

Nr. 14

Wirkungen von
Fluorwasserstoff auf
Lolium Multiflorum

LIS - B E R I C H T Nr. 14

Mit diesem LIS-Bericht wird
die Dissertation von C.J. Brandt
im Originaltext veröffentlicht

Herausgeber:

Landesanstalt für Immissionsschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Str. 6
D-4300 Essen 1

1981

ISSN 072-8499

UNTERSUCHUNGEN ÜBER WIRKUNGEN
VON FLUORWASSERSTOFF AUF
LOLIUM MULTIFLORUM UND ANDERE NUTZPFLANZEN

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Grades
Doktor der Landwirtschaft (Dr.agr.)
der Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
zu Bonn

vorgelegt am 13. August 1979

von

C. JEFFREY BRANDT
aus Ithaca, New York

Aus der Landesanstalt für Immissionsschutz des
Landes Nordrhein Westfalen, Essen

und dem Institut für Pflanzenbau der Rheinischen-
Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn

Referent: Prof. Dr. Boeker

Korreferent: Prof. Dr. Kick

Tag der mündlichen Prüfung: 23. Oktober 1980

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<u>Einleitung</u>	5
<u>Literaturauswahl über Fluor-Wirkungen</u>	9
<u>1. Versuchsmethodik</u>	21
1.1 Begasungsverfahren	21
1.1.1 Aufbau und Funktion der Versuchsanlagen	21
1.1.2 Dosierung und Messung von HF und SO ₂	25
1.2 Auswahl der Versuchspflanzen	27
1.2.1 Die Versuchspflanzen	27
1.2.2 Alter der Versuchspflanzen sowie Zeitpunkt der Probenahme	28
1.3 Probenaufbereitung und chemische Pflanzenanalyse	30
1.3.1 Probenaufbereitung	30
1.3.2 Chemische Pflanzenanalyse	30
1.4 Wirkungskriterien	31
1.4.1 Fluor-Anreicherung	31
1.4.2 Netto-Assimilation und Dunkelatmung	32
1.4.3 Zuwachs- und Qualitätsfeststellungen	33
<u>2. Untersuchungen und ihre Ergebnisse</u>	34
2.1 Wirkungen verschieden hoher HF-Konzentrationen auf <u>Lolium multiflorum</u>	34
2.1.1 Sichtbare Schädigungen sowie Auswirkungen auf die Wuchs- und Ertragsleistung	34
2.1.2 Fluor-Anreicherung in der Pflanzensubstanz	37

	<u>Seite</u>
2.1.3 Zusammenhänge zwischen Fluor- Aufnahme, Dunkelatmung und Photosyntheseleistung	42
2.2 Wirkung verschieden hoher HF-Konzen- trationen auf andere Nutzpflanzen	45
2.2.1 Buschbohnen	45
2.2.2 Buschtomaten	47
2.2.3 Mais	48
2.2.4 Gladiolen	52
2.2.5 Futterhirse	55
2.3 Kombinationswirkungen von Fluor- wasserstoff und Schwefeldioxid auf <u>Lolium multiflorum</u> und <u>Setaria italica</u>	59
2.3.1 <u>Lolium multiflorum</u>	59
2.3.2 <u>Setaria italica</u>	68
3. <u>Diskussion</u>	85
4. <u>Zusammenfassung</u>	94
5. <u>Literaturverzeichnis</u>	97
6. <u>Tabellenanhang</u>	114
7. <u>Summary</u>	138

Einleitung

Fluorwasserstoff (HF) wurde schon im vorigen Jahrhundert als pflanzenschädigende Luftverunreinigungs-komponente erkannt (MAYRHOFER 1891). Speziell aus dem Umgebungsbereich von Düngemittelfabriken (MAYRHOFER 1891, RHODE 1895, WISLICENUS 1901, OST 1896, 1907), Ziegeleien (HAMIG et al. 1913, STAHL 1927, KOTTE 1929) und Glas- und Emailleanlage (OST 1907, AGDE und KRAUSE 1927) stammten die ersten detaillierten Angaben über fluorbedingte Vegetationsschäden. Seit etwa 1920 erlangten auch die Schädigungen in der Nachbarschaft von Aluminiumhütten und elektrochemischen Anlagen einen bedeutenden Umfang (FAES 1921, WILLE 1922, CRISTIANI und GAUTIER 1925, deONG 1946).

Parallel mit den zunehmenden Schäden an der Vegetation (THOMAS und ALTHER 1966) infolge des Industrialisierungsprozesses erhöhte sich auch die Gefährdung von Nutztieren (DAMMAN und MANEGOLD 1904, HUPKA und YUY 1929, ROHOLM 1934, SUTTIE 1964, 1969, SHUPE 1971), so daß heute fluorhaltige Luftverunreinigungen eine überregionale Bedeutung haben. Zur Ermittlung und Beurteilung der hieraus resultierenden Gefährdungen bieten sich die starken immissionsbedingten Fluor-Anreicherungen in Pflanzenorganen an, umsomehr als fraktionierte Bestimmungen der unterschiedlich wirksamen gas- und staubförmigen F-Verbindungen auf Schwierigkeiten stoßen (MacLEAN et al. 1967, MANDL et al. 1970, ISRAEL 1974, JACOBSON und WEINSTEIN 1977). Mit diesen hohen immissionsbedingten Fluor-Anreicherungen bei vergleichsweise geringen Schwankungen im natürlichen Fluor-Gehalt unbeeinflusster Pflanzen sind also gute Voraussetzungen

für Gefährdungsprognosen mit Hilfe biologischer Verfahren gegeben. Als biologisches Meßobjekt hat sich die im Graskulturverfahren nach SCHOLL (1971) verwendete Weidelgrasart Lolium multiflorum, Sorte Lema, als besonders geeignet erwiesen.

Die Beurteilung der Luftqualität an Hand des Fluorgehaltes im Pflanzenmaterial setzt die Verwendung möglichst F-resistenter Pflanzenarten voraus, die auch noch unter höheren Belastungen funktionstüchtig bleiben. Darüber hinaus muß bekannt sein, welche inneren und äußeren Wachstumsfaktoren die Aufnahme des Fluors aus der Luft und seine Wirkung in der Pflanze bestimmen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, die Grundlagen zur Beurteilung der Möglichkeiten und Grenzen des Graskulturverfahrens zu erweitern. Im einzelnen wurden folgende Fragen geprüft:

Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Fluor-Anreicherung in Lolium multiflorum, dem HF-Gehalt in der Luft und der Expositionszeit?

Wie wirken sich verschieden hohe HF-Konzentrationen auf die Wuchs- und Ertragsleistung sowie den Gaswechsel von Lolium multiflorum aus?

Wie beeinflussen Pflanzenalter und Jahreszeit die oben genannten Pflanzenreaktionen?

Das standardisierte Graskulturverfahren ist nicht nur zur Beurteilung des Belastungsgrades der Luft, sondern auch für Gefährdungsabschätzungen anderer Pflanzenarten vorgesehen (SCHOLL 1972, 1976, SCHOLL und SCHÖNBECK

1973, 1974). Um Unterlagen über die Beziehungen zwischen der F-Anreicherung in der Graskultur und der Gefährdung anderer Pflanzenarten zu erhalten, wurden vergleichende Untersuchungen mit verschiedenen Nutzpflanzen bei folgender Zielsetzung durchgeführt:

Welche Beziehungen bestehen zwischen der F-Anreicherung in Lolium multiflorum und der in anderen Nutzpflanzen?

Wie wirken sich verschieden hohe HF-Konzentrationen auf die äußere Beschaffenheit, die Wuchs- und Ertragsleistung sowie den Gaswechsel der Vergleichspflanzen aus?

Luftverunreinigungen kommen infolge der heute weit verbreiteten hohen Emittentendichte selten als Einzelkomponenten vor; Kombinationswirkungen durch das gleichzeitige Auftreten mehrerer Komponenten sind daher zu erwarten. Da vor allem Schwefeldioxid (SO_2) an den komplexen Immissionstypen in Belastungsgebieten beteiligt ist, sind Untersuchungen über die Kombinationswirkungen von HF und SO_2 für den praktischen Immissionsschutz von besonderem Interesse. Folgende Fragen waren Gegenstand der eigenen Versuche:

Inwieweit beeinflusst SO_2 die F-Aufnahme durch Pflanzen?

Wie wirken sich HF und SO_2 allein und in Kombination auf Wuchs- und Ertragsleistung sowie den Gaswechsel von Pflanzen aus?

Welchen Einfluß haben äußere Wachstumsfaktoren, wie

Licht, Temperatur und Luftfeuchte auf die Reaktionen
der Pflanzen?

Die mit Hilfe verschiedener Methoden ermittelten Pflanzenreaktionen werden unter Beachtung der in der Literatur vorliegenden Befunde speziell im Hinblick auf Belange des praktischen Immissionsschutzes ausgewertet.

Literaturauswahl über Fluor- Wirkungen

Fluor wird von Pflanzen aus dem Boden, dem Wasser und der Luft aufgenommen. Das dem Boden oder Wasser entnommene Fluor führt nur unter extremen Bedingungen zu Pflanzenschäden (MacINTIRE et al. 1955, HANSEN et al. 1958, GARBER 1967, GARBER et al. 1967). Die fluorbedingten Schäden an der Vegetation werden vornehmlich durch gas- und staubförmige Fluor-Verbindungen, wie Fluorwasserstoff (HF), Siliziumtetrafluorid (SiF_4), Kieselfluorwasserstoffsäure (H_2SiF_6) und Natriumfluorid (NaF) auf die oberirdischen Pflanzenorgane verursacht.

Nach Aufnahme von Fluor aus Boden und Wasser über die Wurzeln wird es im Transpirationsstrom verlagert und reichert sich vor allem im Gewebe der Blattspitzen und -ränder an. Fluor in der Luft wird hauptsächlich über die Blätter aufgenommen und reichert sich gleichfalls in den Blattspitzen und -rändern an. Die Translokation des über die Blätter aufgenommenen Fluors in andere Pflanzenteile ist vergleichsweise gering (GUDERIAN 1977).

Fluor zählt nach den heutigen Erkenntnissen zu den für eine normale Entwicklung der Pflanzen entbehrlichen Elementen (MITCHELL und EDMAN 1945, THOMAS und ALTHER 1966, WEINSTEIN 1977). Die natürlichen F-Gehalte in der Pflanzensubstanz sind gering und liegen im allgemeinen unterhalb 20 ppm ($\mu\text{g F/g TS}$) in der Trockensubstanz (TS). Der normale F-Gehalt schwankt mit der Pflanzenart, dem Blattalter und dem Boden. Bei Pflanzen aus der Familie der Theaceae wurden F-Gehalte zwischen

37 und 390 ppm gefunden (WANG et al. 1949, BREDEMANN 1956), während Camelliapflanzen je nach dem F-Gehalt des Bodens sogar Werte bis zu 1370 ppm aufwiesen (McGLENDON und GERSHON-COHEN 1955). Im Gegensatz zu diesen sehr aufnahmefähigen Pflanzenarten zeigt der F-Gehalt der anderen Pflanzenarten nur eine sehr geringe Beziehung zum Gesamtfluorgehalt des Bodens (GARBER et al. 1967).

Die insbesondere im Blattgewebe akkumulierte Fluormenge verursacht verschiedenartige Wirkungen, abhängig von dem art- bzw. sortenspezifischen Resistenzgrad der betroffenen Pflanze, sowie den ökologischen und biologischen Faktoren vor, während und nach der Exposition.

Fluor wirkt sich auf die verschiedenen biologischen Organisationsstufen aus, so daß Reaktionen der Pflanzenzelle mit denen ganzer Organismen oder gar ganzer Pflanzengesellschaften in Beziehung gebracht werden können. Fluor-Wirkungen auf die Pflanzenzelle äußern sich als Störungen in Enzymfunktionen, Änderungen in biochemischen Abläufen, Veränderungen an Zellorganellen und sogar im Zelltod.

Funktionen verschiedener Enzyme werden durch Einwirkung von Fluorverbindungen gestört (JAMES 1953). Zu den fluorempfindlichen Enzymen zählen vor allem Enolase (WARBURG und CHRISTIAN 1942, MILLER 1958), Phosphoglukomutase (CHUNG und NIKERSON 1954), Phosphatase (MASSART und DUFAIT 1942, KIELLEY und MEYERHOFF 1948) und Hexokinase (MELCHIOR und MELCHIOR 1956). Die Wirkungen reichen von Stimulationen bis zur Hemmung der Enzymaktivität mit oder ohne sichtbare Schädigungen (YANG und MILLER 1963, CHANG 1967, LOVELACE und MILLER

1967 a, b), wobei Art und Grad der Wirkungen, außer von der Konzentration in der Zelle, von der Verteilung in den einzelnen Zellkompartimenten bestimmt werden.

ROSS et al. (1962, 1968) zeigten, daß Fluor den Abbau von Glukose hemmt, während LUSTINEC et al. (1962) fanden, daß diese fluorbedingte Hemmung sehr vom Pflanzenalter abhing. McCUNE et al. (1967) bestätigten diese Störungen im Glukosekatabolismus durch Fluor, meinten aber, sie beruhten auf eine fluorbedingte Änderung des normalen Alterungsprozesses.

In zahlreichen Untersuchungen (McNULTY und NEWMAN 1956 1961; NEWMAN und McNULTY 1957, 1959) wurde eine fluorbedingte Verminderung im Chlorophyll-Gehalt von Blättern festgestellt. Weiterhin wurden häufig Störungen in Struktur und Funktion von Chloroplasten (CHANG und THOMPSON 1966, POOVAIAH und WIEBE 1969) und Mitochondrien (WEI 1973, WALLIS et al. 1974) gefunden. MOHAMED et al. (1966) und MOHAMED (1969) stellten, nach Begasungen mit HF, Änderungen in Chromosomen von Tomaten, Mais und Zwiebeln fest.

Derartige Wirkungen an der Zelle können die Funktionen von pflanzlichem Gewebe beeinflussen, z.B. durch Störung des CO₂-Gaswechsels. Oberhalb einer bestimmten Schädigungsintensität in der Zelle treten äußere Schädigungsmerkmale in Form von Blattchlorosen bzw. -nekrosen auf (TRESHOW und PACK 1970).

Die beschriebenen Schadwirkungen an den beiden untersten Organisationsstufen, äußern sich vielfach in Ertrags- oder Qualitätseinbußen, sowie verminderter Resistenz gegenüber biotischen oder abiotischen Einflüssen oder

gar in Tod der ganzen Pflanze (THOMAS und ALTHER 1966). Wirkungen auf einzelne Pflanzenarten können auch durch Änderungen in der Zusammensetzung von Pflanzengesellschaften ganze Ökosysteme beeinflussen, wie z.B. unter dem Einfluß von staubförmigen Luftverunreinigungen gezeigt worden ist (BRANDT und RHOADES 1972, 1973). Indessen ist die Gefahr nachhaltiger Veränderungen in Ökosystemen durch die direkten Einwirkungen von Fluor-Immissionen auf die Vegetation nicht so groß, während die mittelbaren Schäden speziell an Weidetieren durch Aufnahme von mit Fluor kontaminiertem Futter eine erhebliche Bedeutung haben.

Anhand ausgewählter Beispiele sollen die oben erwähnten Reaktionen der einzelnen Organisationsstufen auf fluorhaltige Luftverunreinigungen im folgenden näher beschrieben werden. Über die Anreicherung von Fluor in Pflanzen durch Aufnahme aus der Luft sowie über Beziehungen zwischen erhöhten F-Gehalten in der Pflanze und ihren Wirkungen liegen bereits zahlreiche Ergebnisse vor (THOMAS und ALTHER 1966, NAS 1970, WEINSTEIN 1977). Im allgemeinen nimmt die Gefährdung von Pflanzen mit dem F-Gehalt in pflanzlichem Gewebe zu. Der Zusammenhang ist allerdings nicht so eng, daß die F-Anreicherung generell als Kriterien der Wirkungen dienen kann, wohl stellt sie eine wichtige Methode zum Nachweis einer Fluorbelastung an der Vegetation dar. Dagegen besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Akkumulation von Fluor in Futterpflanzen und der Belastung von Nutztieren (SUTTIE 1964, 1969; SHUPE und OLSON 1971).

In Begasungsversuchen (GUDERIAN et al. 1969) zeigten empfindliche Forstkulturen, wie Picea abies, Pinus strobus, Abies nordmanniana und Fagus sylvatica nach

kurzfristigen Einwirkungen von etwa $1,3 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft so starke Blattschädigungen, daß bei Exposition über Monate mit starken Wuchsbehinderungen gerechnet werden muß. BREWER et al. (1960) stellten nach 26-monatiger Begasung mit $0,8 - 4,0 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft erhebliche Verminderungen in Dicken- und Höhenwachstum von Citrus fest. Gesicherte Wuchsdepressionen zeigten auch Hordeum vulgare nach 12-tägiger Begasung mit $3,3 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft und Avena sativa, Vicia sativa und Pisum arvense mit Konzentrationen oberhalb von $4 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft (GUDERIAN et al. 1969). Nach SPIERINGS und WOLTING (1971) sinkt der Zwiebelertrag von Tulpen der Sorte "Paris" bei zunehmender HF-Konzentration bis etwa $4,5 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft auf etwa 45 % der Ernte, die bei $0,5 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft erzielt wurde, ab. Die Blattspitzennekrosen nahmen um das Zehnfache zu.

An Tomaten dagegen traten keine Wuchsminderungen auf, selbst bei Konzentrationen ($73 \mu\text{g HF/m}^3$), die schwache Blattnekrosen verursacht hatten (HILL et al. 1958). Unter niedrigen Konzentrationen stellten TRESHOW und HARNER (1968) an Phaseolus vulgaris sogar eine Zunahme in Pflanzenhöhe, Frischgewicht und Trockensubstanzbildung fest. Stimulierende Effekte langanhaltender Einwirkungen niedriger Konzentrationen wurden auch an Medicago sativa und Dactylis glomerata festgestellt (HITCHCOCK et al. 1971).

Untersuchungen von BREWER et al. (1960, 1967, 1969) sowie LEONARD und GRAVES (1972) über F-Anreicherung in Citrus zeigten, daß F-Gehalte um 200 ppm in den Blättern mit signifikanten Wuchs- und Ertragsdepressionen verbunden sind. Bei Phaseolus vulgaris dagegen wurden bei derartigen Anreicherungen unter HF-Konzentrationen von

0,3 - 3,2 $\mu\text{g HF/m}^3$ Luft nach 3-wöchiger Exposition entweder eine Stimulation oder keine Wirkung festgestellt (TRESHOW und HARNER, 1968). So zeigten sich bei F-Anreicherungen zwischen 50 - 150 ppm keine signifikanten Unterschiede in Frisch- bzw. Trockengewicht gegenüber der Kontrollpflanzen, während bei F-Gehalte von 151 - 200 ppm eine signifikante Wuchsstimulation vorlag; die Pflanzen mit F-Gehalten von 201 - 300 ppm unterschieden sich im Wachstum nicht von den Kontrollpflanzen, gesicherte Wuchsminderungen traten erst bei F-Anreicherungen oberhalb 300 ppm auf.

ADAMS et al. (1957) untersuchten die Zusammenhänge zwischen Expositionszeitpunkt, HF-Konzentration, äußere Beschaffenheit und F-Gehalt von 40 Pflanzenarten und -sorten und fanden, daß die im Dunkeln begasten Pflanzen auf eine bestimmte, angereicherte Fluor-Menge empfindlicher reagieren als die im Licht exponierten. In Untersuchungen über F-Aufnahme von Gladiolen stellten JACOBSON et al. (1966) fest, daß art- und individual-spezifische Unterschiede im Resistenzgrad auf unterschiedlichen Anreicherungen, Translokationen und Ablagerungen von Fluor beruhen.

MacLEAN et al. (1969) und MacLEAN und SCHNEIDER (1973) untersuchten den Einfluß intermittierender Begasungen mit HF auf die F-Anreicherung in Phleum pratense und Trifolium pratense. Im Vergleich zur kontinuierlichen Begasung war hier die Fluor-Anreicherung 2,5 mal so hoch.

Auf Grund der engen Beziehungen zwischen F-Anreicherung und Schädigung schlugen BRANDT und HECK (1968) die Aufstellung von Resistenzreihen anhand der F-Gehalte

in der Pflanzensubstanz vor. HILL (1969) empfahl Grenzwerte von 20 - 200 ppm in der Trockensubstanz für sehr empfindliche, 200 - 300 ppm für empfindliche und 300 ppm für weniger empfindliche Pflanzen. Eine Klassifikation der Anreicherungs-werte in Futterpflanzen hinsichtlich der Gefährdung von Nutztieren wurde von BRANDT (1971) vorgenommen.

Untersuchungen über den Einfluß von Fluor auf den Gaswechsel von Pflanzen zeigten, daß bei gegebener Anreicherung je nach Pflanzenart entweder eine Stimulation oder eine Verminderung der Dunkelatmung erfolgt (YU und MILLER 1967). McNULTY und NEWMAN (1957) konnten eine Zunahme in der Dunkelatmung von Gladiolen (Snow Princess) nach Begasungen mit HF feststellen, während HILL et al. (1959) eine Beziehung zwischen dem Umfang der Blattschädigung und der Höhe der Dunkelatmung nachwiesen. McNULTY (1959) fand, daß Natriumfluorid (5×10^{-3} M NaF) die Dunkelatmung von Buschbohnen um 25 % erhöhte, ohne sichtbare Schädigungen hervorzurufen. Diese Ergebnisse stimmten mit denen von LUSTINEC et al. (1960) an mit NaF behandelten Weizenpflanzen überein. Eine Zunahme in der Dunkelatmung durch Fluor-Einwirkung wurde weiterhin an Erbsen (Pisum sativum) (CHRISTIANSEN und THIMANN 1950), Tomaten (Lycopersicum esculentum) und Buschbohnen (Phaseolus vulgaris) (WEINSTEIN 1961) und Wein (Vitis vinifera) (PILET 1963) festgestellt.

McNULTY und NEWMAN (1956) zeigten, daß die Dunkelatmung von Prunus durch niedrige Konzentrationen von NaF auch gehemmt werden kann. APPLGATE et al. (1960) fanden eine Verminderung der Dunkelatmung von Buschbohnen nur unter hohen Konzentrationen von NaF, während niedrigere Konzentrationen die Dunkelatmung erhöhten. Eine Verminde-

rung der Dunkelatmung von Buschbohnen wurde auch durch Einwirkung von HF festgestellt (APPLEGATE und ADAMS 1960 a, b).

Die meisten Untersuchungen über den Einfluß von Fluor auf die CO_2 -Aufnahme befassen sich mit der Wirkung von HF in der Luft auf die Photosyntheseleistung. Nach Begasungsversuchen mit Gladiolen korrelierte die Verminderung der Photosyntheseleistung mit dem Grad der Blattschädigung (THOMAS und HENDRICKS 1956). Kurzfristige Begasungen, auch mit höheren Konzentrationen, reduzierten die photosynthetische Leistung zum Teil nur vorübergehend; nach der Begasung zeigten die Pflanzen deutliche Erholungen. BALLANTYNE (1972) zeigte, daß die Hill Reaktion in Chloroplasten von Buschbohnen durch Kaliumfluorid (KF) gehemmt wird.

