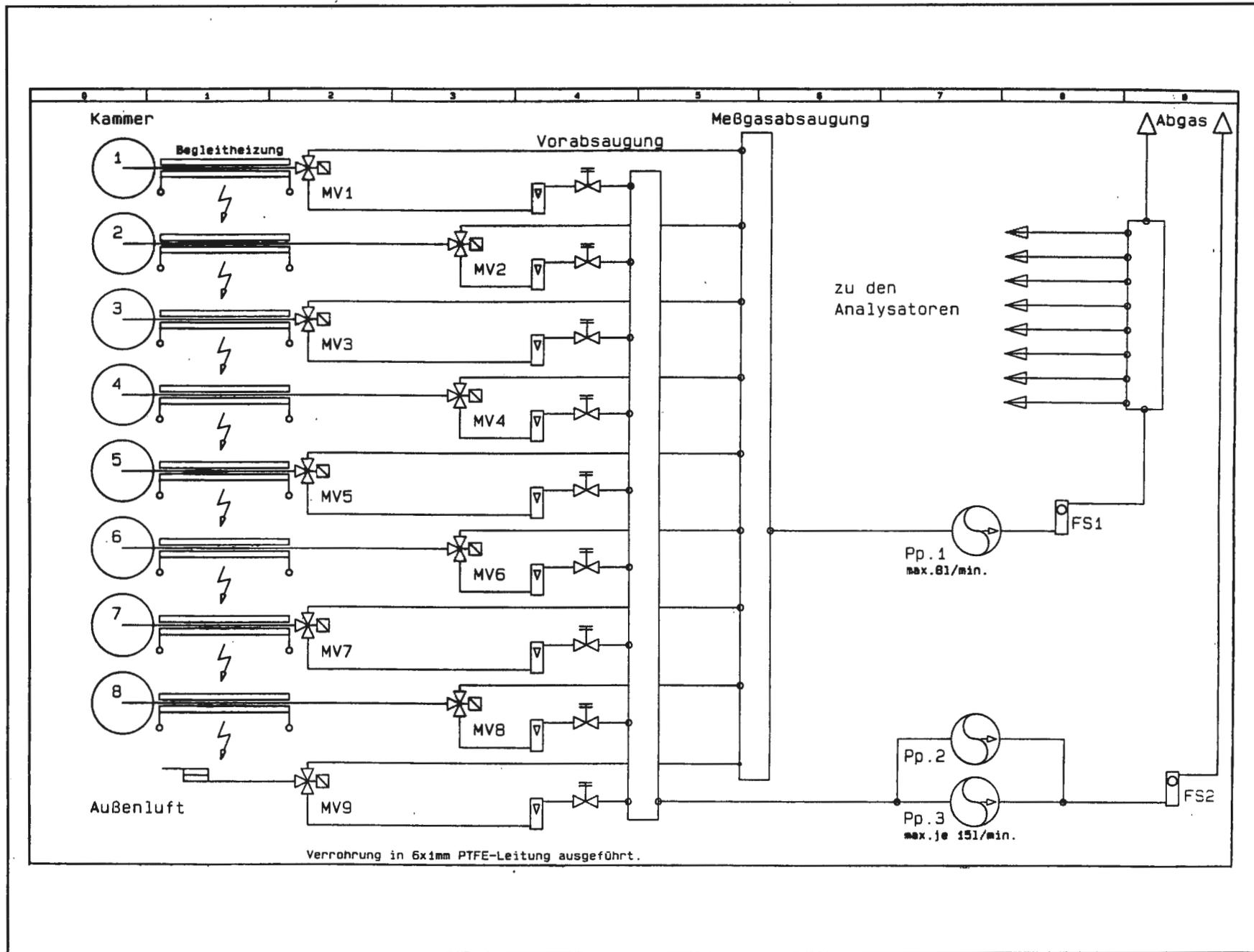
### I. Interrelations, Methods and Procedures of Investigation

A reductionistic model for the investigation of the potential effects of air pollutants on permanent grassland is presented covering fluxes of matter and energy. The interrelations of important factors in a grassland ecosystem are shown. The methods used and the parameters measured are described and discussed in detail.