WOLTZ und LEONARD (1964) stellten im Freilandversuch eine Zunahme in der Photosyntheseleistung von Orangen durch Aufnahme von Fluor aus der Luft fest, während SMITH (1961) bei Begasungen von Buschbohnen mit $10 - 15 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft über 5 Tage keine Wirkung auf die Photosyntheseleistung beobachtete. In Begasungsversuchen mit Buschbohnen und Tomaten ermittelte WEINSTEIN (1961) zwar eine Abnahme in Produktion von Chlorophyll a und b, fand aber keine Wirkung auf die Photosynthese. BENNETT und HILL (1973) stellten in Klimakammerversuchen an Hordeum vulgare und Medicago sativa mit 6 verschiedenen Luftverunreinigungs-komponenten fest, daß nach 2-stündiger Begasung bei 1,0 ppb HF die Photosyntheseleistung um etwa 20 % ohne sichtbare Schädigungen reduziert wurde. Auf Grund der Wirkung auf die Photosynthese ergab sich für die untersuchten Komponenten der folgende Toxizitätsgrad: $\text{HF} > \text{O}_3 > \text{Cl}_2 > \text{SO}_2 > \text{NO}_2 > \text{NO}$. Nach Untersuchungen von

McLAUGHLIN und BARNES (1975) wurde die Photosyntheseleistung von Laub- und Nadelbäumen durch NaF-Konzentrationen im Bereich von 10^{-4} bis 10^{-2} M gehemmt, während die Dunkelatmung bei Konzentrationen zwischen 10^{-4} und 10^{-3} stimuliert wurde. Die gleichzeitige Hemmung der Photosynthese und Stimulation der Respiration ließen Wuchsminderungen erwarten.

Die starke Anreicherung von Fluor in Pflanzenorganen gab Anlaß zu der Überlegung, Pflanzen zur Überwachung von Gebieten mit fluorhaltigen Luftverunreinigungen zu benutzen. In systematischen Untersuchungen mit Medicago sativa und Dactylis glomerata fand McCUNE und HITCHCOCK (1970) bei einer bestimmten Expositionszeit enge Korrelationen zwischen dem F-Gehalt in den Pflanzen und den HF-Konzentrationen in der Luft. Hierbei, wie auch in den Versuchen von MacLEAN et al. (1969, 1970, 1976) wurde deutlich, wie stark externe Faktoren die F-Aufnahme beeinflussen können.

SCHOLL (1971) und SCHOLL et al. (1971) entwickelten ein standardisiertes Verfahren für die Anzucht und Exposition von Lolium multiflorum, Sorte Lema, das zur Überwachung von Fluor-Immissionen im Freiland Anwendung findet (SCHOLL und SCHÖNBECK 1974). Als Kriterium für die immissionsbedingte Anreicherung dient die je Zeiteinheit aufgenommene Fluor-Menge (Fluor-Aufnahmerate). Zum Schutz von Pflanzen und Weidevieh wurde eine Begrenzung der F-Aufnahmerate in der Graskultur vorgeschlagen (SCHOLL 1976).

Die Verwendung der Fluor-Aufnahmerate in der Graskultur zur Überwachung fluorbelasteter Gebiete sowie zum Schutz der übrigen Vegetation und von Nutztieren setzt ver-

gleichende Untersuchungen mit anderen Pflanzenarten voraus. Bisher liegen hierüber lediglich Ergebnisse aus Immissionsgebieten mit ständig wechselnden Bedingungen in den äußeren Wachstumsfaktoren und im Schadstoffangebot vor. Begasungsversuche unter kontrollierten Verhältnissen unterstützten die Aussagekraft des Graskulturverfahrens für allgemeine Gefährdungsprognosen.

Der derzeitige Gefährdungspotential wird wesentlich durch langanhaltende Einwirkungen niedriger Konzentrationen und das gleichzeitige Auftreten mehrerer biologisch wirkender Luftverunreinigungen bestimmt. Da Schwefeldioxid (SO_2) weitverbreitet an den komplexen Immissionstypen von Belastungsgebieten beteiligt ist, sind Untersuchungen über die Wirkungen von HF und SO_2 in Kombination vordringlich geworden.

Die bisherigen Untersuchungen über Wirkungen von Luftverunreinigungen in Kombination befassten sich hauptsächlich mit SO_2 und Ozon (O_3) (HAAGEN-SMIT et al. 1952, MIDDLETON et al. 1958). Erste synergistische Wirkungen dieser Komponenten wurden von MENSER und HEGGESTAD (1966) an Tabak beobachtet. Für die Wirkungsintensität ist das Verhältnis SO_2/O_3 von wesentlicher Bedeutung, wie auch die Untersuchungen von TINGEY et al. (1973) an elf Pflanzenarten bestätigten. Der Grad der Blattschädigung hing stark von der Relation der beiden Komponenten zueinander ab und war additiv bzw. geringer oder stärker als additiv. Eine Systematik für diese unterschiedlichen Reaktionen war nicht zu erkennen. DOCHINGER (1970) fand Wuchsminderungen an Pinus strobus bei gleichzeitigen Einwirkungen von SO_2 und O_3 auch noch unter Konzentrationen, die allein keine Schädigungen erwarten lassen. An anderen Nutzpflanzen stellten REINERT et al. (1970)

signifikante Wuchsminderungen unter SO_2 - und O_3 -Konzentrationen fest, wie sie in Immissionsgebieten vorkommen. MANDL et al. (1974) untersuchten den Einfluß von O_3 auf die phytotoxische Wirkung von SO_2 an Medicago sativa und fanden, daß der Schwellenwert für SO_2 -Schädigungen durch Einwirkung von O_3 erhöht wurde.

Die für SO_2 und O_3 Kombinationen gefundenen Reaktionsarten wurden auch in Untersuchungen von SO_2 und NO_2 (HECK 1968, TINGEY et al. 1971, BULL und MANSFIELD 1974, WHITE et al. 1974), SO_2 und HCl (GUDERIAN und THIEL 1973) sowie von SO_2 und Schwermetalle (KRAUSE 1975, KRAUSE und KAISER 1977, GUDERIAN et al. 1977) ermittelt.

MATSUSHIMA und BREWER (1972) untersuchten die Wirkungen von SO_2 und HF als Einzelkomponenten und in Kombination auf Citrus sinensis und C. nobilis. C. sinensis zeigte bei gleichzeitiger Einwirkung von 0,8 ppm SO_2 und 2,3 - 17,1 ppb HF über 23 Tage keine sichtbaren Schädigungen, dennoch verminderte diese Kombination Trieb- und Blattwachstum. An C. nobilis verursachte die gleiche Kombination bei 15-tägiger Einwirkung sichtbare Schädigungen, die geringer als additiv waren. Nach Begasungsversuchen von MANDL et al. (1975) mit einer Kombination von 0,15 ppm SO_2 und 0,6 ppb HF über 7 Tage zeigten Hordeum vulgare und Zea mays ein Schadbild, wie es auch unter der Einwirkung von SO_2 als Einzelkomponente beobachtet wurde, HF allein verursachte keine Schädigungen. Bei einer auf 0,8 ppm reduzierten SO_2 Konzentration und einer auf 21 Tage verlängerten Expositionszeit war die Blattschädigung stärker als additiv.

Die wenigen über Kombinationswirkungen von SO_2 und HF vorliegenden Ergebnisse zeigen bereits, daß derartige

Untersuchungen eine Erweiterung der Grundlagen zur Anwendung der standardisierten Graskultur als Überwachungsmethode in Immissionsgebieten erwarten lassen.

1. Versuchsmethodik

1.1 Begasungsverfahren

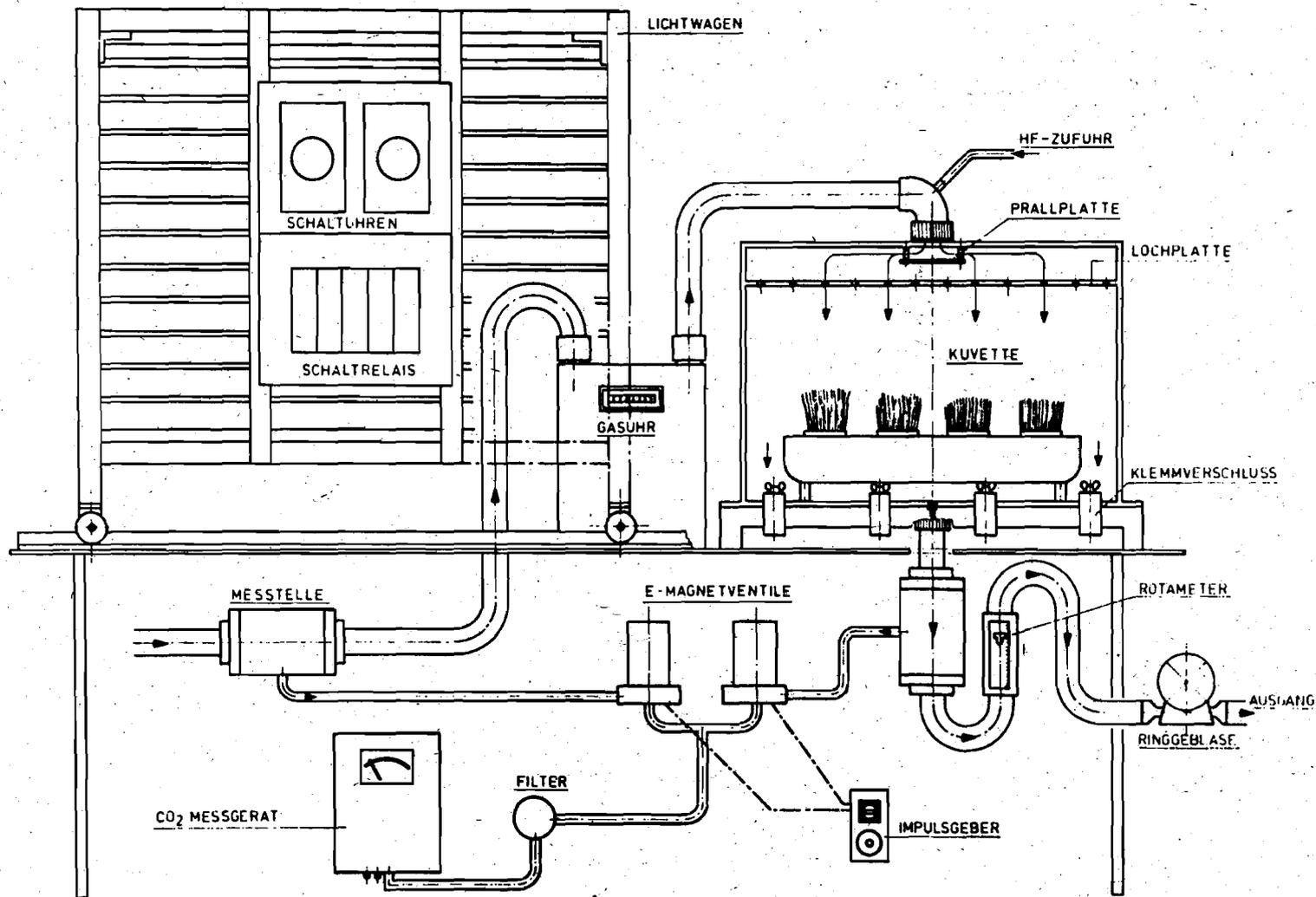
1.1.1 Aufbau und Funktion der Versuchsanlagen

Für die Klärung der vorliegenden Fragestellungen war eine Versuchsanlage zu entwickeln, in der die Pflanzen unter regulierbaren Wachstumsbedingungen definierten Fluorwasserstoff-Konzentrationen ausgesetzt werden können. Hierfür bot sich eine über Taschenklappen klimatisierte Gewächshauszelle (BOTTLÄNDER, 1966) an, in der sich Temperatur und Luftfeuchtigkeit in den erforderlichen Bereichen regeln lassen.

Die Einrichtung zur Aufnahme der Versuchspflanzen mit ausreichenden Wiederholungen für statistische Verrechnungen besteht aus zwei modifizierten Testkammern nach VAN HAUT (1972) mit einem Volumen von je 350 l und einem stufenlos regelbaren Luftdurchsatz. Die beiden Plexiglasküvetten, mit ihrem Zu- und Abluftsystem nebeneinander auf einen Gewächshaustisch montiert, dienen als Begasungs- bzw. Kontrollkammer (Abb. 1).

Die Dichte der Küvetten wird über eine spezielle Bauausführung unter Verwendung von Moosgummistreifen und Klammern gewährleistet. Die Überprüfung der Dichte erfolgt mit Hilfe von Rauchpatronen sowie über Gaswechsellmessungen an zwischen den beiden Küvetten ausgetauschten Pflanzenbeständen.

Um die gewünschte hohe Beleuchtungsstärke zu erzielen, ist jede der beiden Kammern an Ober- und Längsseiten mit



**Abb. 1 Einzelkuvette der Begasungsanlage mit Versorgungsleitungen und Regulier-
vorrichtungen**

30 Leuchtstoffröhren (im Wechsel Osram, Typ Fluora sowie Osram, Typ Daylight de Luxe, jeweils 1,20 m lang) versehen worden. Die Lampen sind in einem aus Dexionsmaterial gebauten Wagen installiert, der zum Öffnen der Küvetten nach hinten ausgefahren wird. Die Lichtintensität in Pflanzenhöhe beträgt unter der genannten Ausstattung 21000 Lux. Über eine Zeitschaltuhr läßt sich jeder beliebige Tag-Nachtrhythmus einstellen. An der Vorder- und Rückseite des Beleuchtungswagens sind zwei 4 m lange Jalousien angebracht, die während des Versuchs herabgelassen wurden, um Tageslichteffekte auszuschließen. Zwischen den Leuchtstoffröhren und ihren Fassungen ist auf der gesamten Länge Alufolie angebracht, um die Reflektion der Lampen zu erhöhen. Die durch die Lampenstrahlung sowie durch die notwendigen Drosseln entstehende Wärme wird mit Hilfe der an den Wagen angebrachten Ventilatoren (mit einer Förderleistung von $550 \text{ m}^3/\text{h}$) abgeführt. Die Luft für die Küvetten wird mit einem Gebläse über einen Aktivkohlefilter angesaugt und tritt an der Oberseite der Kammer ein, wo sie mittels einer Prall- und einer Lochplatte gleichmäßig über die Kammer verteilt wird (Abb. 1). Nach Passieren der Kammer tritt die Luft über eine durchlöcherterte Bodenplatte aus und wird über ein Abluftfilter nach außen geleitet. Durch ein am Saugventilator angebrachtes Bypassventil läßt sich der Luftdurchsatz beliebig regulieren. Die Überwachung des Luftdurchsatzes erfolgt mit Hilfe von Rotametern. Die Häufigkeit des Luftwechsels richtet sich nach der photosynthetischen Leistung der jeweiligen Pflanzenarten. Normalerweise erwies sich ein etwa 40facher Luftwechsel je Stunde als optimal.

Die Versuche unter Punkt 2.3 über den Lichtkompensationspunkt in Abhängigkeit von Schadstoffangebot, den Einfluß von Temperatur und Luftfeuchte sowie die Kombi-

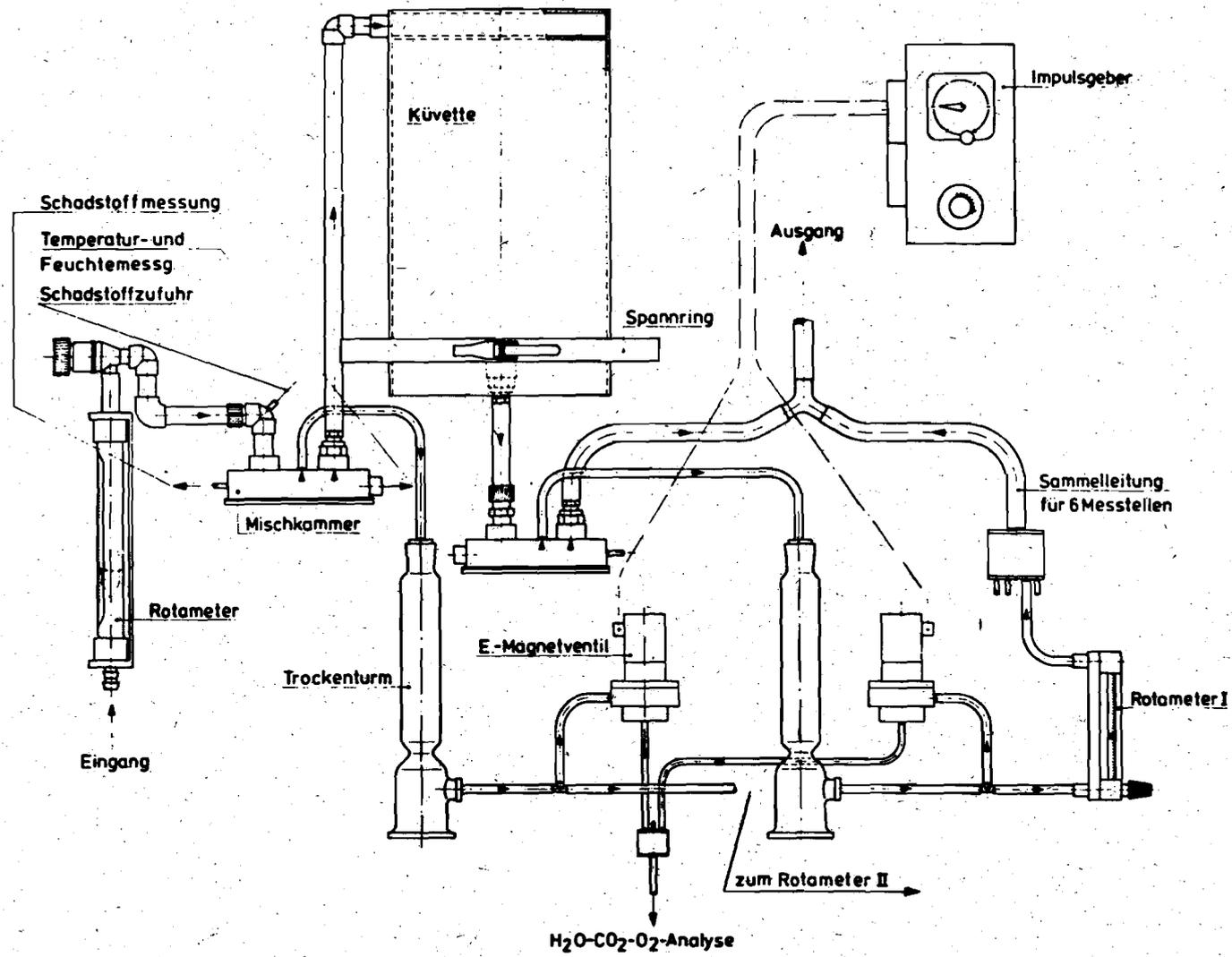


Abb. 2 Einzelküvette der Kombinationsanlage (nach GUDERIAN und THIEL, 1973)

nationswirkungen zwischen HF und SO₂ wurden in einer 3 m³ großen Klimakammer (ARNDT et al., 1973) unter Verwendung der von GUDERIAN und THIEL (1973) entwickelten Versuchsanlage (Abb. 2) durchgeführt.

1.1.2 Dosierung und Messung von HF und SO₂

Die Untersuchung der vorliegenden Fragen erfordert eine Dosiereinrichtung, mit der sich die vorgegebenen Fluorwasserstoffkonzentrationen in einem geringen Streubereich halten lassen. In Anlehnung an die von MANDL et al. (1970) sowie von McCUNE (1975) entwickelte Methode werden HF-Konzentrationen durch Verdampfung von HF-Lösungen in heißer Luft hergestellt. Als Verdampfungsgefäß dient eine 1,5 m lange Spirale aus Teflonschlauch, untergebracht in einem auf 150°C erhitzten Trockenschrank (Abb. 3). Durch einen Arm eines T-Stückes wird Trägerluft (etwa 5 l/min) eingeführt, während in den anderen Arm mit Hilfe einer Dosierpumpe die HF-Lösung (0,6-1,0 ml/h) gepumpt wird. Die Verdampfung erfolgt bereits auf dem vordersten Teilstück der Spirale; die übrige Länge dient zur Mischung des gasförmigen HF mit der Trägerluft. Um Kondensationen in der Zuleitung zur Begasungskammer zu vermeiden, ist diese mit einer Heizbandage umwickelt worden. Die HF-Konzentration kann durch die Höhe des Trägerluftdurchsatzes, die Menge der geförderten HF-Lösung und ihrer Konzentration variiert werden. Der HF-Gehalt des Trägerluftstromes wird kontinuierlich mit einem modifizierten SO₂-Meßgerät der Firma WÖSTHOFF überwacht, die HF-Konzentration in der Begasungsküvette diskontinuierlich mit dem Quarzrohr-Silberkugel-Verfahren (BUCK und STRATMANN, 1965). Die Probenahme erfolgt durch Ansaugen von etwa 1 m³ der Kammerluft über einen Teflonschlauch durch mit präparierten Silberkugeln gefüllte Quarzrohre. Nach der Probenahme

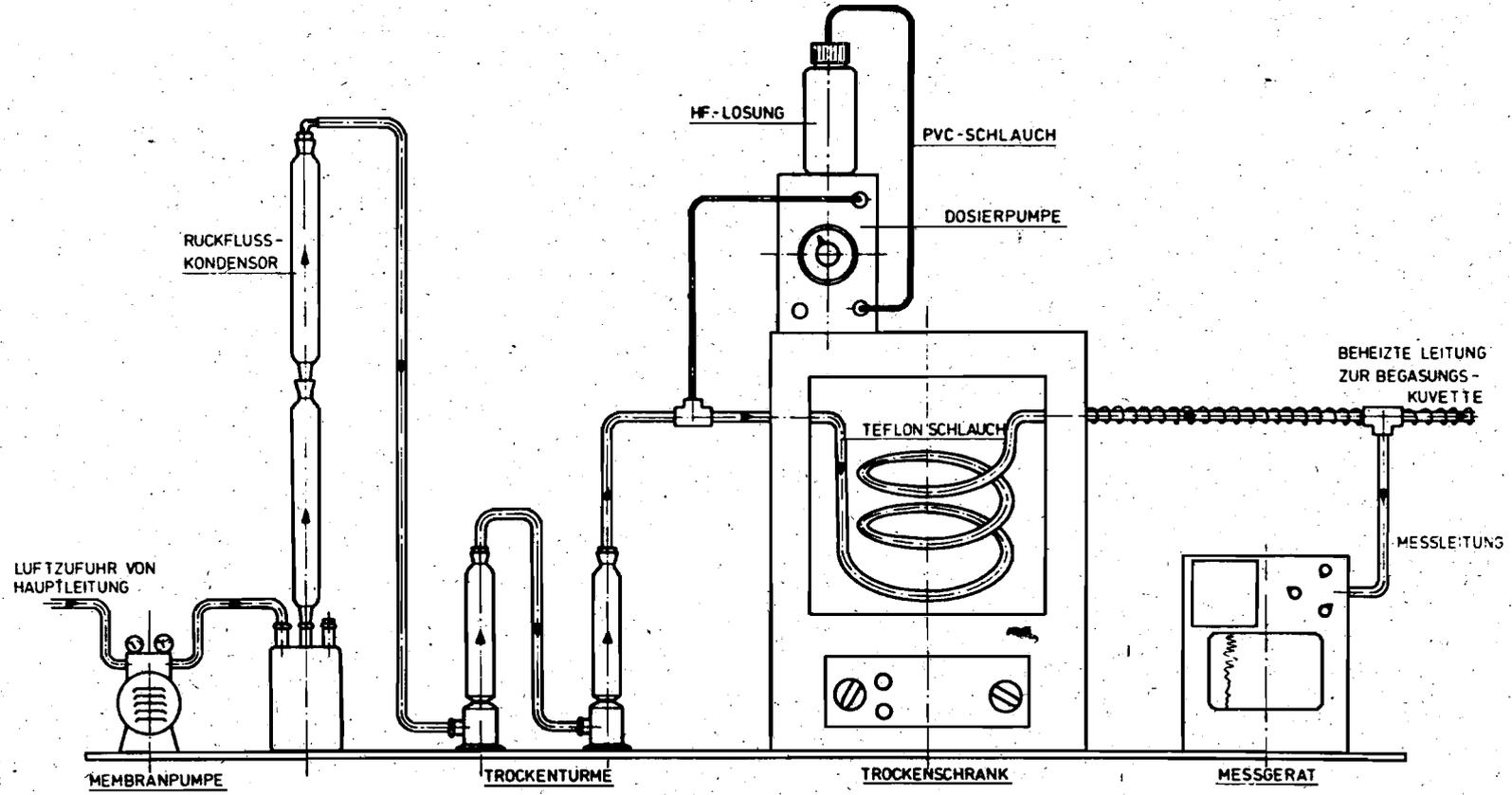


Abb. 3 Dosieranlage zur Herstellung verschieden hoher HF-Konzentrationen

wurden die Proben mit 20 ml einer Spüllösung eluiert und der F-Gehalt mit der fluoridspezifischen Elektrode bestimmt (BUCK und REUSMANN, 1971).

Die Fluorwasserstoff-Konzentrationen für die Klimakammerversuche (s. 2.3) wurden unter Verwendung des von REUSMANN und STRAMPLAT (1977) entwickelten Diffusions-Verfahrens hergestellt. Bei dieser Methode diffundiert eine 40%ige HF-Lösung durch die Wände eines in einem Aluminium-Behälter eingeschlossenen und auf 50°C erhitzten Kunststoffgefäßes. Trägerluft wird durch den Alu-Behälter und in die Begasungskammern gepumpt.

Zur Herstellung von Schwefeldioxid-Konzentrationen für die Klimakammerversuche diente 1%iges SO₂, das über ein Ventil und mit Hilfe eines Strömungsmessers dem Luftstrom zudosiert wurde. Die Konzentration wurde mit einem WÖSTHOFF-Gerät kontinuierlich überwacht.

1.2 Auswahl der Versuchspflanzen

1.2.1 Die Versuchspflanzen

Als Versuchsobjekt zur Abschätzung von Vegetationsgefährdung durch Fluor-Immissionen ist die im Graskulturverfahren nach SCHOLL (1971) verwendete Weidelgrasart Lolium multiflorum, Sorte Lema gewählt worden. Da dieses standardisierte Verfahren weit verbreitet zur Überwachung von Immissionsgebieten eingesetzt wird, stellt dessen gründliche Untersuchung und ein Vergleich der Reaktionen von Lolium und denen anderer Nutzpflanzen unter kontrollierten Bedingungen einen wesentlichen Beitrag zur Anwendbarkeit dieser Methode dar. Zur Anzucht dieser Grasart wurden

0,6 g Saatgut in Kunststofftöpfe von 10 cm Durchmesser ausgesät und bis zu einem Alter von 20 bzw. 30 Tagen kultiviert. Bei der Auswahl der Vergleichspflanzen war neben dem breiten Spektrum in der HF-Anfälligkeit landwirtschaftlicher und gärtnerischer Nutzpflanzen auch deren Eignung für die hier zu untersuchenden Fragen zu berücksichtigen. Die nachfolgend aufgeführten Pflanzenarten erfüllten diese Forderungen: Buschbohne (Phaseolus vulgaris, Sorte Saxa), Mais (Zea Mays, Sorte Inrasil), Futterhirse (Setaria italica, Sorte Sioux), Buschtomaten (Lycopersicon esculentum, Sorte Hoffmann's Rentita) sowie Gladiolen (Gladiolus communis, Sorte Snow Princess und Flower Song). Alle Pflanzen wurden in Null-Erde der Firma Paul Balster (Einheitserdewerk, Unna) kultiviert, die Ernährung erfolgte bei Zwiebelgewächsen durch eine 0,1 %ige, bei Gras und anderen Nutzpflanzen durch eine 0,3 %ige Düngerlösung (Wuxal, 12 4 6 Normal, PHILIPS-DUPHAR GmbH, Düsseldorf).

Die Pflanzenanzucht erfolgte in einer klimatisierten Gewächshauszelle (BOTTLÄNDER, 1966) bei einer Temperatur von 20-22°C, einer relativen Luftfeuchte von 60-70 % und einer Lichtintensität von etwa 40000 Lux; die Lichtperiode betrug 16 Stunden. Als Zusatzbeleuchtung dienten Hochleistungslichtfluter (HQ1-2000 W) der Firma SIEMENS (s. auch VAN HAUT, 1975).

1.2.2 Alter der Versuchspflanzen sowie Zeitpunkt der Probenahme.

Bei den Untersuchungen der Graskultur wurden 28 Töpfe aufgestellt in einem 4 x 7 Quadrat je Kammer exponiert. Je nach Fragestellung betrug das Alter von Lolium

multiflorum zu Versuchsbeginn 20 bzw. 30 Tage. Die Begasungszeit erstreckte sich auf 14 Tage; Proben für die chemischen Pflanzenanalysen wurden alle zwei Tage entnommen. Zu jedem Zeitpunkt der Probenahme wurden von den anfangs 28 Töpfen jeweils 4 Töpfe/Kammer willkürlich nach Zufallstabelle ausgesucht.

Zu Versuchsbeginn betrug das Alter von Buschbohne, Mais und Futterhirse 22-26 Tage, das Alter von Buschtomaten 35 Tage und das von Gladiolen 30 Tage.

Bei der Untersuchung der Reaktionen der Vergleichspflanzen wurden auch 4 Töpfe/Kammer mit Lolium multiflorum im Alter von 30 Tagen exponiert, um die Fluor-Aufnahmerate während des Versuches messen zu können. Während der Versuchszeit von 14 Tagen erfolgten in regelmäßigen Abständen 4-5 Probenahmen von jeweils 4 Vergleichspflanzen/Kammer. Lolium multiflorum wurde erst am Ende der Versuchsperiode geerntet. Um den normalen Fluor-Gehalt der Versuchspflanzen zu bestimmen, wurde zu Beginn des Versuches das Pflanzenmaterial von 10 Gefäßen zur chemischen Analyse gegeben.

Je nach Fragestellung wurden die Untersuchungen entweder in der schon beschriebenen Begasungsanlage oder in Klimakammern (ARNDT et al. 1973) durchgeführt. Im allgemeinen wurden die Pflanzen folgenden Versuchsbedingungen ausgesetzt: Tages- bzw. Nachttemperaturen von 20-22°C bzw. 15-17°C, 70 % relative Luftfeuchte und eine Lichtintensität von 21000 Lux bei einer Lichtperiode von 16 Stunden. Die durch spezielle Fragestellungen bedingten Abweichungen von diesen Verhältnissen sind in den betreffenden Abschnitten angegeben.

1.3 Probenaufbereitung und chemische Pflanzenanalyse

1.3.1 Probenaufbereitung

Nach der Probenahme wurden Lolium multiflorum sowie Vergleichspflanzen abgeschnitten und nach der Methode von SCHOLL et al. (1971) zunächst eine Minute in Leitungswasser gewaschen und anschließend für etwa 30 sec. mit destilliertem Wasser nachgespült. Die Trocknung erfolgte bei 80°C in einem Trockenschrank mit Luftumwälzung. Nach einer Trocknungszeit von 48 Stunden wurden die Proben in einer handelsüblichen elektrischen Kaffeemühle mit Schlagmesser staubfein gemahlen. Zur Aufbewahrung der gemahlten Pflanzensubstanz dienten Rollrand-Pulverröhrchen aus Glas.

1.3.2 Chemische Pflanzenanalyse

Die Bestimmung des Fluorid-Gehaltes im Pflanzenmaterial erfolgte nach dem Verfahren von REUSMANN und WESTPHALEN (1969) unter Verwendung der automatischen Methode von BUCK und REUSMANN (1971). Etwa 1 g getrocknetes und gemahltes Material wurde in einem Muffelofen bei 500°C verascht, mit NaOH aufgeschlossen und anschließend der erkaltete Aufschluß mit Salzsäure und Citronensäure versetzt. Bei einem pH-Wert von 5,7 wurde der Fluorid-Gehalt direkt mit einer ionenspezifischen Elektrode ermittelt.

Die Schwefelbestimmungen wurden nach dem von REUSMANN und WESTPHALEN (1976) entwickelten Verfahren durchgeführt. Etwa 500 mg getrocknetes Pflanzenmaterial werden in einer Wurzschnitt-Bombe mit Na₂O₂ aufgeschlossen. Die erkaltete Schmelze wird nach Lösung im Wasser und Ansäuerung mit Ameisensäure in den Probenehmer eines Autoanalyzers gegeben. Die Lösung wird in einer Mischspirale mit einer

Reduktionslösung aus Unterphosphoriger Säure, Ameisensäure und Jodwasserstoffsäure durchmischt. Zusammen mit Stickstoff durchläuft diese Lösung eine auf 110°C erhitzte Spirale, in der die Reduktion zum Schwefelwasserstoff stattfindet. Dieses Gemisch wird mit einer schwefelsauren Molybdatlösung vermischt. Die Extinktion des dadurch gebildeten Molybdänblau wird in einem Durchflußphotometer bei 578 nm gemessen und durch einen Schreiber registriert.

1.4 Wirkungskriterien

Die durch Luftverunreinigungen bedingten Effekte an den einzelnen Objektgruppen (Mensch, Tier, Pflanze, Materialien) werden mit Hilfe verschiedener Kriterien charakterisiert. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden als Wirkungskriterien neben der Fluor-Anreicherung in der Pflanze und den äußeren Schädigungsmerkmalen die Auswirkungen auf den Gaswechsel und den Zuwachs gewählt.

1.4.1 Fluor-Anreicherung

Die besondere Phytotoxizität von Fluorwasserstoff beruht nicht zuletzt auf seiner ausgeprägten akkumulativen Eigenschaft. Hieraus folgt, daß auch sehr niedrige Außenluftkonzentrationen bei entsprechend langen Einwirkungszeiten erhebliche Pflanzenschäden verursachen können. Die hohen immissionsbedingten Fluor-Anreicherungen bei vergleichsweise geringen Schwankungen in natürlichem F-Gehalt unbeeinflusster Pflanzen bieten gute Voraussetzungen zur Abschätzung der Gefährdung von Pflanzen anhand von Anreicherungswerten.

Nach der Bestimmung des F-Gehaltes in der Pflanzensubstanz wurden die Fluor-Anreicherung und die Fluor-Aufnahmerate verrechnet. Die Fluor-Anreicherung ist der absolute F-Gehalt abzüglich des natürlichen F-Gehaltes pro Einheit Trockensubstanz (TS), ausgedrückt z.B. in ppm Fluor oder mg F/100 g TS. Unter Fluor-Aufnahmerate ist die Fluor-Aufnahme pro Zeiteinheit zu verstehen, ausgedrückt z.B. in $\mu\text{g F/g TS/h}$. Da die Proben in regelmäßigen Abständen während der Versuchszeit entnommen wurden, konnte auch der Verlauf der Fluor-Anreicherung erfaßt werden.

1.4.2 Netto-Assimilation und Dunkelatmung

Der Gaswechsel höherer Pflanzen stellt den primären Stoffwechselfvorgang für die Produktion organischer Substanz und damit für die Wuchs- und Ertragsleistung dar. Da Auswirkungen auf den Gaswechsel der Pflanzen auch bedeutend für ihre ökonomische und ökologische Nutzungseigenschaft sind, ist der Gaswechsel als Kriterium zur Erfassung von Pflanzenreaktionen in Abhängigkeit von der Fluor-Anreicherung von besonderem Interesse.

Während der gesamten Versuchsdauer wurden CO_2 -Aufnahme (Photosynthese) und CO_2 -Abgabe (Respiration oder Dunkelatmung) mit einem UNOR-Gerät der Firma MAIHAK kontinuierlich im Absolutverfahren erfaßt. Dieses Gerät funktioniert nach dem Prinzip der repräsentativen Absorption von Infrarotlichtstrahlen durch CO_2 -Moleküle in der Luft. Das aus der Konzentrationsdifferenz im CO_2 -Gehalt der zu- und abströmenden Luft und dem Luftdurchsatz gebildete Produkt ließ eine Berechnung des absoluten CO_2 -Umsatzes in mg $\text{CO}_2/\text{g TS/h}$ zu.

Der Luftdurchsatz durch die Kammern wurde so gewählt, daß einerseits keine CO_2 -Verarmung vorkommen konnte, andererseits noch meßbare Differenzen im CO_2 -Gehalt der Zu- und Abluft vorlagen. Unter Beachtung der photosynthetischen Leistung der verschiedenen Pflanzenarten entsprach ein etwa 40facher Luftwechsel in der Stunde diesen Forderungen. Um das bodenbürtige CO_2 zu berücksichtigen, wurde die CO_2 -Abgabe des Bodens an Gefäßen mit abgeschnittenen Pflanzen erfaßt.

1.4.3 Zuwachs- und Qualitätsfeststellungen

Eine Einstufung der Pflanzenarten nach ihrer Empfindlichkeit dient im vorliegenden Falle als Unterlage für Gefährdungsprognosen im praktischen Immissionsschutz. Als Kriterien zur Ableitung der Empfindlichkeit der Versuchspflanzen gegenüber Fluorwasserstoff wurden Pflanzenwachstum, Pflanzenertrag sowie äußere Schädigungsmerkmale herangezogen. Zur Bestimmung des Wachstums wurden Pflanzenhöhe und Frischgewicht gemessen. Das Frischgewicht wurde vor dem Waschen bestimmt, um mögliche Verfälschungen der Meßwerte auszuschließen. Grundlage für Ertragsfeststellungen war die Trockensubstanzbildung. Die Schädigungsmerkmale in Form von Nekrosen und Chlorosen dienten zur Ermittlung möglicher Qualitätsminderungen in der äußeren Beschaffenheit.

2. Untersuchungen und ihre Ergebnisse

2.1 Wirkungen verschieden hoher HF-Konzentrationen auf Lolium multiflorum

Das Verhalten von Lolium multiflorum unter verschieden hohen HF-Konzentrationen wurde anhand von Zuwachs- und Ertragsbestimmungen, Feststellungen über Änderungen in der äußeren Beschaffenheit, CO₂-Gaswechselfmessungen sowie über die F-Anreicherung in der Pflanzensubstanz geprüft. Um die alters- und jahreszeitabhängigen Reaktionen zu ermitteln, wurden Untersuchungen an 20 und 30 Tage alten Pflanzen im Frühjahr, Frühsommer und Hochsommer durchgeführt, und zwar bei Konzentrationen zwischen 1,6 und 23,6 µg HF/m³ Luft. Die benutzten HF-Konzentrationen sind mit dem Ziel eingestellt worden, das zu erwartende Resistenzspektrum der Versuchspflanzen einigermaßen repräsentativ zu erfassen.

2.1.1 Sichtbare Schädigungen sowie Auswirkungen auf die Wuchs- und Ertragsleistung

Eine Analyse der in der Literatur vorliegenden Ergebnisse ergibt, daß die einzelnen Pflanzenarten unter verschieden hohen HF-Konzentrationen Schädigungen in Form von Blattchlorosen und -nekrosen sowie Wuchsminderungen aufweisen, die, wie oben näher dargelegt, die Fluor-Aufnahme und den Gaswechsel der Pflanze beeinflussen können. Es war daher zu prüfen, welche HF-Konzentrationen solche Reaktionen bei Lolium multiflorum auslösen.

Lolium multiflorum erwies sich als recht widerstandsfähig. Selbst bei Begasungen mit der höchsten Konzen-

tration von $23,6 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft traten weder Blattchlorosen noch -nekrosen auf. Es zeigten sich auch keine anderen Änderungen in der äußeren Beschaffenheit, wie nichtchlorotische Farbveränderungen, oder Unterschiede im Bestockungsgrad.

Signifikante Auswirkungen der HF-Begasungen auf das Frischgewicht, die Trockensubstanz und die Pflanzenhöhe wurden nicht festgestellt ($P > 0,05$). Deutlich waren indessen die jahreszeit- und altersbedingten Schwankungen im Wachstum wie Tabelle 1 und Abbildung 4 (vgl. hierzu auch Tabelle 1-6 im Anhang) verdeutlichen. Im Frühjahr wiesen die 30 Tage alten Pflanzen mit einer Zuwachsleistung von $0,25 \text{ g TS/Tag}$ einen etwas höheren Ertrag auf, während im Früh- und Hochsommer die 20 Tage alten Pflanzen mit Zuwachsraten von $0,22$ bzw. $0,14 \text{ g TS/Tag}$ die stärkere Zuwachsleistung zeigten.

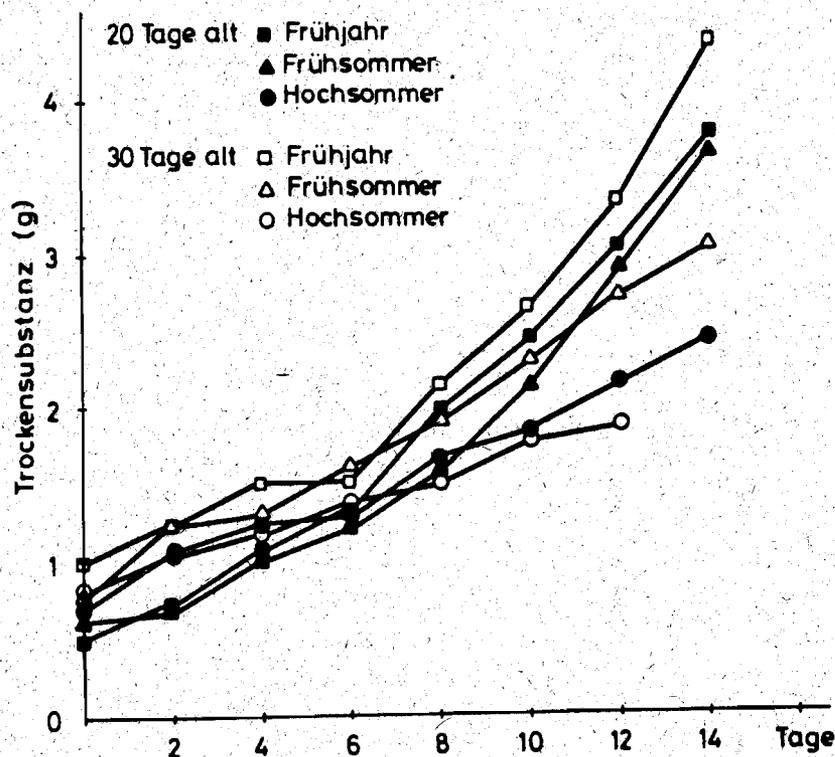


Abb. 4 Trockensubstanzertrag von Lolium multiflorum in Abhängigkeit von Pflanzenalter und Jahreszeit

Tabelle 1. Wuchs- und Ertragsleistung von Lolium multiflorum in Abhängigkeit von Pflanzenalter, Jahreszeit und HF-Konzentration

Pflanzenalter	20 Tage			30 Tage			
Jahreszeit	Frühjahr	Frühsommer	Hochsommer	Frühjahr	Frühsommer	Hochsommer	
Konzentration ($\mu\text{g HF/m}^3$)	4,4	19,8	1,6	4,0	23,6	19,6	
Wirkungskriterien	Trockensubstanz (g/Tag)						
	Kontrolle	0,24 \pm 0,09	0,22 \pm 0,14	0,14 \pm 0,08	0,25 \pm 0,17	0,14 \pm 0,08	0,10 \pm 0,04
	Begast	0,24 \pm 0,11	0,22 \pm 0,13	0,14 \pm 0,07	0,25 \pm 0,32	0,15 \pm 0,09	0,10 \pm 0,03
	Frischgewicht (g/Tag)						
	Kontrolle	----	1,70 \pm 0,81	0,85 \pm 0,61	1,89 \pm 0,53	1,09 \pm 0,54	0,36 \pm 0,27
	Begast	----	1,68 \pm 0,81	0,85 \pm 0,73	1,89 \pm 0,58	1,12 \pm 0,74	0,33 \pm 0,30
	Pflanzenhöhe (cm/Tag)						
	Kontrolle	1,46 \pm 0,55	1,59 \pm 0,84	1,00 \pm 0,49	1,55 \pm 0,28	1,30 \pm 0,29	0,90 \pm 0,56
	Begast	1,49 \pm 0,52	1,61 \pm 0,73	0,99 \pm 0,46	1,55 \pm 0,27	1,33 \pm 0,40	0,90 \pm 0,40

Bei beiden Altersgruppen ist ein Abfall in der Stoffproduktion vom Frühjahr zum Hochsommer hin festzustellen, wobei noch erwähnenswerte Unterschiede zwischen den beiden Altersstadien bestehen. Während die Trockensubstanzbildung bei den 30 Tage alten Pflanzen im Hochsommer auf etwa die Hälfte des Frühjahrswertes abfällt, ist bei den 20 Tage alten Pflanzen diese Verminderung um etwa ein Drittel deutlich geringer.

2.1.2 Fluor-Anreicherung in der Pflanzensubstanz

Zur Ermittlung der F-Anreicherung in der Graskultur wurden während der jeweils 14-tägigen Expositionszeit alle zwei Tage je 4 Töpfe entnommen und der Grasaufwuchs auf den F-Gehalt hin analysiert (vergl. hierzu die Ausführungen unter 1.2.2, 1.3.2 sowie 1.4.1).

Die Fluor-Aufnahme, d.h. die Anreicherung über den natürlichen Gehalt hinaus, wies deutlich jahreszeit- und altersbedingte Unterschiede auf. Die 20 Tage alten Pflanzen reicherten unter sonst vergleichbaren Bedingungen stets mehr Fluor an als die 30 Tage alten Pflanzen (Abb. 5). Beispielsweise ergaben Begasungen der 20 Tage alten Pflanzen mit $19,8 \mu\text{g HF}/\text{m}^3$ Luft im Frühsommer Anreicherungen bis zu 765 ppm in der Trockensubstanz, während die 30 Tage alten Pflanzen unter $23,6 \mu\text{g HF}/\text{m}^3$ Luft nur 528 ppm F aufnahmen.