### Danksagung

Herrn Prof. Dr. Zimmer und Herrn Dr. Wermke vom Institut für Grünland- und Futterpflanzenforschung (FAL) sowie Herrn Prof. Dr. Altemüller und Herrn Prof. Dr. Söchtig vom Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde (FAL) wird für die technische Unterstützung und wertvollen Ratschläge gedankt. Die Untersuchungen werden mit finanzieller Förderung des Bundesministers für Forschung und Technologie durchgeführt.

Abbildung 17: Probegas-Absaug-System  
LANDBAUFORSCHUNG VÖLKENRODE



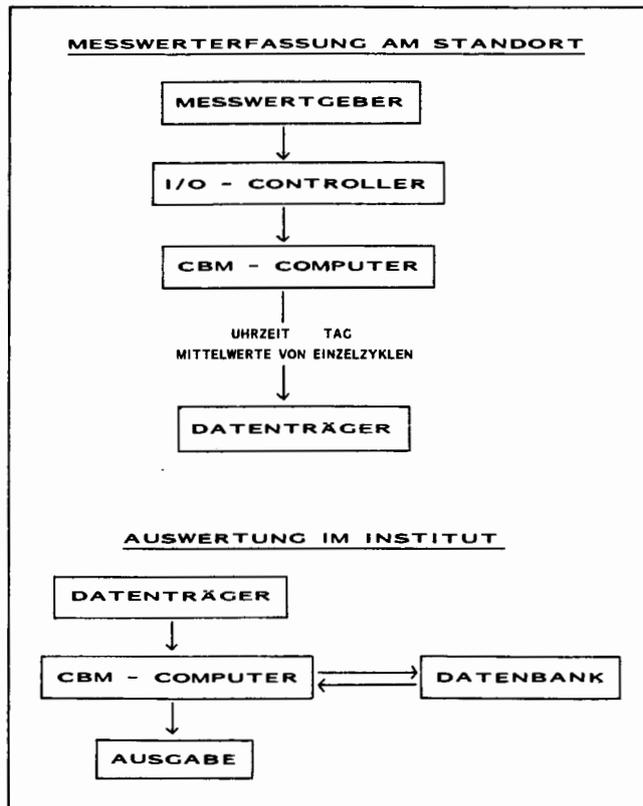


Abbildung 18: Fließschema der Datenerfassungsanlagen

#### Literatur

Adam, K., Dämmgen, U., Kürer, R. und Rauschelbach, B.: Umweltatlas 2: Luft/Lärm/Landschaftsverbrauch. - Geogr. Rundschau 39, Beilage (1987).

Baar, W. und Westing, A.: Eine neue Konstruktion von Saugsonden zur Bodenwasserentnahme. - Landschaftsökol. Messen Auswerten 1 (1984), S. 57 - 60.

Beese, F.: Parameter des Stickstoffumsatzes in Ökosystemen mit Böden unterschiedlicher Acidität. - Gött. Bodenk. Ber. 90 (1986).

Bergh, J.P. van den: Interactions between plants and population dynamics. Verh. Ges. Ökologie 9 (1981), S. 155 - 163.

Bossel, H.: Umweltdynamik. - te-wi, München (1985).

Bundesminister des Innern: Bundeseinheitliche Praxis bei der Überwachung der Emissionen und Immissionen. - Gem. Min. Bl. (1983), S. 76 - 81.

Dämmgen, U.: Luftbelastung durch Schwefeldioxid im Raum Königslutter. - Braunsch. Naturk. Schr. 2 (1985), S. 373 - 382.

Dämmgen, U., Grünhage, L. und Jäger, H.-J.: System zur flächendeckenden Erfassung von luftgetragenen Schadstoffen und ihren Wirkungen auf Pflanzen. - Landschaftsökol. Messen Auswerten 1 (1985), S. 95 - 106.

Dämmgen, U.: Schwebstaub-Konzentrationen im Raum Königslutter östlich von Braunschweig. - Braunsch. Naturk. Schr. 2 (1986), S. 595 - 606.

Dämmgen, U., Fleckenstein, J. und Jäger, H.-J.: Erfassung der Depositionen von Blei, Cadmium und Schwefel in Agrarökosystemen. Ein Methodenvergleich. - Landschaftsökol. Messen Auswerten 2 (1986), S. 1 - 10.

Dämmgen, U. und Jäger, H.-J.: Umweltrelevante Messtechnik - Zur Problematik von Immissions- und Depositionsmessungen. - VDI-MEG-Kolloquium Landtechnik 4 (1987), S. 19 - 26.