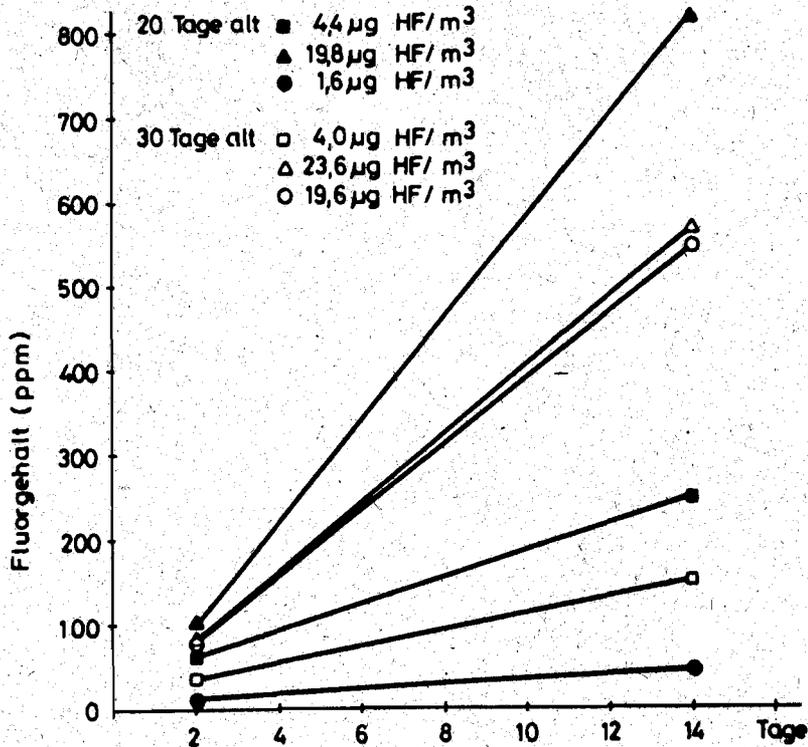


Abb. 5 Aufnahme von Fluor bei Lolium multiflorum in Abhängigkeit von Pflanzenalter und HF-Konzentration

Sichtbare Schädigungen oder Wachsminderungen traten in all diesen Versuchen mit Lolium multiflorum nicht auf. Diese Grasart blieb auch bei Konzentrationen, die an anderen Pflanzenarten starke Schädigungen verursachen (NAS 1971, WEINSTEIN 1977), noch funktionstüchtig.

Abb. 6 verdeutlicht die Abhängigkeit der F-Aufnahme von dem Pflanzenalter und der HF-Konzentration.

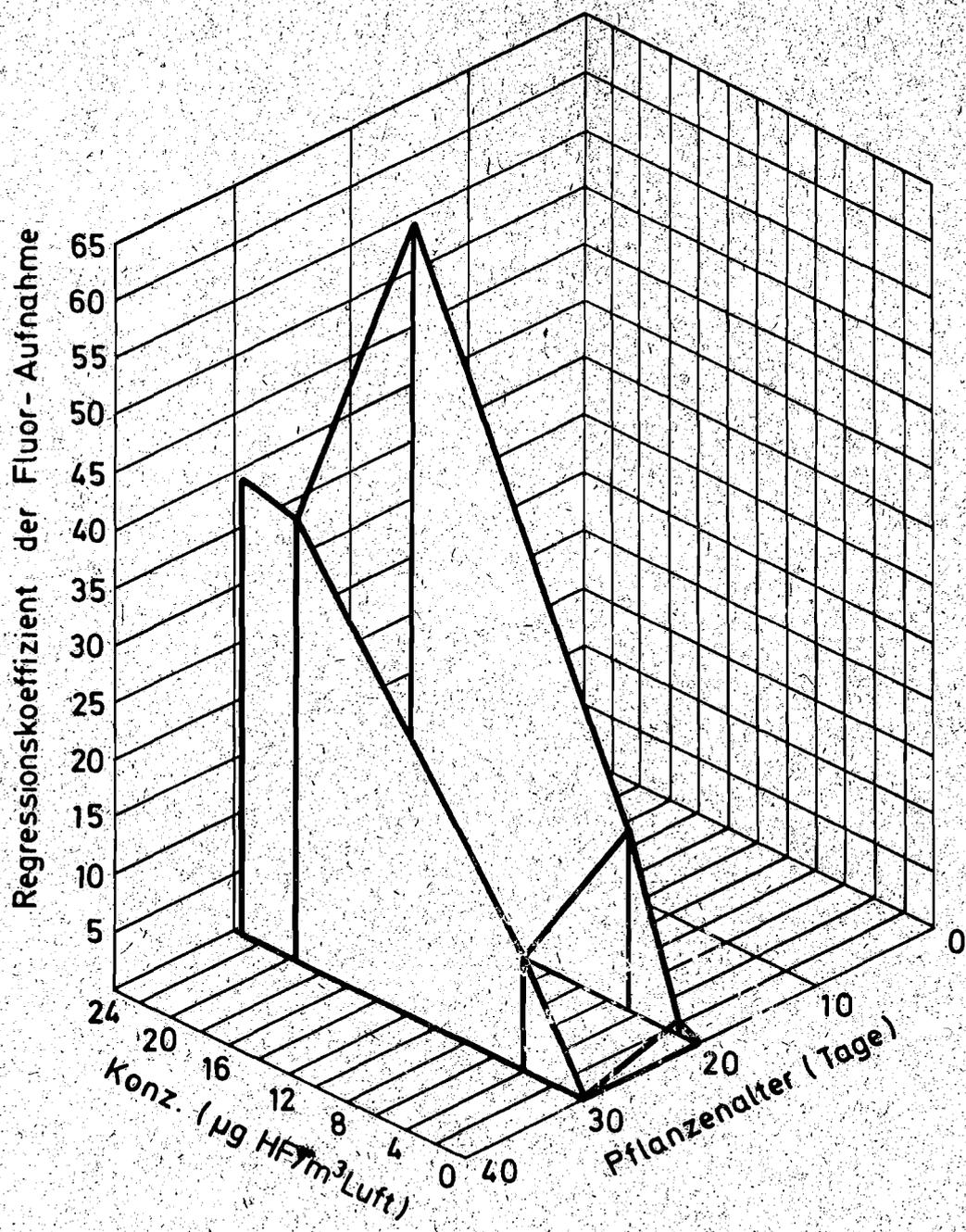


Abb. 6 Abhängigkeit zwischen Pflanzentalter, HF-Konzentration und Fluor-Aufnahme bei Lolium multiflorum

Unter der F-Aufnahme ist die tägliche Fluor-Anreicherung, gebildet aus der Differenz im F-Gehalt von Lolium multiflorum bei Versuchsbeginn bzw. -ende, dividiert durch die Zahl der Expositionstage, zu verstehen. In Tabelle 2 sind unter R_m die so ermittelten F-Aufnahmeraten für die gewählten HF-Konzentrationen beider Altersgruppen dargestellt. Die Aufnahmeraten unter R_e wurden aus der Steigung der Ausgleichsgeraden der Einzelwerte, die über eine Zeitspanne von 14 Tagen alle zwei Tage gemessen wurden, errechnet. Ein Vergleich der nach diesen beiden Methoden ermittelten Werte ergibt eine auffallend gute Übereinstimmung und weist auf die Linearität in der Fluor-Aufnahme während der 14-tägigen Expositionsdauer hin.

Tabelle 2. Vergleich zwischen gemessenen (R_m) und errechneten (R_e) Fluor-Aufnahmeraten bei Lolium multiflorum in Abhängigkeit von Pflanzenalter und HF-Konzentration

Konzentration $\mu\text{g HF/m}^3$ Luft	R_m $\mu\text{g F/g TS} \cdot \text{Tag}$	R_e $\mu\text{g F/g TS} \cdot \text{Tag}$
20 Tage alte Pflanzen		
1,6	1,64	1,72
4,4	16,78	18,74
19,8	54,69	59,47
30 Tage alte Pflanzen		
4,0	10,62	11,30
19,6	41,27	39,92
23,6	37,71	42,73

Tabelle 3 enthält die Regressionen der F-Aufnahme, deren Korrelationskoeffizienten sowie F-Werte einer Linearitäts-

Tabelle 3. Regressionen der Fluor-Aufnahme bei Lolium multiflorum in Abhängigkeit von Pflanzenalter und HF-Konzentration.

Konzentration ($\mu\text{g HF/m}^3$)	Regression der Fluor-Aufnahme (\pm Standardabweichung)	Korrelations- koeffizient	Prüfung auf Linearität +)
20 Tage alte Pflanzen			
1,6	$y = 8,51(\pm 0,11) + 1,11(\pm 0,03)x$	$r = 0,93$	$F = 1,84 (P < 0,001)$
4,4	$y = 30,05(\pm 2,17) + 16,59(\pm 0,54)x$	$r = 0,90$	$F = 2,66 (P < 0,001)$
19,8	$y = -7,38(\pm 5,66) + 60,00(\pm 1,42)x$	$r = 0,97$	$F = 8,62 (P > 0,05)$ $F = 5,73 (P < 0,001)^{++})$
30 Tage alte Pflanzen			
4,0	$y = 14,08(\pm 1,14) + 10,30(\pm 0,28)x$	$r = 0,94$	$F = 3,41 (P < 0,001)$
19,6	$y = 8,60(\pm 1,89) + 39,20(\pm 0,54)x$	$r = 0,96$	$F = 0,75 (P < 0,001)^{+++})$
23,6	$y = 0,78(\pm 5,97) + 42,68(\pm 1,47)x$	$r = 0,92$	$F = 3,97 (P < 0,001)$

+) $F(6,27;0,001) = 5,31$

++) Linearitätsprüfung nach dem 2. Expositionstag ($F(4,18;0,001) = 7,46$)

+++) Fluor-Aufnahme über 12 Tage ($F(5,23;0,001) = 6,08$)

prüfung. Die sehr gute Anpassung der Einzelwerte an die Ausgleichsgerade, wie sie in den hoch signifikanten ($P < 0,001$) Korrelationskoeffizienten zum Ausdruck kommt, spricht auch dafür, daß die F-Aufnahme bei Lolium multiflorum über 14 Tage linear verläuft. Eine gesicherte Abweichung ($P > 0,05$) von Linearität konnte in nur einem Fall nachgewiesen werden. Die 20 Tage alten Pflanzen unter der sehr hohen Konzentration von $19,8 \mu\text{g HF}/\text{m}^3$ Luft akklimatisierten sich offenbar nur langsam an die Versuchsbedingungen. Sie nahmen bis zum zweiten Tag der Exposition weitaus weniger Fluor auf als bei einem angenommenen linearen Verlauf der F-Aufnahme zu erwarten war. Nach diesem Zeitpunkt jedoch verlief die F-Aufnahme bis zum Versuchsende linear ($P < 0,001$). Die Steigung der Regressionen ist stark vom Pflanzenalter abhängig, ein weiterer Hinweis auf die Notwendigkeit, das Pflanzenalter bei der Anwendung dieses standardisierten Verfahrens zu beachten.

2.1.3 Zusammenhänge zwischen Fluor-Aufnahme, Dunkelatmung und Photosyntheseleistung

CO_2 -Gaswechselfmessungen können als Unterlage für fluorbedingte Gefährdungsprognosen dienen; sie lassen nämlich einerseits direkte Schlüsse auf mögliche Wuchsminderungen zu, andererseits indirekte, in dem sie Hinweise auf Ände-

rungen in biochemischen Abläufen liefern. Ebenso wie bei der äußeren Beschaffenheit und der Wuchsleistung waren bei den CO₂-Gaswechselfmessungen keine signifikanten fluorbedingten Auswirkungen weder auf Photosynthese noch auf Respiration von Lolium multiflorum festzustellen. Der unbeeinflusste Gaswechsel auch unter der höchsten Konzentration von 23,6 ug HF/m³ Luft weist die recht hohe Resistenz von Lolium multiflorum gegenüber HF aus.

Ähnlich wie bei der Ertragsleistung und der F-Anreicherung wurden auch im Gaswechsel deutliche jahreszeit- und altersbedingte Unterschiede gefunden. Besonders hervorzuheben ist der jahreszeitbedingte Rückgang in der Photosyntheseleistung in beiden Altersgruppen (Abb. 7); entsprechende Auswirkungen zeigten sich in den Trockensubstanzwerten (vergl. Abb. 4). Bekanntlich wird die Wuchsleistung einerseits von den inneren Eigenschaften der Pflanzen, andererseits von den äußeren Bedingungen wie Boden und Klima bestimmt. Wenn, wie hier, die äußeren Faktoren konstant gehalten sind, bestimmen allein innere Faktoren die Unterschiede in der Ertragsleistung. Dieser jahreszeitbedingte Rückgang in der Photosyntheseleistung stellt also eine normale Phase im vegetativen Entwicklungsablauf dar.

Während der jeweiligen Versuchszeit von zwei Wochen wurden alle zwei Tage vier Töpfe für die chemische Analyse entnommen und die übriggebliebenen Töpfe auseinandergestellt, so daß die Relationen zwischen Blattfläche und Luftströmung, wie auch die allgemeinen räumlichen Bedingungen für das Wachstum, günstiger wurden. Dadurch bedingt, steigt die Photosyntheseleistung ebenso wie die Trockensubstanzbildung zum Versuchsende an.

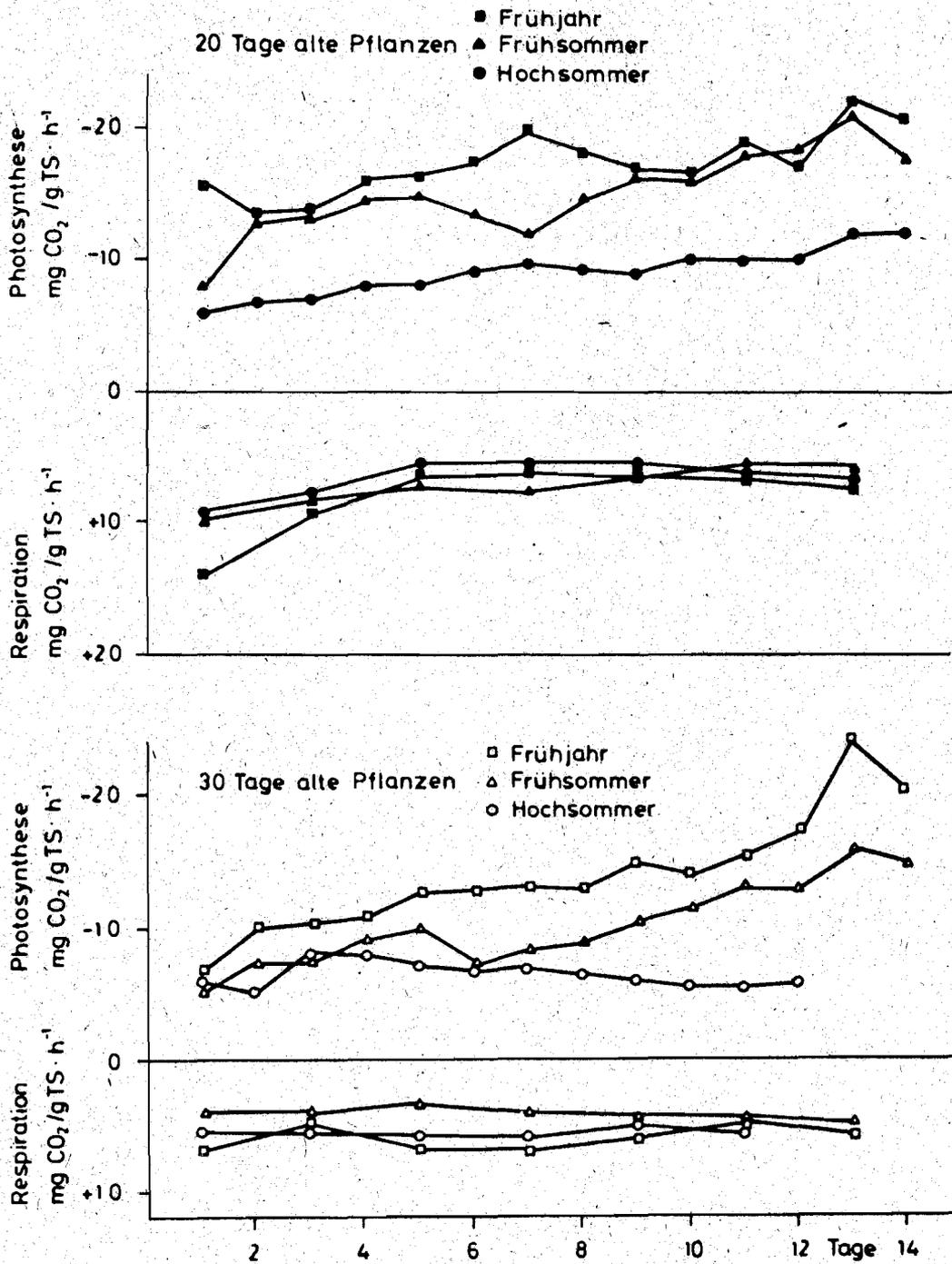


Abb. 7 Photosynthese und Respiration von Lolium multiflorum in Abhängigkeit von Pflanzenalter und Jahreszeit

2.2 Wirkung verschieden hoher HF-Konzentrationen auf andere Nutzpflanzen

Das standardisierte Graskulturverfahren wird zur Überwachung von Immissionsgebieten eingesetzt, wobei die Fluor-Aufnahmerate in der Graskultur auch als Kriterium zur Ermittlung der Gefährdung der übrigen Vegetation dient. Es war daher zu prüfen, welche Beziehungen zwischen der F-Anreicherung in Lolium multiflorum und der Reaktionen anderer Pflanzenarten bestehen. In Begasungsversuchen wurde das Verhalten von Buschbohne, Mais, Futterhirse, Buschtomaten sowie Gladiolen unter verschieden hohen HF-Konzentrationen durch Zuwachs- und Ertragsbestimmungen, Feststellungen von Änderungen in der äußeren Beschaffenheit, CO₂-Gaswechsellmessungen sowie über die F-Anreicherung in der Pflanzensubstanz untersucht. Gleichzeitig wurde die Fluor-Aufnahme von Lolium multiflorum ermittelt.

2.2.1 Buschbohnen

Die Reaktionen von Buschbohnen (Phaseolus vulgaris, Sorte Saxa) wurden unter HF-Konzentrationen von 4,13 bzw. 23,5 µg HF/m³ Luft untersucht. Begasungen mit 4,13 µg HF/m³ Luft ergaben Anreicherungen von rund 115 ppm F in der Trockensubstanz (TS), während Pflanzen unter 23,5 µg HF/m³ Luft bis zu 970 ppm F aufnahmen. Gleichzeitig begaste Lolium-Pflanzen wiesen Anreicherungen von 250 bzw. 935 ppm F in der TS auf (Abb. 8). Die F-Anreicherung in der Graskultur zeigte hierbei wie in den nachfolgenden Versuchen gleichhohe Werte wie in den unter 2.1 beschriebenen Untersuchungen.

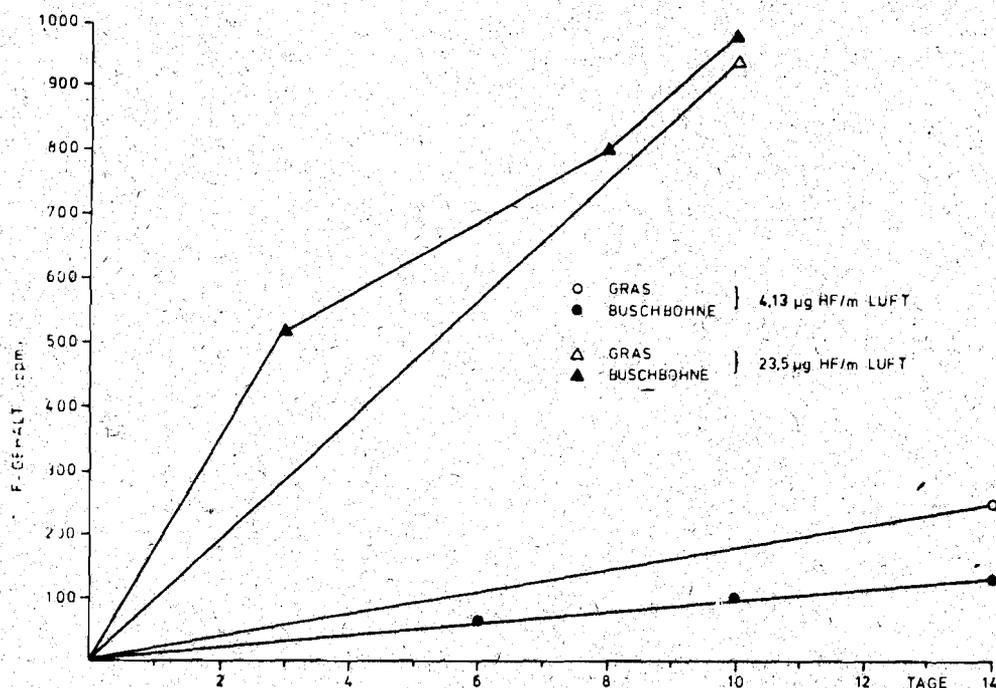


Abb. 8 Aufnahme von Fluor bei Buschbohne und Lolium multiflorum in Abhängigkeit von der HF-Konzentration

Die F-Aufnahme von Buschbohnen unter $4,13 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft erwies sich auf Grund der nur sehr geringen Streuung der Einzelwerte um die Ausgleichsgerade ($r = 0,99$) als linear über die Versuchsdauer von 14 Tage. Unter der höheren Konzentration dagegen stieg die F-Aufnahme am ersten Tag nach Begasungsbeginn bereits auf 520 ppm.F an, um danach schwächer zu werden (s. auch Tabelle 7-8 im Anhang).

Sichtbare Schädigungen oder signifikante Wachsminderungen traten unter beiden Konzentrationen nicht auf. Ebenso wie bei der äußeren Beschaffenheit und der Wuchsleistung wurden auch im CO_2 -Gaswechsel keine signifikanten fluorbedingten Auswirkungen festgestellt, weder in der Photosynthese noch in der Respiration.

Die Buschbohne erwies sich als sehr widerstandsfähig und blieb auch bei den hier ermittelten hohen F-Anreicherungen noch voll funktionstüchtig.

2.2.2 Buschtomaten

Tomaten (Lycopersicon esculentum, Sorte Hoffmann's Rentita) wurden gleichzeitig mit Lolium multiflorum bei einer HF-Konzentration von $21,3 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft begast. Nach 12-tägiger Begasung betrug die F-Anreicherung bei Tomaten etwa 480 und bei Lolium multiflorum etwa 750 ppm F in der TS. Die F-Aufnahme zeigte ebenfalls nur sehr geringe Streuungen in den Einzelwerten um die Ausgleichgerade ($r = 0,99$) und verlief linear während der gesamten Versuchszeit (Abb. 9). Sichtbare Schädigungen traten ebensowenig auf wie signifikante Änderungen in der Wuchsleistung oder im CO_2 -Gaswechsel (Tabelle 9 im Anhang).

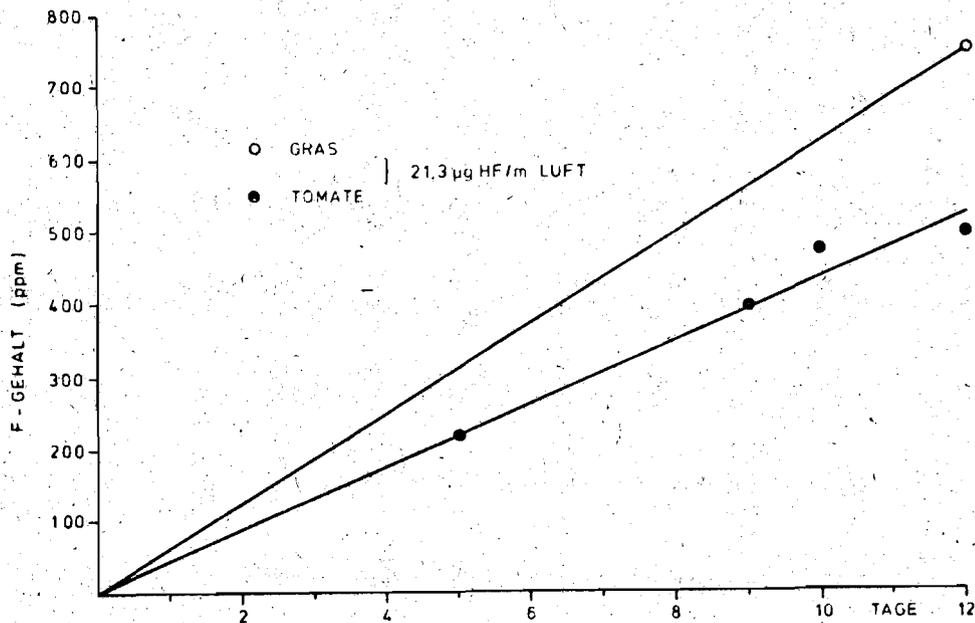


Abb. 9 Aufnahme von Fluor bei Tomate und Lolium multiflorum in Abhängigkeit von der HF-Konzentration

2.2.3 Mais

Bei der Untersuchung von Mais (Zea mays, Sorte Inrasil) wurden die Versuchspflanzen mit HF-Konzentrationen von 3,95 bzw. 22,8 $\mu\text{g HF/m}^3$ Luft begast. Die Fluor-Anreicherung unter 3,95 $\mu\text{g HF/m}^3$ Luft betrug 80 ppm F in Mais und 240 ppm F in Lolium. Unter der höheren Konzentration erreichte die F-Anreicherung rund 260 ppm F bzw. 810 ppm F in der TS. In beiden Fällen verlief die Fluor-Aufnahme während der gesamten Einwirkungszeit linear, wobei eine bessere Anpassung der Einzelwerte an die Ausgleichsgerade bei 22,8 $\mu\text{g HF/m}^3$ Luft ($r = 0,99$) als bei 3,95 $\mu\text{g HF/m}^3$ Luft ($r = 0,93$) festgestellt wurde (Abb. 10).

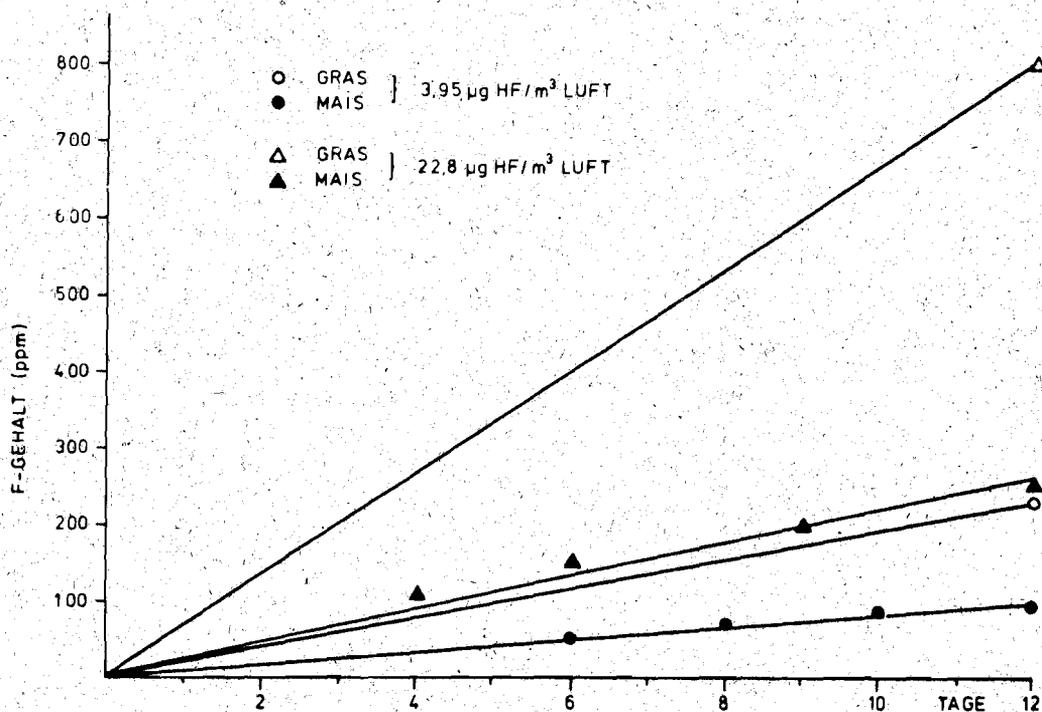


Abb. 10 Aufnahme von Fluor bei Mais und Lolium multiflorum in Abhängigkeit von der HF-Konzentration

Unter der niedrigeren Konzentration traten keine sichtbaren Schädigungen auf. Die Pflanzen unter $22,8 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft dagegen zeigten erste Chlorosen nach 4-tägiger Begasung bei einem F-Gehalt von 103 ppm F in der TS und Nekrosen an den Blattspitzen nach 9-tägiger Einwirkung bei einem F-Gehalt von 200 ppm F in der TS. Am Ende des Versuches waren etwa 5 % der Blattfläche nekrotisiert (260 ppm F in der TS).

Auf Grund der hohen Streuung der Einzelwerte ließen sich keine signifikanten Unterschiede in der Wachstumsleistung nachweisen, obgleich sowohl das Frischgewicht als auch die Trockensubstanzbildung der begasten Pflanzen deutlich vermindert war (s. Tabellen 10 - 11 im Anhang). Bei den CO_2 -Gaswechselfmessungen zeigten die Pflanzen unter $3,95 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft eine zunehmende Verminderung der Photosyntheseleistung und der Respiration bis zu einem F-Gehalt von 50 ppm in der TS am sechsten Tag nach Beginn der Begasung (Abb. 11). Danach stieg die Photosyntheseleistung leicht an und schwankte am Ende des Versuches bei einem F-Gehalt von 90 ppm F in der TS um den Wert der unbehandelten Kontrolle. Die Respiration wurde vergleichsweise stärker stimuliert und war am Ende des Versuches um 20 % höher als die der Kontrollpflanzen.

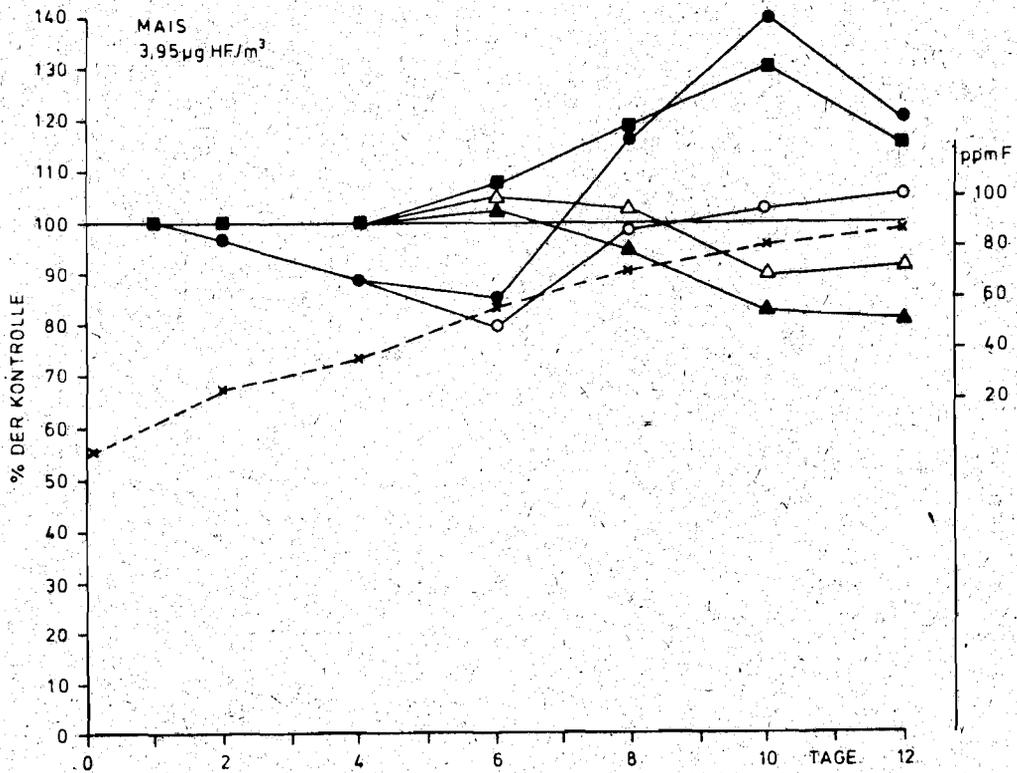


Abb. 11 Einfluß des Fluor-Gehaltes auf den CO_2 -Gaswechsel sowie das Pflanzenwachstum von Mais bei $3,95 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft (x - - x Fluor-Gehalt, o - - o Photosynthese, ● - - ● Respiration, Δ - - Δ Frischgewicht, ▲ - - ▲ Trockensubstanz, ■ - - ■ Relative Veratmung)

Zur Prüfung der Frage, ob diese Änderungen im CO_2 -Gaswechsel Rückschlüsse auf die Wachstumsleistung der begasteten Pflanzen zulassen, wurde zunächst das Verhältnis aus Respiration und Photosynthese sowohl für die begasteten als auch für die nicht begasteten Pflanzen bestimmt. Aus diesen Relationen wurde ein Quotient gebildet, der die Veratmungsintensität der begasteten im Vergleich zu der nicht begasteten Pflanzen verdeutlicht. Bei den mit $3,95 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft behandelten Pflanzen wurde nach 6-tägiger Begasung eine Zunahme dieser relativen Veratmung festgestellt, die die stärkere Veratmung bei den

begasten Pflanzen erkennen läßt, eine Reaktion, die sich in der Wachstumsleistung widerspiegelt.

Photosynthese und Respiration der Pflanzen unter $22,8 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft zeigten analog zu den mit $3,95 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft behandelten einen gleichsinnigen Kurvenverlauf bis zu 100 ppm F in der TS (Abb. 12). Wachstumsleistung und relative Veratmung wiesen ebenfalls vergleichbare Werte unter beiden Konzentrationsstufen auf. Mit steigenden F-Gehalten oberhalb von 100 ppm F war keine weitere Veränderung im CO_2 -Gaswechsel festzustellen.

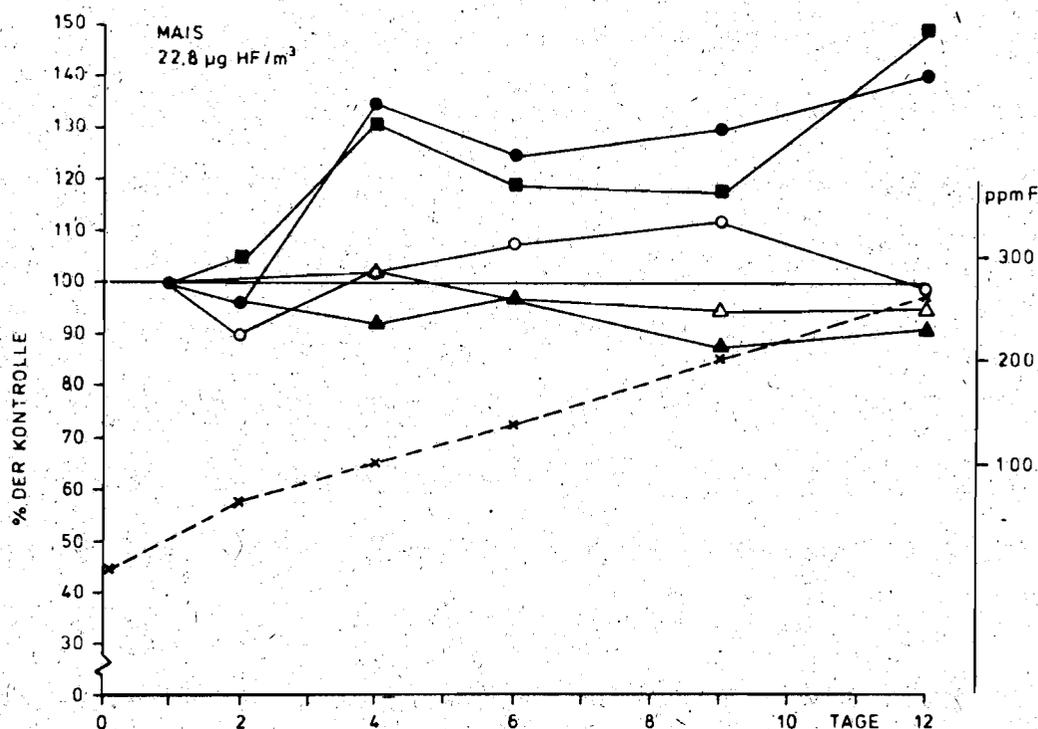


Abb. 12 Einfluß des Fluor-Gehaltes auf den CO_2 -Gaswechsel sowie das Pflanzenwachstum von Mais bei $22,8 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft (x-x Fluor-Gehalt, o-o Photosynthese, ●-● Respiration, Δ-Δ Frischgewicht, ▲-▲ Trockensubstanz, ■-■ Relative Veratmung)

2.2.4 Gladiolen

Gladiolen (Gladiolus communis, Sorte Flower Song und Snow Princess) wurden bei einer HF-Konzentration von $0,67 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft begast. Nach 12-tägiger Begasung betrug die F-Anreicherung bei Flower Song etwa 4 ppm F, bei Snow Princess rund 7 ppm in der TS (Abb. 13). Die Fluor-Aufnahme verlief in beiden Fällen während der gesamten Begasungszeit linear, wobei die Streuung der Einzelwerte um die Ausgleichsgerade bei Flower Song geringer war ($r = 0,99$) als bei Snow Princess ($r = 0,94$).

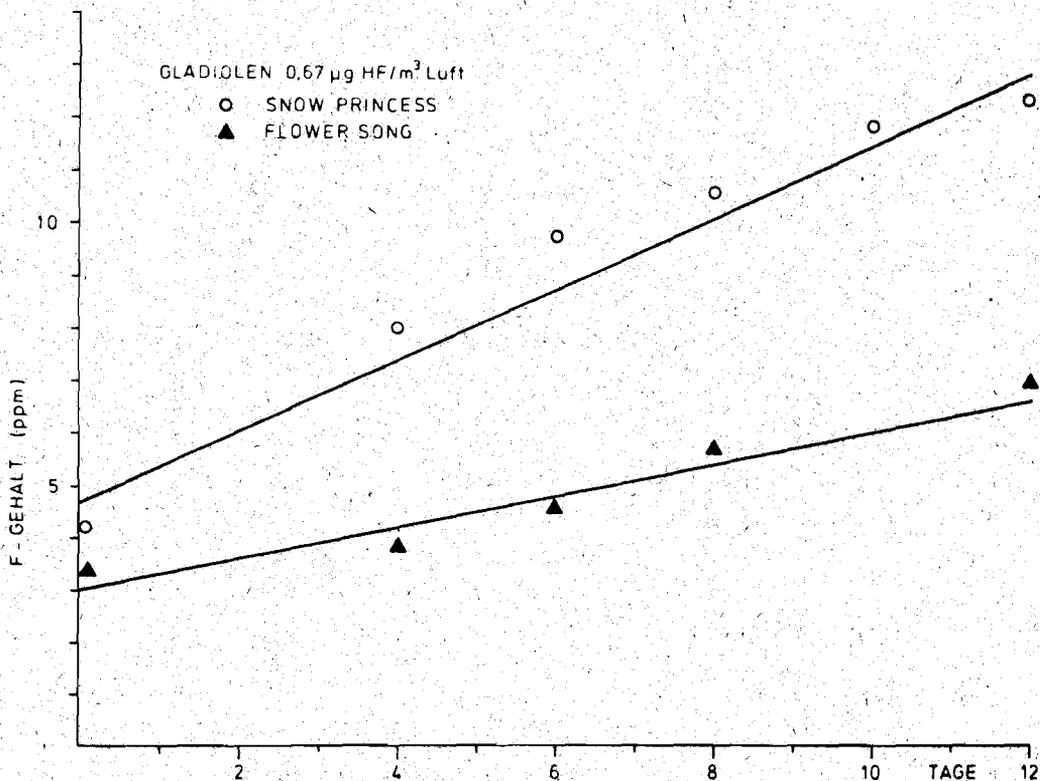


Abb. 13 Sortenabhängigkeit der Fluor-Aufnahme von Gladiolen

Flower Song zeigte erste Chlorosen nach 4-tägiger Begasung bei einem F-Gehalt von 3,8 ppm F in der TS und Blattspitzennekrosen nach 6-tägiger Begasung bei einem F-Gehalt von 4,5 ppm F in der TS. Am Ende des Versuches waren etwa 10 % der Blattfläche nekrotisiert; der F-Gehalt betrug 7,5 ppm F. An Snow Princess wurden nach 3-tägiger Einwirkung bei einem F-Gehalt von rund 8 ppm in der TS die ersten Chlorosen festgestellt. Blattspitzennekrosen traten nach 6-tägiger Begasung bei einem F-Gehalt von 9,8 ppm in der TS auf. Am Ende des Versuches waren ebenfalls 10 % der Blattfläche nekrotisiert bei einem F-Gehalt von 12,1 ppm F in der TS.

Die Trockensubstanzbildung von Flower Song wurde bereits nach 6-tägiger Begasung signifikant vermindert ($P < 0,05$). Diese Verminderung war am Ende des Versuches hoch signifikant ($P < 0,001$). Bei Snow Princess dagegen trat eine gesicherte Wachsminderung ($P < 0,05$) erst nach 10-tägiger Einwirkung auf (s. Tabellen 12 - 13 im Anhang).

Im CO_2 -Gaswechsel zeigte Snow Princess im letzten Versuchsdrittel deutliche Wirkungen (Abb. 14). Die Photosyntheseleistung fiel nach 8-tägiger Begasung bis auf nahezu 50 % des Kontrollwertes ab. Als Folge der vergleichsweise geringeren Verminderung der Respiration erhöhte sich die relative Veratmung der behandelten Pflanzen um 60 %.

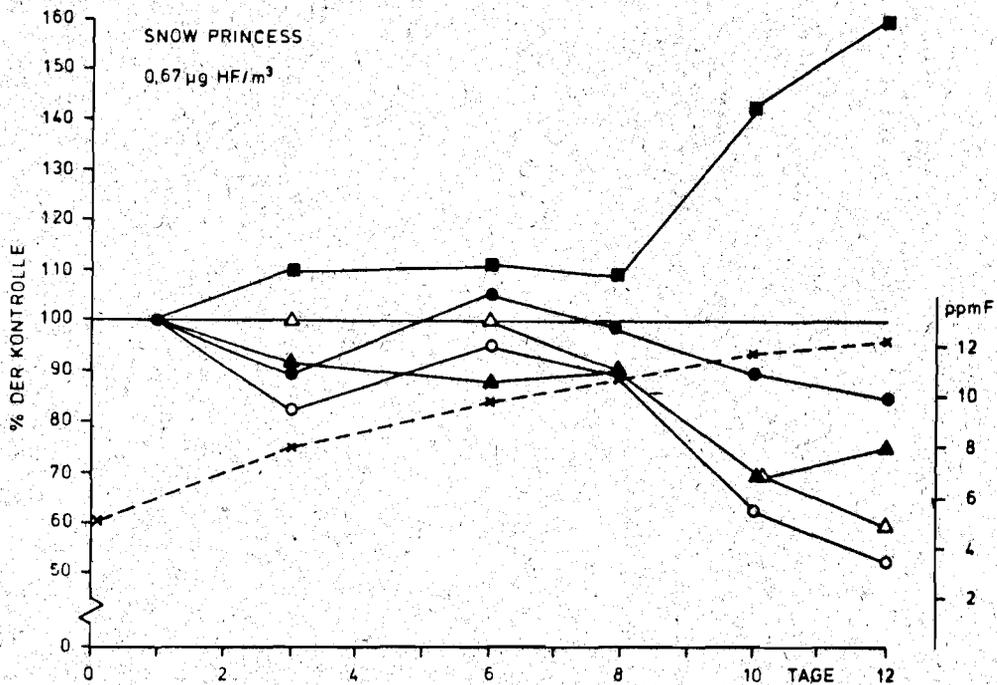


Abb. 14 Einfluß des Fluor-Gehaltes auf den CO₂-Gas wechsel sowie das Pflanzenwachstum von Gladiolen der Sorte Snow Princess bei 0,67 µg HF/m³ Luft (x-x Fluor-Gehalt, o-o Photosynthese, ●-● Respiration, Δ-Δ Frischgewicht, ▲-▲ Trocken- substanz, ■-■ Relative Veratmung)

Flower Song dagegen zeigte zunächst eine Stimulation sowohl der Photosynthese als auch der Respiration (Abb. 15). Die relative Veratmung war um etwa 15% erhöht. Hiernach wurde die Photosyntheseleistung vermindert, während die Respiration um den Kontrollwert schwankte. Gegen Versuchsende verschob sich die Relation der Respiration zur Photosynthese sehr stark und führte zu der weiteren Verminderung der Wuchsleistung.

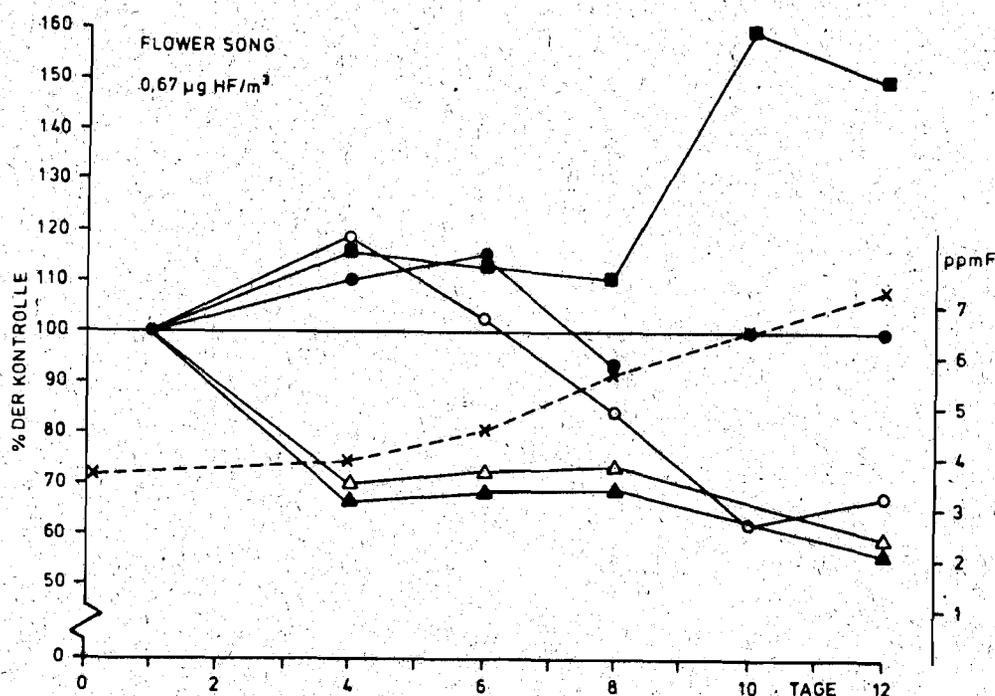


Abb. 15 Einfluß des Fluor-Gehaltes auf den CO₂-Gaswechsel sowie das Pflanzenwachstum von Gladiolen der Sorte Flower Song bei 0,67 µg HF/m³ Luft (x-x Fluor-Gehalt, o-o Photosynthese, ●-● Respiration, △-△ Frischgewicht, ▲-▲ Trocken-substanz, ■-■ Relative Veratmung)

2.2.5 Futterhirse

Die Reaktionen von Futterhirse (Setaria italica, Sorte Sioux) wurden unter HF-Konzentrationen von 22,5 bzw. 32,3 µg HF/m³ Luft untersucht. Wie aus Abbildung 16 hervorgeht, reicherte sich Fluor unter der Konzentration von 22,5 µg HF/m³ Luft auf 440 ppm F bei Hirse bzw. 780 ppm F bei Lolium an; unter der Konzentration von 32,3 µg HF/m³ Luft betragen die entsprechenden Werte 500 bzw. 1150 ppm F. Im Gegensatz zu den anderen untersuchten Pflanzenarten war die F-Aufnahme bei Hirse nicht linear, sie schwächte sich vielmehr gegen Versuchsende ab (Abb. 16).