Dämmgen, U., Grünhage, L. und Jäger, H.-J.: Schwefel-Depositionen in Südostniedersachsen. - Geogr. Rundsch. 39 (1987 a), S. 328 - 330.

Dämmgen, U., Grünhage, L. und Jäger, H.-J.: Analysen der Smog-Episoden im Januar 1985 und im Januar und Februar 1987 in Südostniedersachsen. - Braunsch. Naturk. Schr. 2 (1987 b), S. 759 - 772.

Dämmgen, U., Küsters, A. und Bauer, S.: Aufbau und Wirkungsweise eines einfachen Sammlers zur Analyse von Schadgasen in der Umgebungsluft. - Landschaftsökol. Messen Auswerten (1988), in Vorbereitung.

Deutsche Forschungsgemeinschaft: Ökosystemforschung als Beitrag zur Beurteilung der Umweltwirksamkeit von Chemikalien. - Verlag Chemie, Weinheim/Bergstr., 1983.

Elberse, W.T., van den Bergh, J.P. und Dirven, J.G.P.: Effects of use and mineral supply on the botanical composition and yield of old grassland on heavy-clay soil. - Neth. J. Agric. Sci. 31 (1983), S. 63 - 88.

Ellenberg, H.: Zeigerwerte der Gefäßpflanzen Mitteleuropas. - Scripta Geobot., Bd. 9. Göttingen 1979.

Ellenberg, H.: Konkurrenzgleichgewicht wichtiger Arten. - In: Deutsche Forschungsgemeinschaft (Hrsg.): Ökosystemforschung als Beitrag zur Beurteilung der Umweltwirksamkeit von Chemikalien. - Verlag Chemie, Weinheim/Bergstr. 1983, S. 35 - 38.

Ellenberg, H., Mayer, R. und Schauerer, J.: Ökosystemforschung - Ergebnisse des Sollingprojektes 1966 - 1986. - Ulmer, Stuttgart 1986.

Fukui, K.: The alkaline filter paper method for measuring sulphur oxides, nitrogen dioxide and chloride in the atmosphere. - Proc. Intern. Clean Air Congr. London, 4.-7.10. (1966), S. 213 - 234.

Georgii, H.-W., Gravenhorst, G., Perseke, C. und Rohbock, E.: Untersuchung über die trockene und feuchte Deposition von Luftverunreinigungen in der Bundesrepublik Deutschland. - Ber. erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin. Inst. f. Meteorologie u. Geophysik der Universität Frankfurt/Main (1980).

Grennfelt, P., Saltbones, J. und Schjoldager, J.: Oxidant data collection in OECD-Europe 1985-87 (OXIDATE). Report on ozone, nitrogen dioxide and peroxyacetyl nitrate, April - September 1985. - Norsk Inst. for Luftforskning, NILU OR: 22/87, Lillestrom 1987.

Grünhage, L., Dämmgen, U., Hertstein, U. und Jäger, H.-J.: Belastung von Grünland-Ökosystemen mit sauerstoffhaltigen Schwefelverbindungen. - Verh. Ges. Ökologie, Gießen 1986 (1987), S. 131-135.