Weder sichtbare Schädigungen noch signifikante Unterschiede in der Wuchsleistung wurden festgestellt.

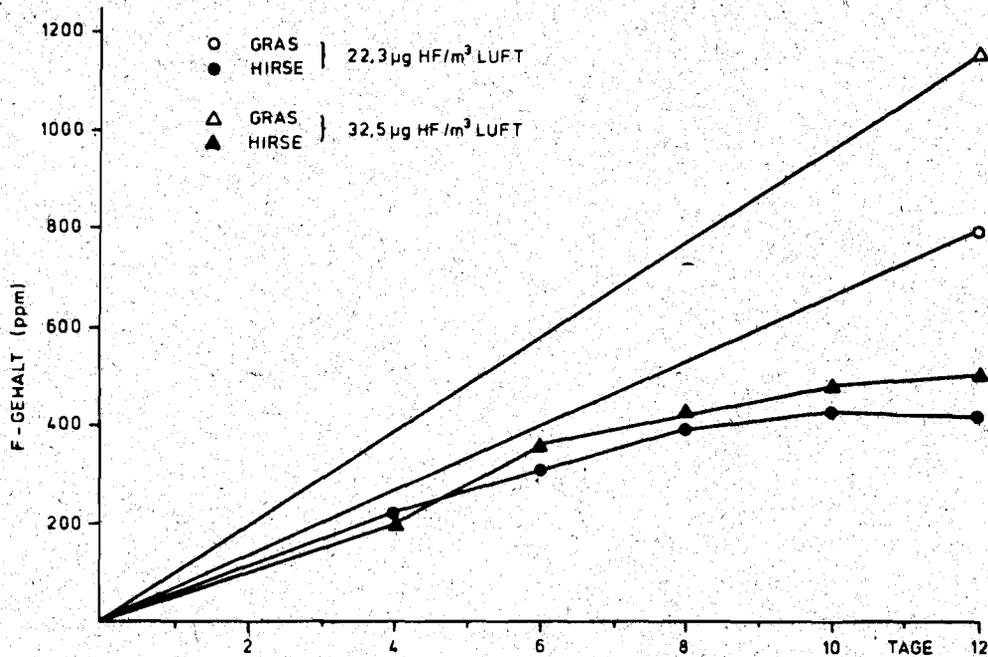


Abb. 16 Aufnahme von Fluor bei Futterhirse und Lolium multiflorum in Abhängigkeit von der HF-Konzentration

Im CO₂-Gaswechsel zeigten die mit 22,5 µg HF/m³ Luft begasteten Pflanzen deutliche Reaktionen erst im letzten Versuchsdrittel (Abb. 17). Die Photosyntheseleistung fiel gegen Versuchsende schwach ab, während die Respiration um den Kontrollwert schwankte. Die relative Veratmung wurde leicht erhöht.

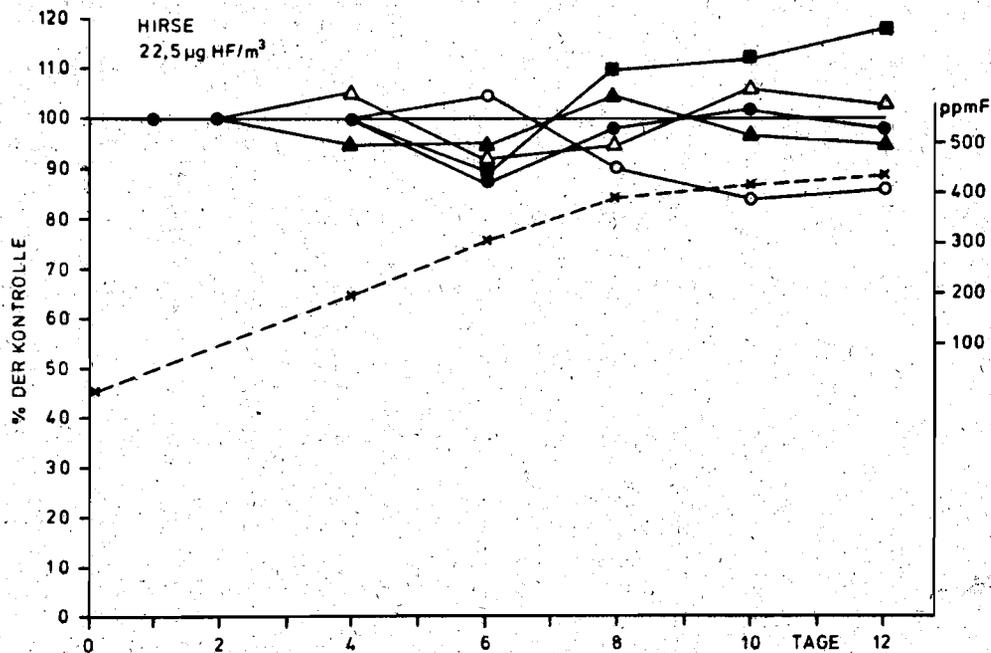


Abb. 17 Einfluß des Fluor-Gehaltes auf den CO₂-Gaswechsel sowie das Pflanzenwachstum von Futterhirse bei 22,5 µg HF/m³ Luft (x-x Fluor-Gehalt, o-o Photosynthese, ●-● Respiration, Δ-Δ Frischgewicht, ▲-▲ Trockensubstanz, ■-■ Relative Veratmung)

Unter der höheren Konzentration von 32,5 µg HF/m³ Luft zeigten sich ebenso wie unter der niedrigeren deutliche Reaktionen erst gegen Versuchsende (Abb. 18). Bei einem F-Gehalt von rund 500 ppm F in der TS war die Photosynthese am Ende des Versuches um 20 % vermindert, während die Respiration um den Kontrollwert schwankte. Die relative Veratmung der behandelten Pflanzen wurde nur leicht erhöht. In beiden Fällen blieb die Wachstumsleistung unbeeinflusst.

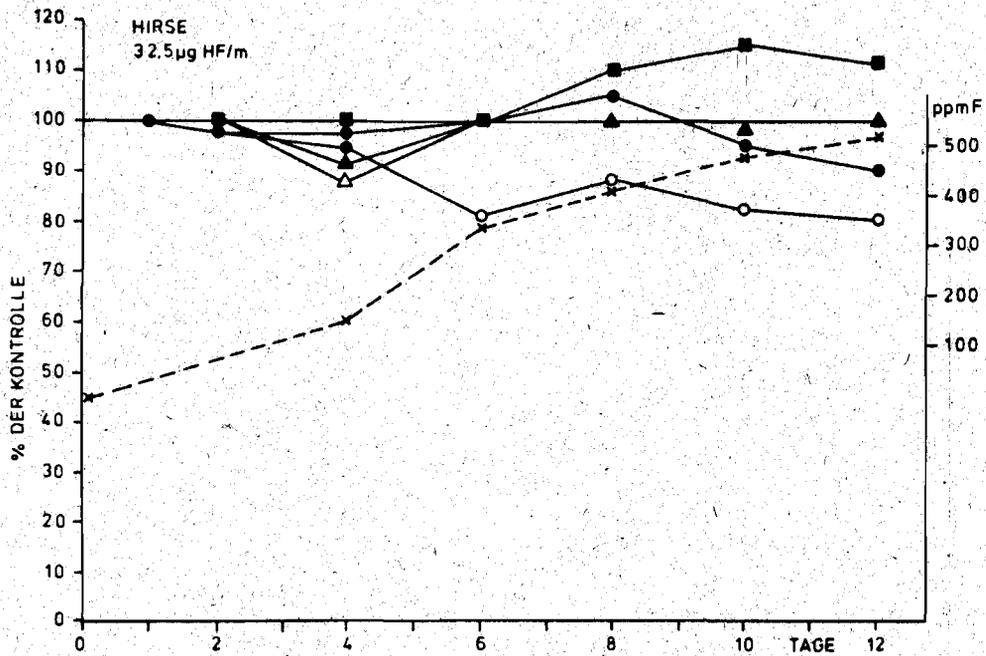


Abb. 18 Einfluß des Fluor-Gehaltes auf den CO₂-Gaswechsel sowie das Pflanzenwachstum von Futterhirse bei 32,5 µg HF/m³ Luft (x-x Fluor-Gehalt, o—o Photosynthese, ●—● Respiration, Δ—Δ Frischgewicht, ▲—▲ Trockensubstanz, ■—■ Relative Veratmung)

2.3 Kombinationswirkungen von Fluorwasserstoff und Schwefeldioxid auf Lolium multiflorum und Setaria italica

Pflanzenschädigende Luftverunreinigungen treten selten allein auf, und Schwefeldioxid ist weitverbreitet an den komplexen Immissionstypen beteiligt. Eine Erweiterung der Grundlagen zur Anwendung der Graskultur als Überwachungsmethode wurde durch Untersuchungen über Kombinationswirkungen bei gleichzeitiger Einwirkung von HF und SO₂ angestrebt. In diese Klimakammerversuche wurde neben Lolium multiflorum die weniger resistente Futterhirse (Setaria italica) einbezogen.

Um den Einfluß verschiedener Umweltfaktoren festzustellen, wurden Untersuchungen unter verschiedenen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsstufen sowie unter verschieden hohen Lichtintensitäten durchgeführt. Hierbei sollte auch geprüft werden, wie sich diese beiden Schadstoffe jeweils allein und in Kombination auf den Lichtkompensationspunkt, bei dem sich CO₂-Abgabe und CO₂-Aufnahme die Waage halten, auswirken. Zur Ermittlung möglicher immissionsbedingter Verschiebungen im Lichtkompensationspunkt stieg während einer Lichtperiode von 16 Stunden die Lichtintensität von 5000 auf 20000 Lux stufenlos an; nach 2-stündiger Beleuchtung mit 20000 Lux fiel sie wiederum auf den Ausgangswert ab (s. auch die Ausführungen unter 1.1.1).

2.3.1 Lolium multiflorum

Lolium multiflorum wurde unter einer HF-Konzentration von 15 µg HF/m³ und einer SO₂-Konzentration von

1 mg SO₂/m³ Luft allein und in Kombination in der von GUDERIAN und THIEL (1973) entwickelten Anlage untersucht. Die Temperatur betrug 20°C, die relative Luftfeuchtigkeit 75 %. Die Pflanzen wurden eine Woche lang kontinuierlich begast und blieben dann zur Feststellung von Erholungseffekten eine weitere Woche ohne Begasung in den Küvetten.

Im F-Gehalt war kein Einfluß des Schwefeldioxids auf die Fluor-Anreicherung erkennbar (Abb. 19). Die mit

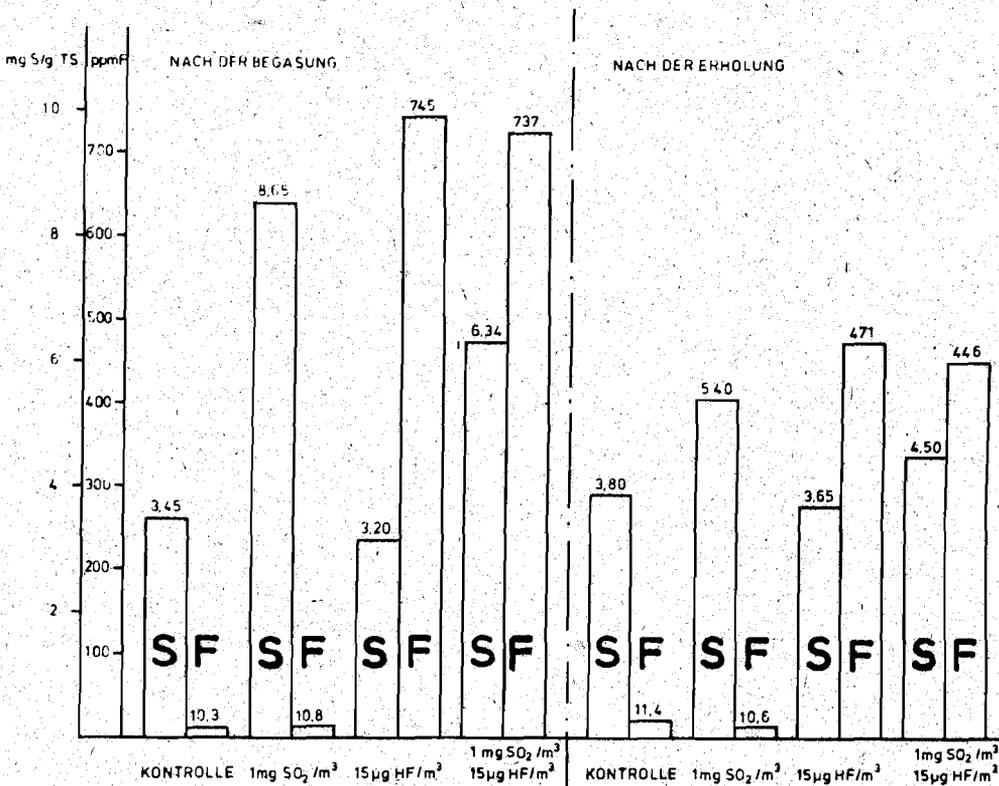


Abb. 19 Fluor- und Schwefel-Gehalte bei Lolium multiflorum nach Einwirkung von 15 µg HF/m³ Luft und 1 mg SO₂/m³ Luft bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 %

HF + SO₂ behandelten Pflanzen wiesen mit 737 ppm F in der TS praktisch eine gleich hohe Aufnahme auf wie die allein mit HF begasten Pflanzen. Bei den allein mit SO₂ behandelten Pflanzen betrug die S-Anreicherung 8,65 mg S/g TS. Bei gleichzeitiger Begasung mit HF war dieser Wert mit 6,30 mg S/g TS deutlich niedriger.

Während der Erholungszeit fiel sowohl der F- als auch der S-Gehalt der behandelten Pflanzen um rund 40 % bzw. 30 % ab. Die Pflanzen unter den Einwirkungen der einzelnen Komponenten zeigten keine sichtbaren Schädigungen. Unter der Kombination dagegen wurden leichte Chlorosen festgestellt.

Nach 7-tägiger Begasung zeigten die HF-behandelten Pflanzen keine Auswirkungen auf die Trockensubstanzbildung (Abb. 20). Der Trockensubstanzertrag der mit SO₂ sowie der mit HF + SO₂ behandelten Pflanzen wies sowohl gegenüber den nicht behandelten als auch den mit HF begasten Pflanzen eine signifikante ($P < 0,01$) Minderung auf. Nach der Erholungszeit war nun der Trockensubstanzertrag der mit HF + SO₂ behandelten Pflanzen noch signifikant reduziert ($P < 0,001$).

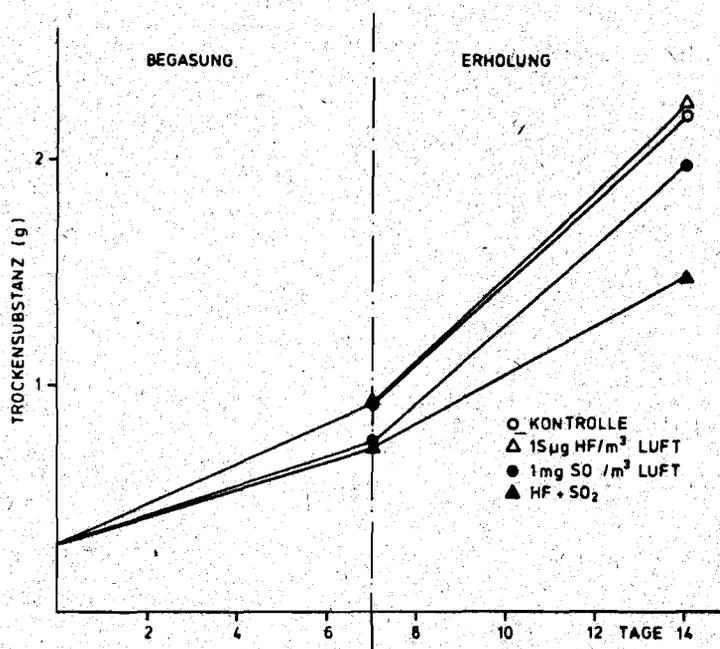


Abb. 20 Trockensubstanzbildung bei Lolium multiflorum nach Einwirkung von $15 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft und $1 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Luft bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 %

Im CO_2 -Gaswechsel waren bei den allein mit HF behandelten Pflanzen keine Änderungen weder in der Photosynthese noch in der Respiration festzustellen. Die Photosynthese der mit SO_2 behandelten Pflanzen war dagegen bei Begasungsende um rund 15 % reduziert im Vergleich zu 20 % der mit $\text{HF} + \text{SO}_2$ begasten Pflanzen (Abb. 21). Nach 7-tägiger Erholung erreichte die Photosynthese der mit SO_2 behandelten Pflanzen rund 93 % des Kontrollwertes, während die Photosyntheseleistung der mit $\text{HF} + \text{SO}_2$ behandelten Pflanzen noch eine Minderung von 25 % aufwiesen. Im Lichtkompensationspunkt traten keine Veränderungen auf, weder unter den einzelnen Komponenten noch bei der Kombination.

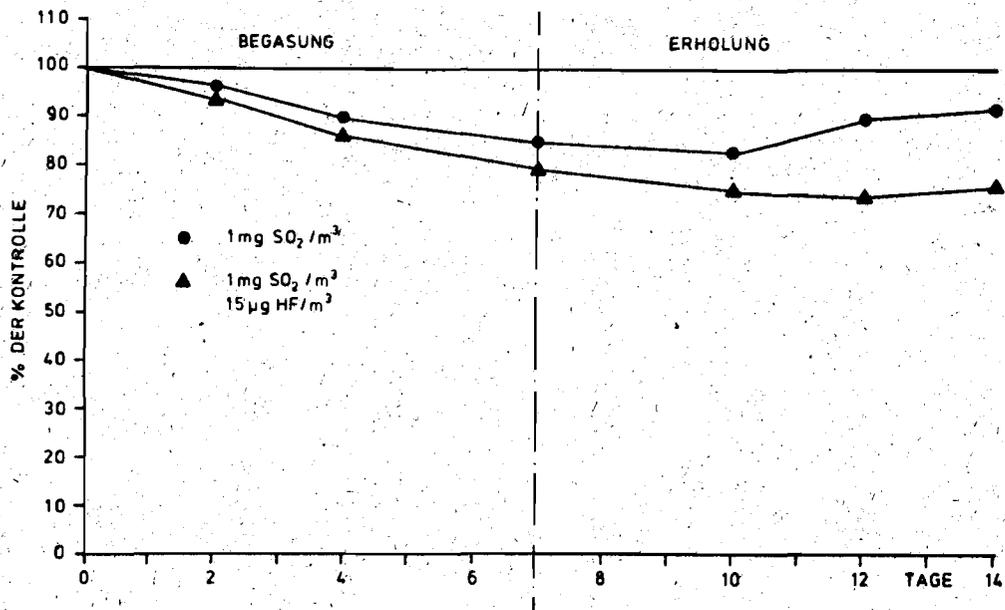


Abb. 21 Apparente Photosynthese von Lolium multiflorum nach Einwirkung von 15 µg HF/m³ Luft und 1 mg SO₂/m³ Luft bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 %

Im Versuch mit einer SO₂-Konzentration von 0,4 mg SO₂/m³ Luft und einer HF-Konzentration von 15 µg HF/m³ Luft unter den oben erwähnten klimatischen Bedingungen betrug die F-Anreicherung bei den allein mit HF begasteten Pflanzen 780 ppm F in der TS (Abb. 22). Im Gegensatz zu dem schon beschriebenen Versuch ging dieser Wert bei gleichzeitiger Begasung mit HF + SO₂ auf 620 ppm F um 20 % zurück. Bei den mit SO₂ begasteten Pflanzen erreichte die S-Anreicherung 7,25 mg S/g TS gegenüber 5,8 mg S/g TS in der Kombination.

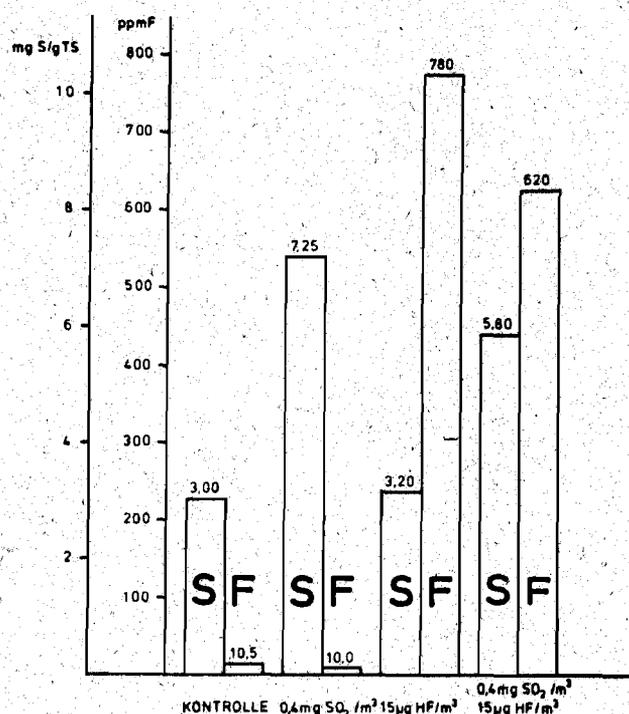


Abb. 22 Fluor- und Schwefel-Gehalte bei Lolium multiflorum nach Einwirkung von 15 µg HF/m³ Luft und 0,4 mg SO₂/m³ Luft bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 %

Sichtbare Schädigungen sowie signifikante Auswirkungen auf die Trockensubstanzbildung konnten unter den einzelnen Komponenten nicht festgestellt werden. Der Trockensubstanzertrag der mit HF + SO₂ behandelten Pflanzen dagegen wurde signifikant ($P < 0,05$) vermindert (Tabelle 17 im Anhang).

Im CO₂-Gaswechsel zeigten lediglich die Pflanzen unter der Kombination deutliche Reaktionen. Am Ende des Versuches war die Photosynthese um 15 % reduziert, der Lichtkompensationspunkt war unverändert.

Zusätzlich zu den Versuchen unter den oben beschriebenen Klimabedingungen wurden Untersuchungen bei Temperaturen von 7°C am Tage und 5°C während der Nacht sowie Luft-

feuchtwerte von 77 % bzw. 87 % unter einer HF-Konzentration von $15 \mu\text{g HF}/\text{m}^3$ Luft und einer SO_2 -Konzentration von $1 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Luft durchgeführt. Das konstante Lichtangebot betrug 20000 Lux bei einer Lichtperiode von 9 Stunden.

Die F-Anreicherung der mit HF behandelten Pflanzen betrug hierbei 677 ppm F in der TS (Abb. 23). Im Gegensatz zum Versuch bei diesen Konzentrationen unter günstigeren Klimabedingungen war die F-Anreicherung in der Kombination um 40 % geringer. Ähnlich wie in den schon beschriebenen Versuchen war die S-Anreicherung in der Kombination rund 20 % geringer als bei den mit SO_2 allein behandelten Pflanzen.

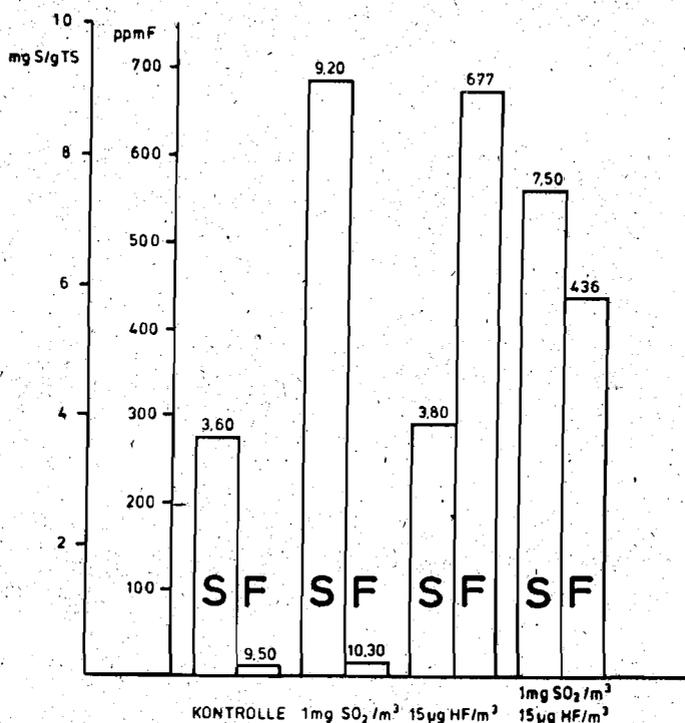


Abb. 23 Fluor- und Schwefel-Gehalte bei Lolium multiflorum nach Einwirkung von $15 \mu\text{g HF}/\text{m}^3$ Luft und $1 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Luft bei einer Temperatur von 7°C am Tage und 5°C in der Nacht und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 77 % bzw. 87 %

Zum Versuchsende zeigten die Pflanzen in der Kombination starke Nekrosen, während bei den übrigen Pflanzen keine sichtbaren Schädigungen festgestellt wurden. Diese mit Einzelkomponenten begasten Pflanzen wiesen im Gegensatz zu denen in der Kombination keine signifikanten Unterschiede in der Wachstumsleistung auf (s. Tabelle 18 im Anhang).

Die Photosyntheseleistung der mit $\text{HF}^- + \text{SO}_2$ begasten Pflanzen war bei Versuchsende um rund 45 % vermindert, die Respiration war gleichfalls reduziert, wenn auch deutlich schwächer (Abb. 24). Die starke Abnahme im

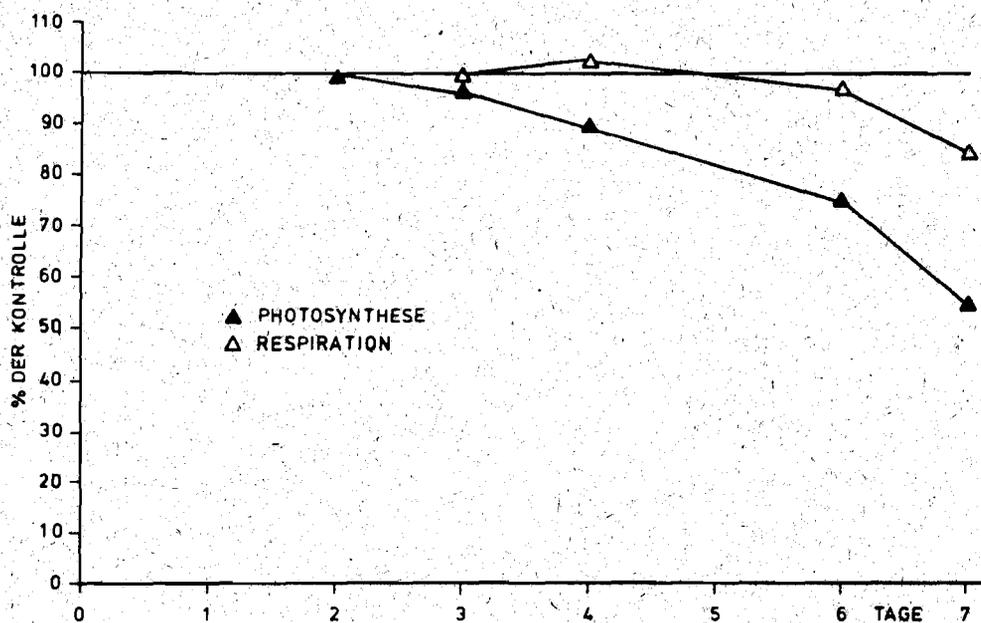


Abb. 24 CO_2 -Gaswechsel bei *Lolium multiflorum* nach Einwirkung von $15 \mu\text{g HF}/\text{m}^3$ Luft und $1 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Luft in Kombination bei einer Temperatur von 7°C am Tage und 5°C in der Nacht und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 77 % bzw. 87%

CO₂-Gaswechsel zum Versuchsende hin beruhte augenscheinlich auf dem hohen Grad der Nekrotisierung, die schätzungsweise etwa 50 % der Blattfläche betrug.

Zusammenfassend läßt sich zu diesen Versuchen mit Lolium multiflorum feststellen: In der Kombination von HF + SO₂ war eine Tendenz zu verminderter Schadstoffanreicherung oder gar ein deutlicher Rückgang derselben erkennbar. Demgegenüber traten hier stets die stärksten Schädwirkungen auf. Auch in jenen Versuchen in denen die Einzelkomponenten wirkungslos geblieben waren, verursachte die Kombination signifikante Auswirkungen. Unter den für das Wachstum von Lolium multiflorum ungünstigeren klimatischen Bedingungen war die Kombinationswirkung deutlich stärker.

2.3.2 Setaria italica

Die Reaktionen von Hirsepflanzen (Setaria italica, Sorte Sioux) wurden in 7-tägiger Begasung mit einer HF-Konzentration von $15 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft und einer SO_2 -Konzentration von $1 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Luft unter einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 % geprüft. Die Lichtintensität schwankte im Verlaufe der 16-stündigen Beleuchtungsperiode zwischen 5000 und 20000 Lux (vergl. hierzu 2.4). Nach der Begasung blieben die Pflanzen eine weitere Woche in den Küvetten zur Feststellung von Erholungseffekten.

Der F-Gehalt der mit HF begasten Pflanzen erreichte rund 240 ppm F in der TS (Abb. 25). Die mit SO_2 behandelten Pflanzen wiesen einen S-Gehalt von 3,93 mg S/g TS auf. In der Kombination waren ähnlich wie in den unter 2.4.1 beschriebenen Versuchen die Gehalte mit Werten von 195 ppm F und 3,45 mg S/g TS geringer. Während der Erholungszeit fiel der F-Gehalt der HF-begasten Pflanzen auf 205 ppm F in der TS ab. Der S-Gehalt der mit SO_2 begasten Pflanzen betrug 2,33 mg S/g TS, während in der Kombination diese Werte auf 166 ppm F bzw. 2,65 mg S/g TS abfielen. Die mit Einzelkomponenten begasten Pflanzen zeigten keine sichtbaren Schädigungen, dagegen wiesen die Pflanzen in der Kombination leichte Blattspitzennekrosen auf.

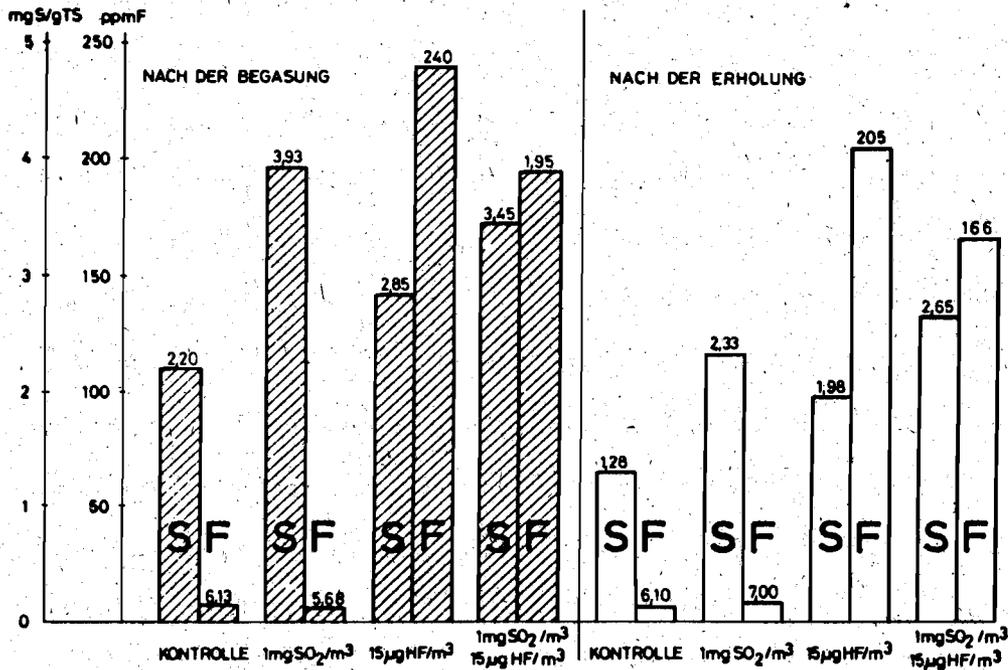


Abb. 25 Fluor- und Schwefel-Gehalte bei *Setaria italica* nach Einwirkung von 15 µg HF/m³ Luft und 1 mg SO₂/m³ Luft bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 %

Nach 7-tägiger Begasung zeigten die mit HF behandelten Pflanzen keine Auswirkungen auf die Trockensubstanzbildung (Abb. 26). Die SO₂-begasten Pflanzen wiesen eine signifikante ($P < 0,001$) Minderung sowohl gegenüber der Kontrolle als auch den HF-begasten Pflanzen auf. Die Trockensubstanz der Pflanzen in der Kombination schließlich war gegenüber allen drei Behandlungsstufen signifikant ($P < 0,001$) reduziert. Die mit SO₂ begasten Pflanzen erholten sich während der immissionsfreien Zeit besonders stark, so daß bei Versuchsende keine gesicherte Abweichung zur Kontrolle vorlag. Demgegenüber vergrößerte sich der schwache Rückgang in der Trockensubstanzbildung der HF-begasten Pflanzen bis zum Versuchsende signifikant ($P < 0,001$). Die Kombination wies auch bei Versuchsende eine gesicherte ($P < 0,001$) Minderung in der Trockensubstanz auf.

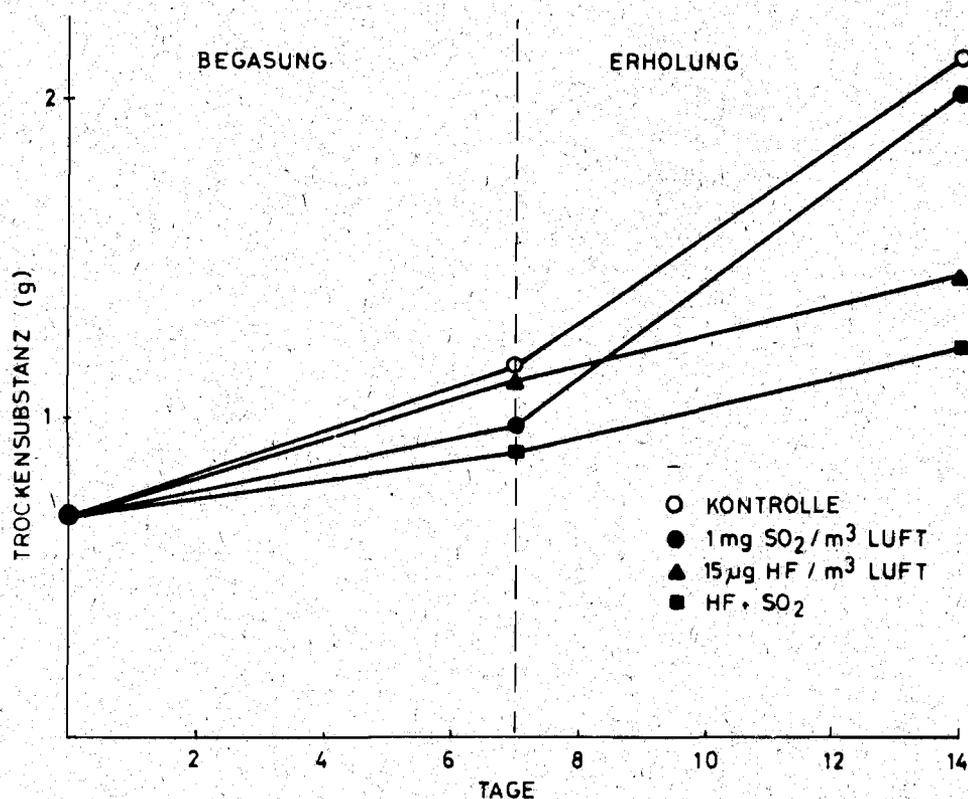


Abb. 26 Trockensubstanzbildung bei *Setaria italica* nach Einwirkung von $15 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft und $1 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Luft bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 %

Die Photosyntheseleistung der mit SO_2 begasten Pflanzen war nach 7-tägiger Begasung um rund 5 % reduziert, die der Pflanzen unter HF-Einfluß um 35 % (Abb. 27). Der Rückgang in der Kombination um 65 % war weitaus stärker als die Addition der Einzelwirkungen. Während der Erholungszeit stieg speziell bei den mit HF sowie bei den mit HF + SO_2 behandelten Pflanzen die Photosyntheseleistung stark an, und erreichte bei Versuchsende 95 % bzw. 88 % des Kontrollwertes. Die Respiration der mit SO_2 begasten Pflanzen war während der gesamten Versuchszeit schwach erhöht. Unter HF-Einfluß und in der Kombination sank die Respiration nach anfänglicher Stimulierung auf 55 % bzw. 43 % des Kontrollwertes ab, um

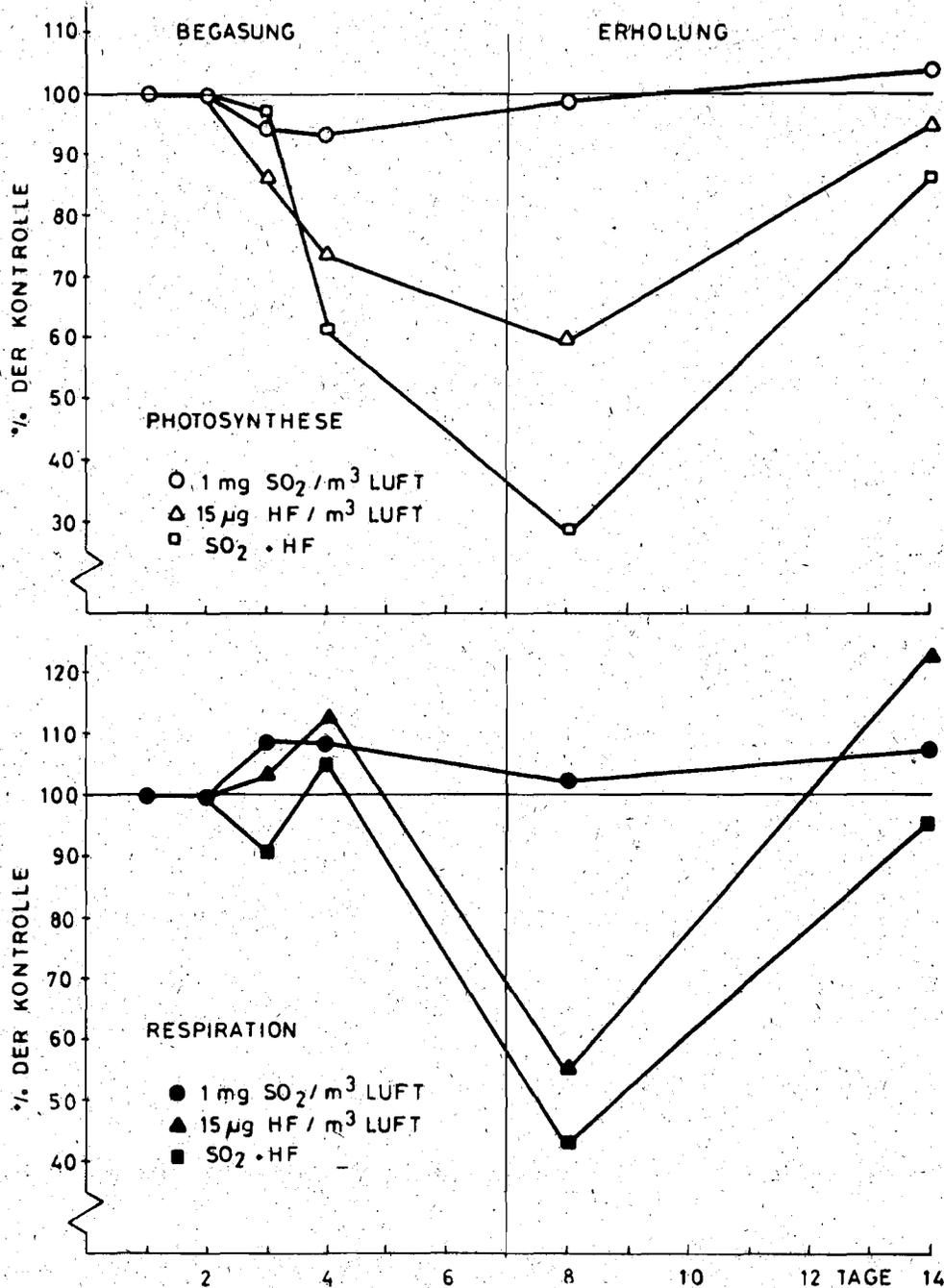


Abb. 27 CO₂-Gaswechsel von *Setaria italica* nach Einwirkung von 15 µg HF/m³ Luft und 1 mg SO₂/m³ Luft bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 %

während der Erholungszeit über den Kontrollwert hinaus anzusteigen.

Der Lichtkompensationspunkt der SO_2 -behandelten Pflanzen stieg während der 7-tägigen Begasung von 5250 Lux auf 5700 Lux an (Abb. 28). Bei den mit HF begasten Pflanzen

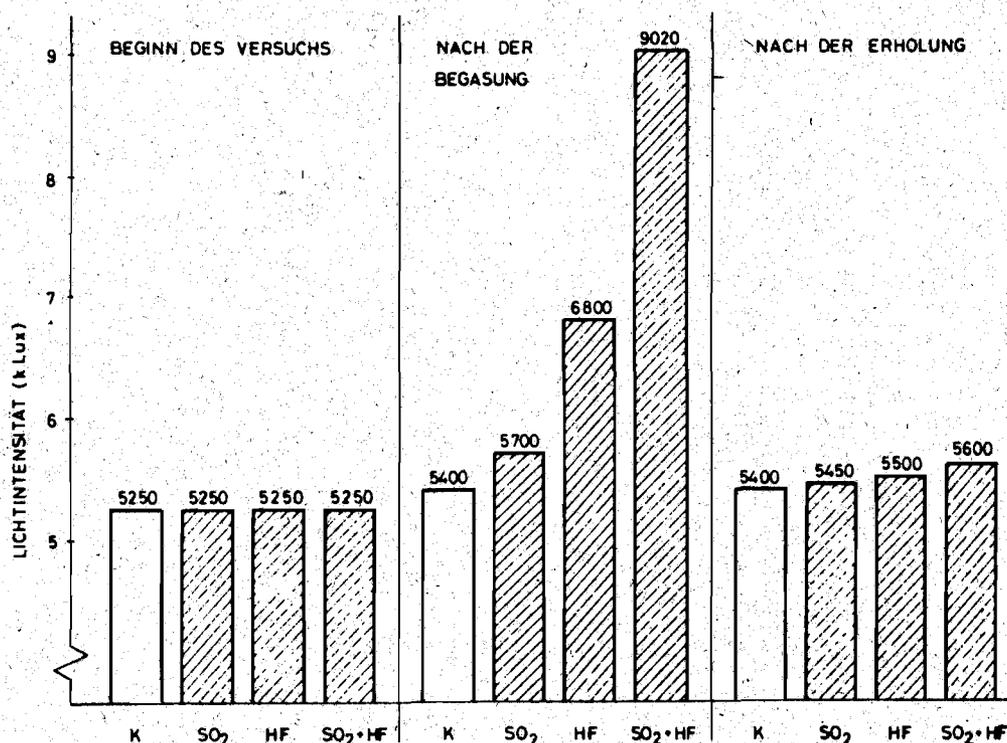


Abb. 28 Änderungen im Lichtkompensationspunkt von *Setaria italica* nach Einwirkung von $15 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft und $1 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Luft bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 %

betrug dieser Wert bei Begasungsende 6800 Lux und bei den mit HF + SO₂ behandelten Pflanzen sogar 9020 Lux. Der Lichtkompensationspunkt der Kontrollpflanzen verschob sich im Laufe des Versuches von 5250 auf 5400 Lux. Während der 7-tägigen Erholungszeit ging der Lichtkompensationspunkt der SO₂-begasten Pflanzen mit einem Wert von 5450 fast auf den der Kontrollpflanzen zurück. Bei der HF-Begasung und in der Kombination lag mit Werten von 5500 bzw. 5600 Lux immer noch eine verminderte Ausnutzung des Lichtangebotes vor.

Abbildung 29 zeigt die Zusammenhänge zwischen Photosyntheseleistung und Lichtintensität der verschiedenen Behandlungsstufen während der 7-tägigen Begasung. Hierbei werden die oben erwähnten Verschiebungen des Lichtkompensationspunktes im Verlaufe der Begasung besonders offenbar.

Im Versuch mit einer Temperatur von 30°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 % betrug unter den oben erwähnten Konzentrationen von 15 µg HF/m³ Luft und 1 mg SO₂/m³ Luft der F-Gehalt der mit HF begasten Pflanzen 268 ppm F in der TS (Abb. 30). Der S-Gehalt erreichte bei den mit SO₂ behandelten Pflanzen 4,45 mg S/g TS. In der Kombination waren diese Gehalte mit Werten von 211 ppm F bzw. 3,93 mg S/g TS um 20 % bzw. 10 % niedriger. Im Gegensatz zu dem oben beschriebenen Versuch war hier die Trockensubstanzbildung unter allen Behandlungsstufen leicht erhöht (s. Tabelle 20 im Anhang), ohne daß signifikante Unterschiede auftraten. Gegen Ende der Begasung zeigten die Pflanzen in der Kombination leichte Nekrosen.