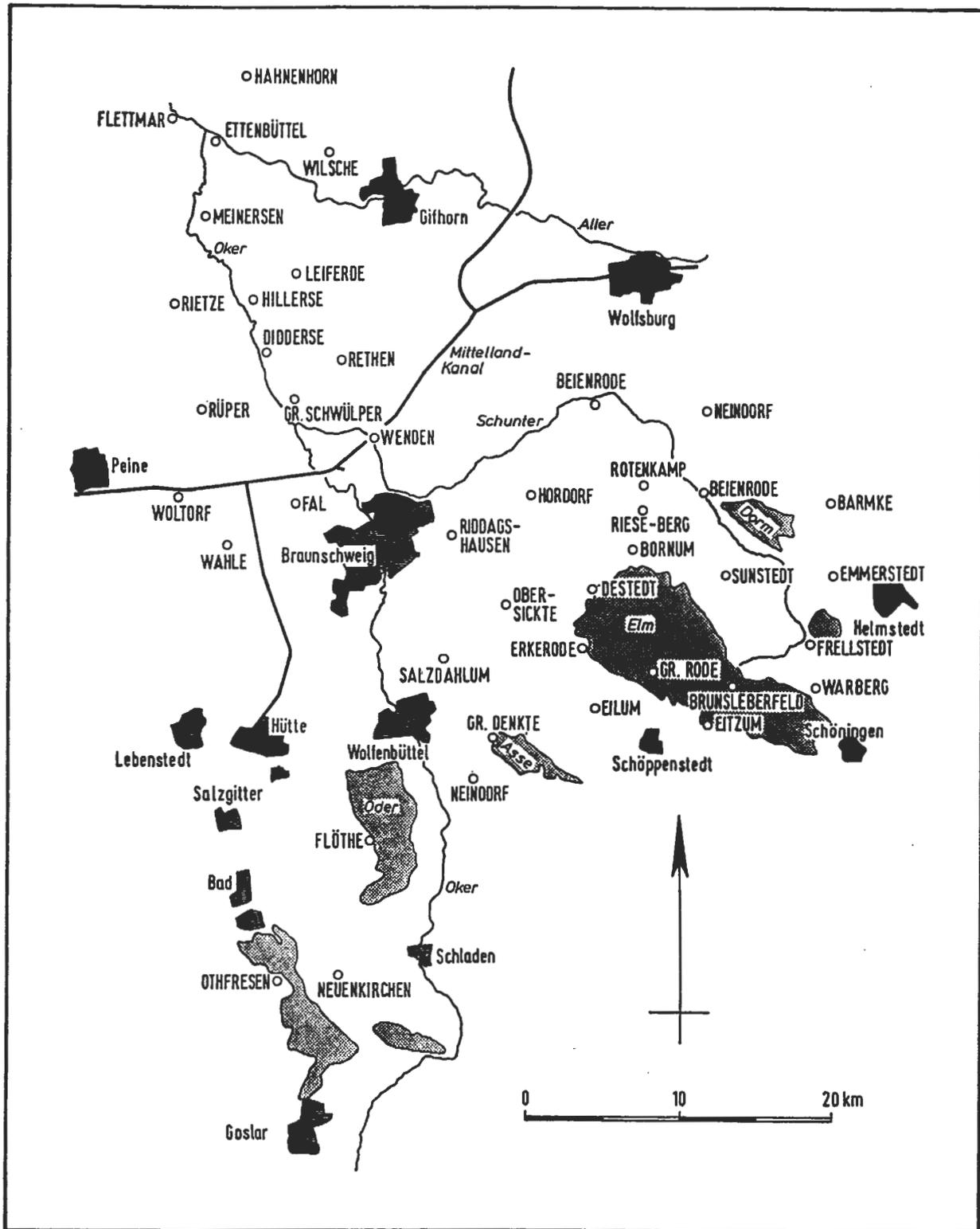


Abbildung 19: Übersichtskarte mit Namen und Lage der Meßstellen des Despositionmeßnetzes

Guderian, R., Tingey, D.T. und Rabe, R.: Wirkungen von Photooxidantien auf Pflanzen. - In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Luftqualitätskriterien für photochemische Oxidantien. Ber. 5/83, E. Schmidt, Berlin 1983, S. 205 - 427.

Heagle, A.S., Body, D.E. und Heck, W.W.: An open-top field chamber to assess the impact of air pollution on plants. - J. Environ. Qual. 2 (1973), S.365-368.

Harley, J.L. und Harley, E.L.: A check-list of mycorrhiza in the British flora. - New Phytol. (Suppl.) 105 (1987), S. 1 - 102.

Heasley, J.E., Lauenroth, W.K. und Yorks, T.P.: Simulation of SO<sub>2</sub> impacts. - In: Lauenroth, W.K. und Preston, E.M.

- (Hrsg.): The effects of SO<sub>2</sub> on a grassland. *Ecological Studies* 45. Springer, New York usw. 1984, S. 161-184.
- Heck, W.W., Heagle, A.S. und Shriner, D.S.: Effects on vegetation: nature, crops, forests. - In: Stern, A.S. (Hrsg.): *Air pollution*, Bd. 6, Acad. Press, New York 1986, S. 247 - 350.
- Heggstad, H.E. und Bennett, J.H.: Impact of atmospheric pollution on agriculture. - In: Threshow, M. (Hrsg.): *Air pollution and plant life*, Wiley, Chichester usw. 1984, S. 357 - 395.
- Heits, W. und Israel, G.W.: Physikalische und chemische Charakterisierung des innerstädtischen Schwebstaubes. - *Staub - Reinh. Luft* 42 (1982), S. 347 - 355.
- Hoffmeister, J.: Die Klimakreise Niedersachsens. - *Schr. Wirtschaftswiss. Ges. Studium Niedersachsens*, Heft B 16, Oldenburg 1937.
- Hoffmeister, J. und Schnelle, F.: *Klima-Atlas von Niedersachsen*. - *Schr. Wirtschaftswiss. Ges. Studium Niedersachsen*, Heft K 6, Oldenburg 1945.
- Hogsett, W.E., Tingey, D.T. und Holman, S.R.: A programmable exposure control system for determination of the effects of pollutant exposure regimes on plant growth. - *Atmosph. Environ.* 19 (1985), S. 1135 - 1145.
- Huygen, C. und Steerman, P.H.: The determination of nitrogen dioxide in air after absorption in a modified alkaline solution. - *Atmosph. Environ.* 3 (1971), S. 887 - 889.
- Jacobs, M.B. und Hochheiser, S.: Continuous sampling and ultramicrodetermination of nitrogen dioxide in air. - *Anal. Chem.* 30 (1958), S. 426 - 428.
- Jäger, H.-J. und Klein, H.: Biochemical and physiological effects of SO<sub>2</sub> on plants. - *Angew. Bot.* 54 (1980), S. 337 - 348
- Jäger, H.-J., Weigel, H.J., Guderian, R., Arndt, U. und Seufert, G.: Methodological approaches: Part I: Experiments with open-top chambers: Results, advantages and limitations. - In: Kommission der Europäischen Gemeinschaften (Hrsg.): *Proc. Symp. „Effects of Air Pollution on Terrestrial and Aquatic Ecosystems“*, Grenoble, 18.-22. Mai 1987 (im Druck).
- Jost, D.: Luftqualität in belasteten Gebieten und fern von Emittenten. - *Staub - Reinh. Luft* 44 (1984), S. 137 - 138.
- Klapp, E.: *Grünlandvegetation und Standort*. - Parey, Berlin/Hamburg 1965.
- Klapp, E.: *Wiesen und Weiden*. - Parey, 4. Aufl., Berlin/Hamburg 1971.
- Klein, H., Jäger, H.-J., Domes, W. und Wong, C.H.: Mechanisms contributing to differential sensitivities of plants to SO<sub>2</sub>. - *Oecologia (Berl.)* 33 (1978), S. 203 - 208.
- Lauenroth, W.K. und Preston, E.M.: The effects of SO<sub>2</sub> on a grassland. - *Ecological Studies* 45, Springer, New York usw. 1984.
- Lefohn, A.S. und Mohnen, V.A.: The characterization of ozone, sulfur dioxide, and nitrogen dioxide for selected monitoring sites in the Federal Republic of Germany. - *Air Pollution Control Association* 36 (1986), S. 1329-1337.
- Mandl, R.H., Weinstein, L.H., McCune, D.C. und Keveny, M.: A cylindrical open-top field chamber for exposure of plants to air pollutants in the field. - *J. Environ. Qual.* 2 (1973), S. 371 - 376.
- Max, W. und Rohdenburg, H.: Das Ökologger-System, Landschaftsökologisches Messen auch unter erschwerten Umweltbedingungen. Teil 1. Hardware. - *Landschaftsökol. Messen Auswerten* 1 (1985), S. 199 - 207.
- Miles, J.: *Vegetation dynamics*. - Chapman & Hall, London/New York 1979.
- Niedersächsischer Minister für Bundesangelegenheiten: *Niedersächsisches Emissionskataster (NEK)*. - *Reinhal tung der Luft* 7 (1983), S. 192 - 228.
- Niedersächsischer Minister für Bundesangelegenheiten: *Niedersächsisches Emissionskataster (NEK)*. - *Reinhal tung der Luft* 8 (1985), S. 243 - 261.
- Oberdorfer, E.: *Pflanzensoziologische Exkursionsflora*. - Ulmer, Stuttgart 1983.
- Peake, E. und Legge, A.: Evaluation of methods used to collect air quality data at remote and rural sites in Alberta, Canada. - *Proc. EPA/APCA Symp. „Measurements of Toxic and Related Air Pollutants“*, Research Triangle Park (N. Carolina), 3.-6. Mai 1987 (im Druck).
- Pfeffer, H.-U.: Immissionserhebungen in quellfernen Gebieten Nordrhein- Westfalens. - *Staub - Reinh. Luft* 45 (1985), S. 287 - 293.
- Rat der Sachverständigen für Umweltfragen: *Umweltprobleme der Landwirtschaft*. - Kohlhammer, Stuttgart/Mainz 1985.
- Rohdenburg, H., Dieckkrüger, B. und Bork, H.-R.: Deterministic hydrological site and catchment models for the analysis of agroecosystems. - *Catena* 13 (1986), S. 119 - 137.
- Scheffer, F. und Schachtschabel, P.: *Lehrbuch der Bodenkunde*. - Enke, 11., von P. Schachtschabel et al. neubearb. Aufl., Stuttgart 1982.
- Schwarzenbach, F.H.: Was erwartet die ökologische Forschung von der Biometrie? - *Tagungsunterlagen Seminar der Internat. Biometrischen Ges. Region Österreich/Schweiz*, Graz 1985.
- Schwarzenbach, F.H.: Grundlagen für die Entwicklung einer allgemein anwendbaren Strategie zur Lösung ökologischer Probleme. - *Ber. Eidgenössischen Anst. f. d. Forstliche Versuchswesen* Nr. 293, Birmensdorf (CH) 1987.
- Seifert, B. und Drews, M.: Atomabsorptionsspektrometrische Bestimmung von Blei, Cadmium, Kupfer, Zink und Arsen in Schwebstaub und Staubniederschlag. - *WaBoLu-Ber.* 1/78 (1987), S. 1 - 45.
- Tingey, D.T. und Taylor, G.E.jr.: Variation in plant response to ozone: A conceptual model of physiological events. - In: Unsworth, M.H. und Ormrod, D.P. (Hrsg.): *Effects of gaseous air pollutants in agriculture and horticulture*. Butterworth, London usw. 1982, S. 113 - 138.

Umweltbundesamt: Überregionale Feststellung von Immissionen - Messung niedriger Schwefeldioxidkonzentrationen. Monatsber. Meßnetz Umweltbundesamt 1/81 (1981 a), S. 8 - 22.

Umweltbundesamt: Vertrauensbereich für Stichprobenmessungen von Blei im Schwebstaub. - Monatsber. Meßnetz Umweltbundesamt 12/81 (1981 b), S. 2 - 11.

Umweltbundesamt: Ein Verfahren zur Feststellung potentieller Immissionsraten: Oberflächenaktive Monitore SAM (Surface Active Monitor). - Monatsber. Meßnetz Umweltbundesamt 7/84 (1984), S. 2 - 15.

Umweltbundesamt: Feststellung der Immissionsrate mit dem SAM-Verfahren. - Monatsber. Meßnetz Umweltbundesamt 2/86 (1986), S. 36 - 48.

VDI-Kommission Reinhaltung der Luft: Messung gasförmiger Immissionen. Messung der Schwefeldioxidkonzentration. Photometrisches Verfahren (TCM-Verfahren). - VDI 2451 Bl. 3, Düsseldorf 1968.

VDI-Kommission Reinhaltung der Luft: Messung gasförmiger Immissionen. Messen der Ammoniak-Konzentration. Indophenol-Verfahren. - VDI 2461 Bl. 1, Düsseldorf 1974.

VDI-Kommission Reinhaltung der Luft: Messen von Partikeln. Messen der Massenkonzentration (Immission). Filterverfahren. Kleinfiltergerät GS 050/3. - VDI 2463 Bl. 7, Düsseldorf 1982.

VDI-Kommission Reinhaltung der Luft: Säurehaltige Niederschläge - Entstehung und Wirkungen auf terrestrische Ökosysteme. - VDI-Verlag, Düsseldorf 1983.

Williams, E.D.: Botanical composition of the Park Grass Plots at Rothamsted 1856 - 1976. - Rothamsted Experimental Station, Harpenden 1978.

Verfasser: Jäger, Hans-Jürgen, Prof. Dr. rer. nat.; Grünhage, Ludger, Dr. rer. nat.; Hertstein, Udo, Dipl.-Biol.; Fleckenstein, Jürgen, Dr. rer. nat.; Institut für Produktions- und Ökotoxikologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAL), Institutsleiter: (m.d.W.d.G.b.) Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Jäger. Dämmgen, Ulrich, Dr. rer. nat.; Sonderforschungsbereich „Wasser- und Stoffdynamik in Agrar-Ökosystemen“ (SPB 179), Technische Universität Braunschweig.