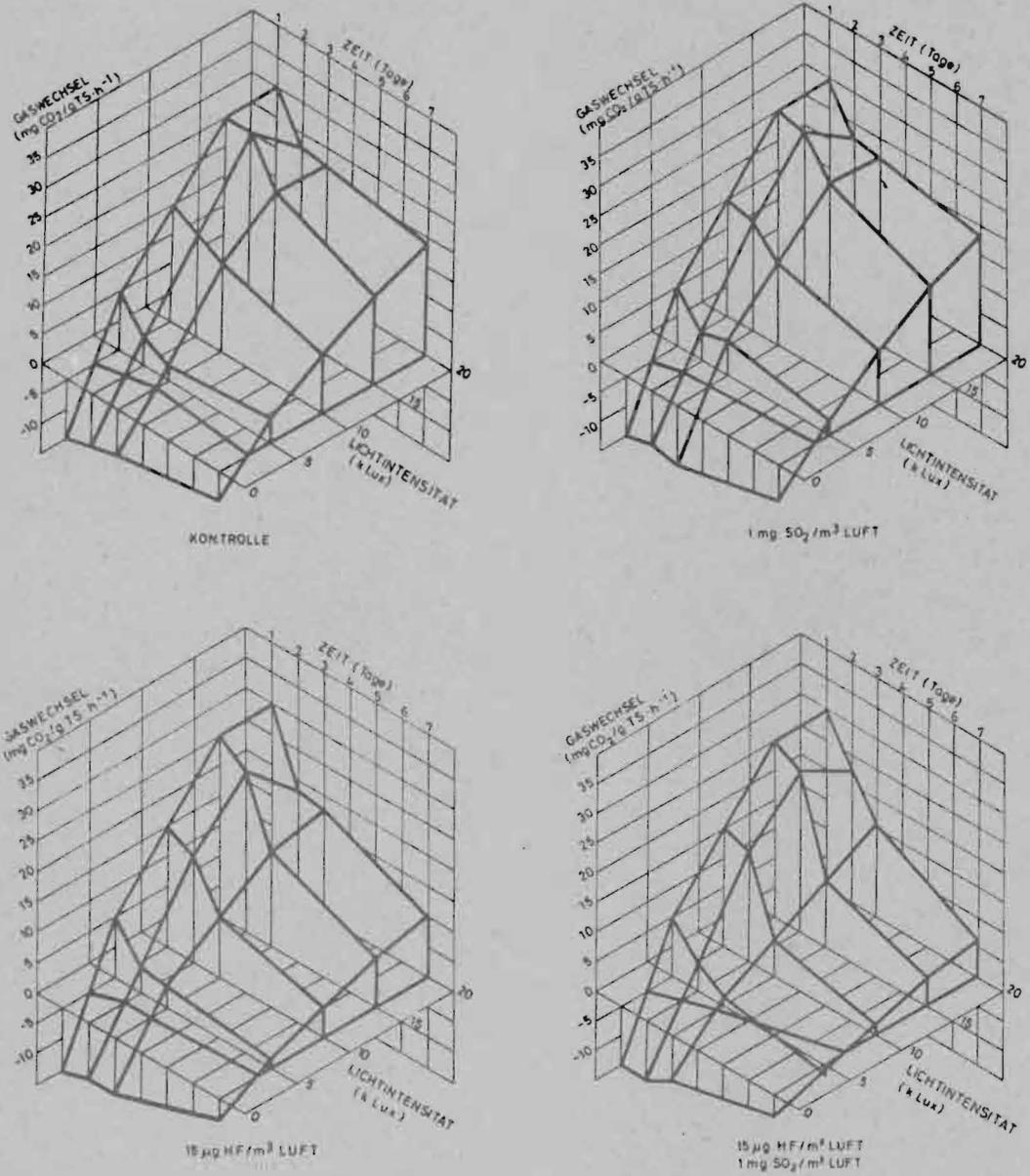


Abb. 29 Abhängigkeit zwischen Photosyntheseleistung, Lichtintensität und Begasungsdauer bei Setaria italica

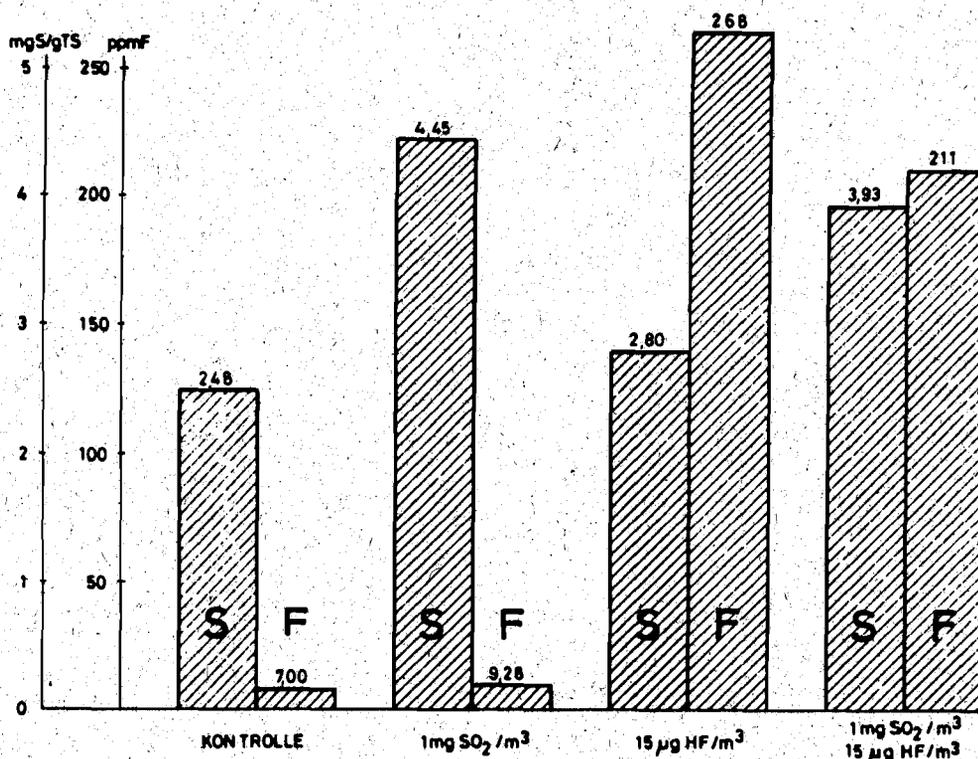


Abb. 30 Fluor- und Schwefel-Gehalte bei Setaria italica nach Einwirkung von 15 µg HF/m³ Luft und 1 mg SO₂/m³ Luft bei einer Temperatur von 30°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 %

Der CO₂-Gaswechsel war bei allen begasteten Pflanzen reduziert (Abb. 31). Bei den SO₂-begasteten Pflanzen ging die Photosynthese um 10 %, bei den HF-behandelten um 30 % zurück. Die Photosynthese der Pflanzen in der Kombination wurde sogar um rund 50 % reduziert. Auch hier lag eine stärkere Verminderung vor als die Wirkungen der Einzelkomponenten erwarten ließen. Die Respiration der begasteten Pflanzen wurde gleichfalls vermindert. Bei den HF-begasteten Pflanzen und den in der Kombination stieg sie gegen Versuchsende allerdings stark an.

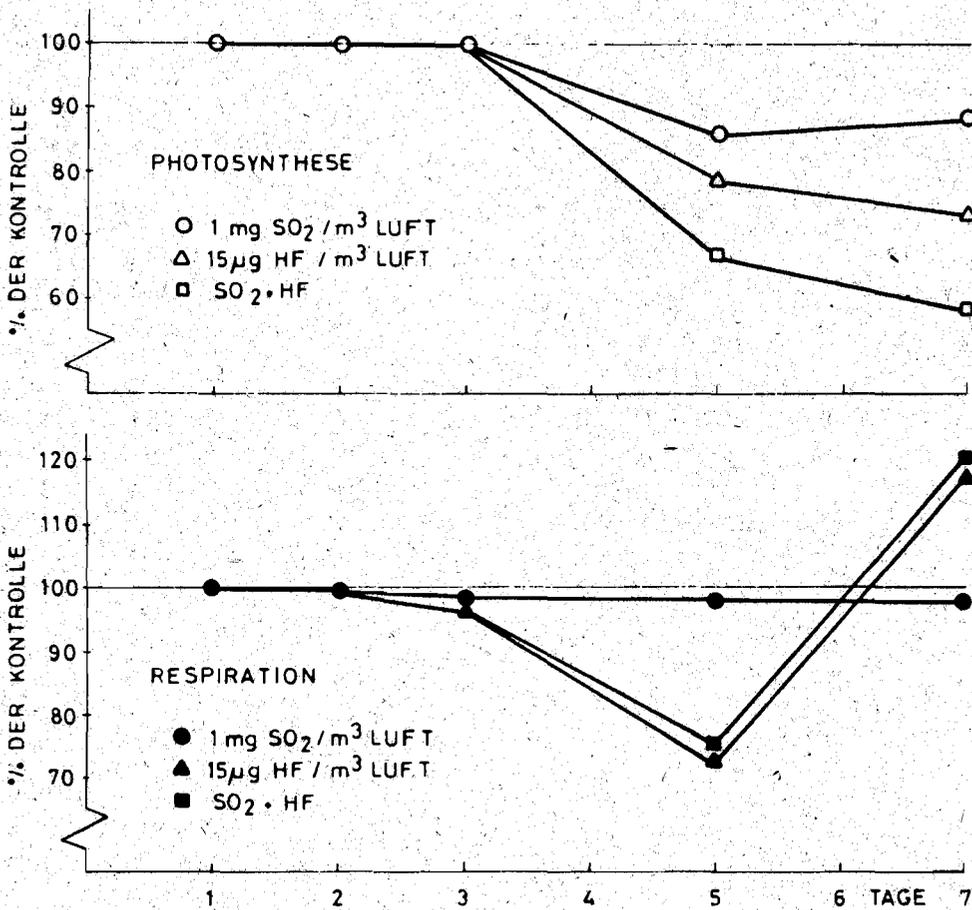


Abb. 31 CO₂-Gaswechsel von *Setaria italica* nach Einwirkung von 15 µg HF/m³ Luft und 1 mg SO₂/m³ Luft bei einer Temperatur von 30°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 %

Der Lichtkompensationspunkt erhöhte sich im Verlaufe des Versuches von 5250 auf 6000 Lux. Immissionsbedingte Unterschiede traten nicht auf.

Im Versuch bei einer Temperatur von 10°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 % betrug bei den erwähnten Konzentrationen der F-Gehalt 197 ppm F in den HF-begasten Pflanzen (Abb. 32). Der S-Gehalt in den mit SO₂ behandelten Pflanzen lag bei 3,45 mg S/g TS. In der Kombination war ebenso wie im vorausgegangenen Versuch die Anreicherung sowohl von F als auch die von S geringer als die mit Einzelkomponenten begasten Pflanzen.

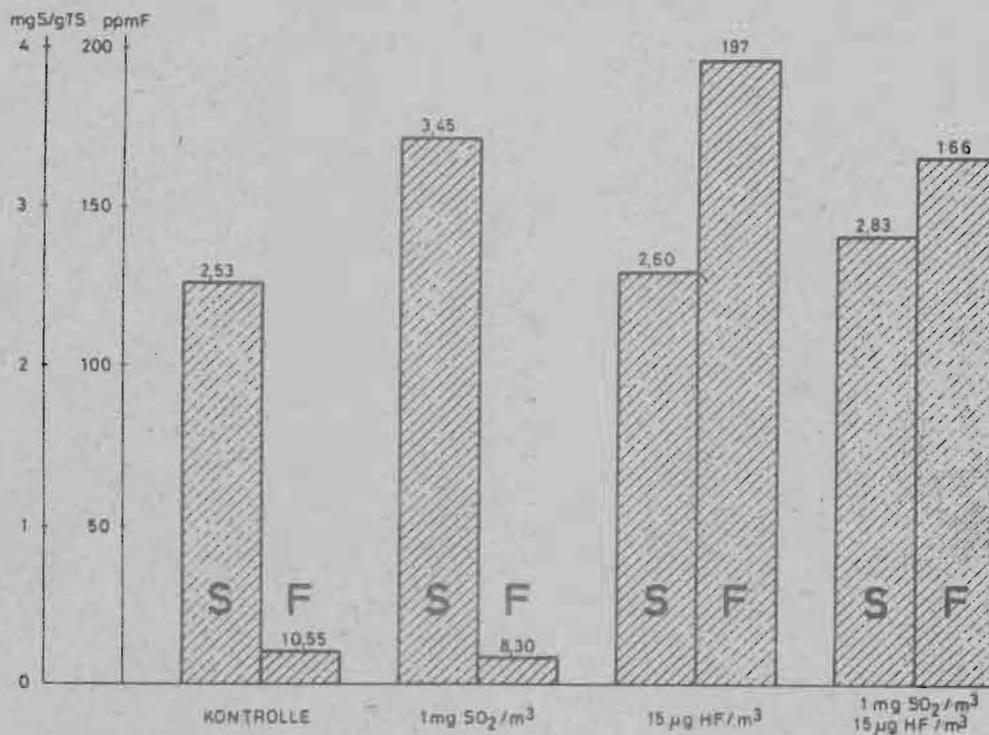


Abb. 32 Fluor- und Schwefel-Gehalte bei Setaria italica nach Einwirkung von 15 µg HF/m³ Luft und 1 mg SO₂/m³ Luft bei einer Temperatur von 10°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 %

Auf die Wuchsleistung wirkten sich die Begasungen nicht aus; äußere Schädigungsmerkmale in Form von Chlorosen traten allein in der Kombination auf. Im Vergleich zu den beiden oben beschriebenen Versuchen war hier, wie zu erwarten, das Wachstum der Pflanzen stark reduziert (s. Tabelle 21 im Anhang).

Die niedrige Temperatur bedingte auch Minderungen im CO_2 -Gaswechsel. Die Photosynthese der mit HF begasten Pflanzen war am Ende der Begasung um 45 % reduziert (Abb. 33). Bei den SO_2 -begasten Pflanzen war die Photosyntheseleistung um 60 % und bei den Pflanzen in der Kombination um 80 % geringer als die der Kontrollpflanzen. Die Respiration der behandelten Pflanzen wurde auch reduziert, stieg aber gegen Versuchsende wieder an. Der Lichtkompensationspunkt aller Pflanzen erhöhte sich im Verlaufe des Versuches; Unterschiede zwischen den einzelnen Behandlungsstufen wurden nicht festgestellt.

In einem vierten Versuch mit gleichen Konzentrationen von $15 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft und $1 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Luft unter einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95 % erreichte der F-Gehalt in den mit HF begasten Pflanzen einen Wert von 340 ppm F und der S-Gehalt der SO_2 -begasten Pflanzen einen Wert von 6,25 mg S/g TS (Abb. 34). In der Kombination war die S-Anreicherung ebenso wie in den vorangegangenen Untersuchungen um etwa 15 % geringer, die F-Anreicherung dagegen stark erhöht.

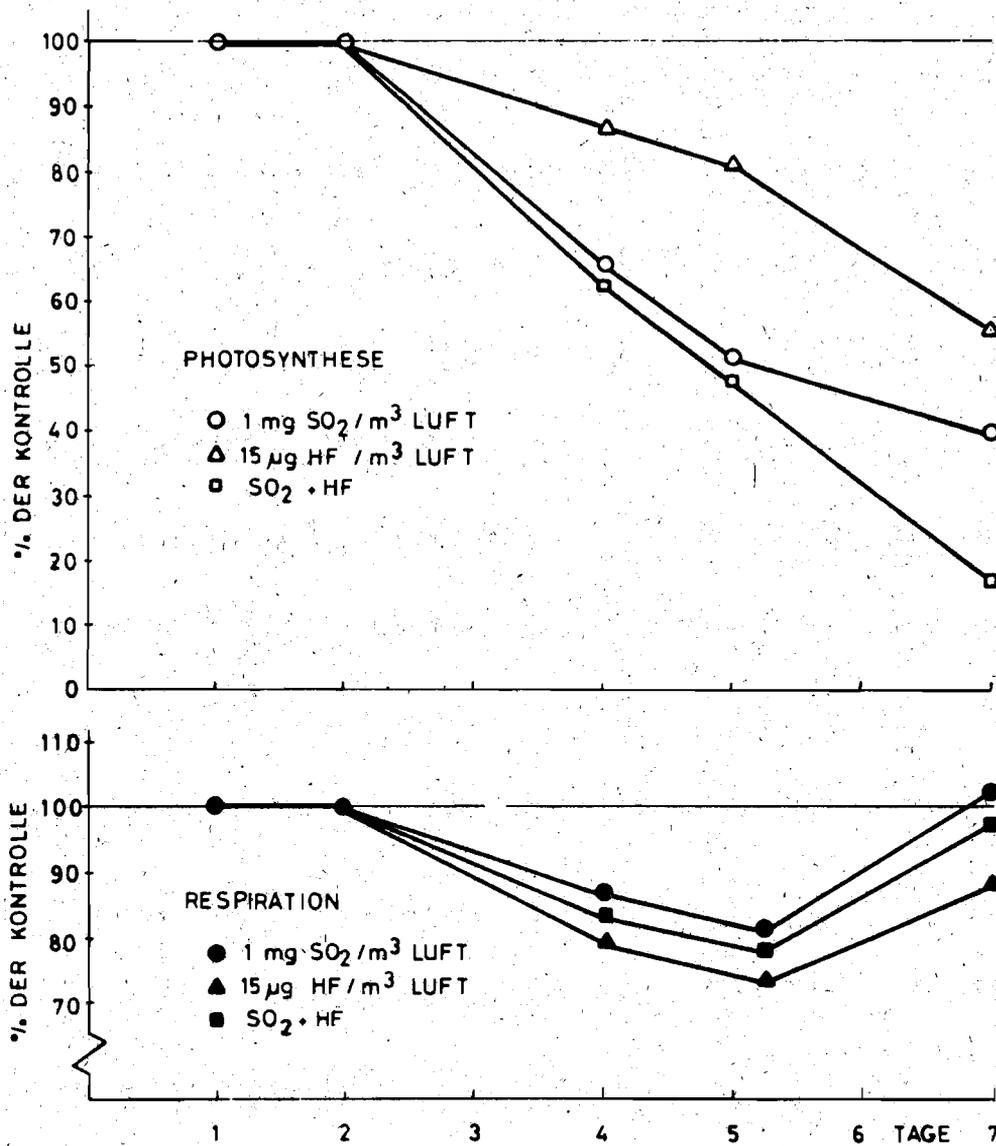


Abb. 33 CO₂-Gaswechsel von *Setaria italica* nach Einwirkung von 15 µg HF/m³ Luft und 1 mg SO₂/m³ Luft bei einer Temperatur von 10°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 %

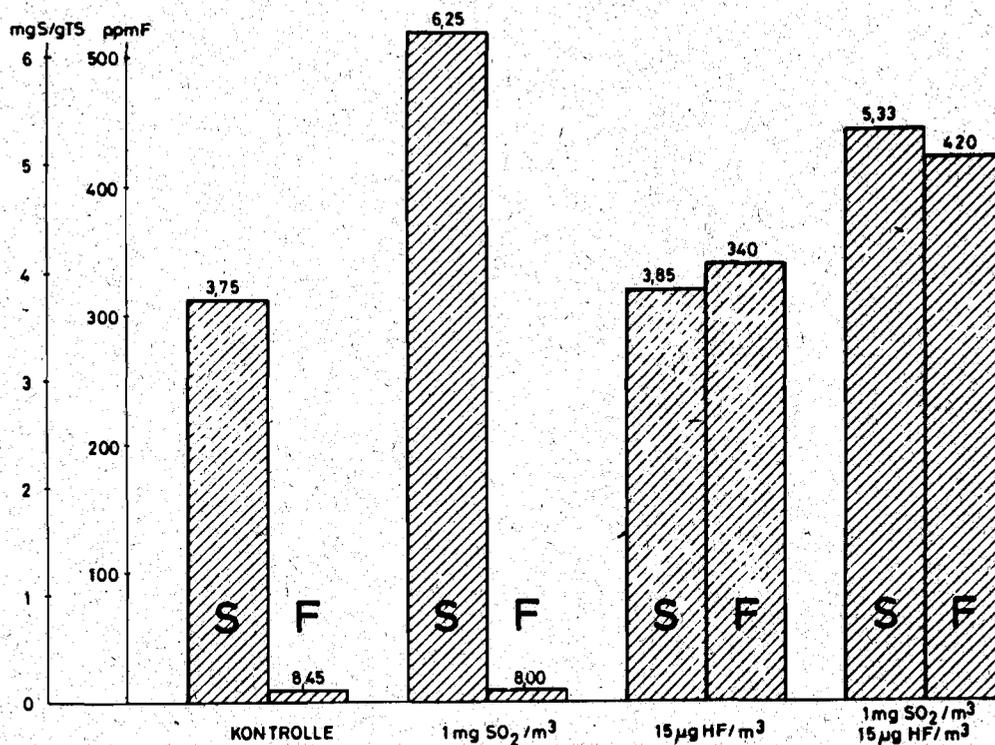


Abb. 34 Fluor- und Schwefel-Gehalte bei *Setaria italica* nach Einwirkung von 15 µg HF/m³ Luft und 1 mg SO₂/m³ Luft bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95 %

Die Trockensubstanzbildung der Pflanzen in der Kombination wurde signifikant ($P < 0,01$) vermindert (Abb. 35). Diese Pflanzen zeigten auch starke Nekrosen zum Versuchsende hin (s. Tabelle 22 im Anhang).

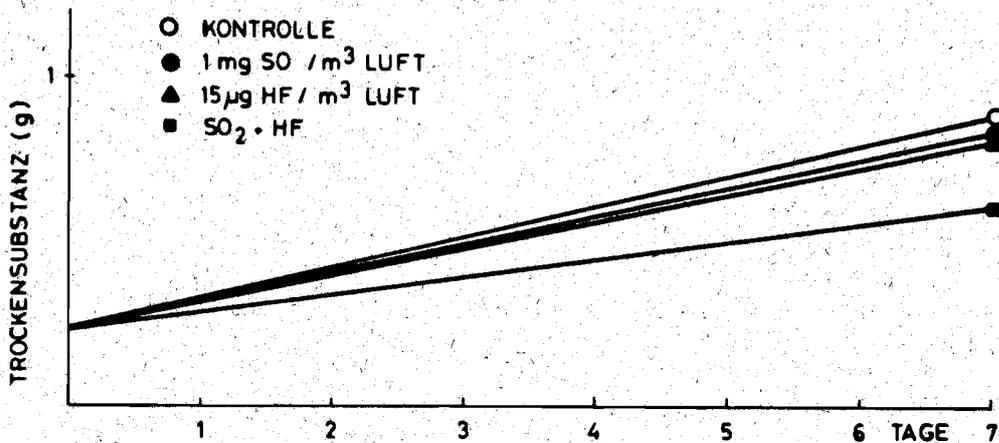


Abb. 35 Trockensubstanzbildung bei *Setaria italica* nach Einwirkung von 15 µg HF/m³ Luft und 1 mg SO₂/m³ Luft bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95 %

Im CO₂-Gaswechsel wiesen die SO₂-behandelten Pflanzen eine Verminderung in der Photosynthese um 15 % auf, während die Photosyntheseleistung der mit HF begasten Pflanzen um etwa 35 % zurückging (Abb. 36). In der Kombination fiel die Photosynthese sogar um 70 % ab, weitaus stärker, als es der Addition der Einzelwirkungen entsprechen würde. Die Respiration der begasten Pflanzen war ebenfalls vermindert.

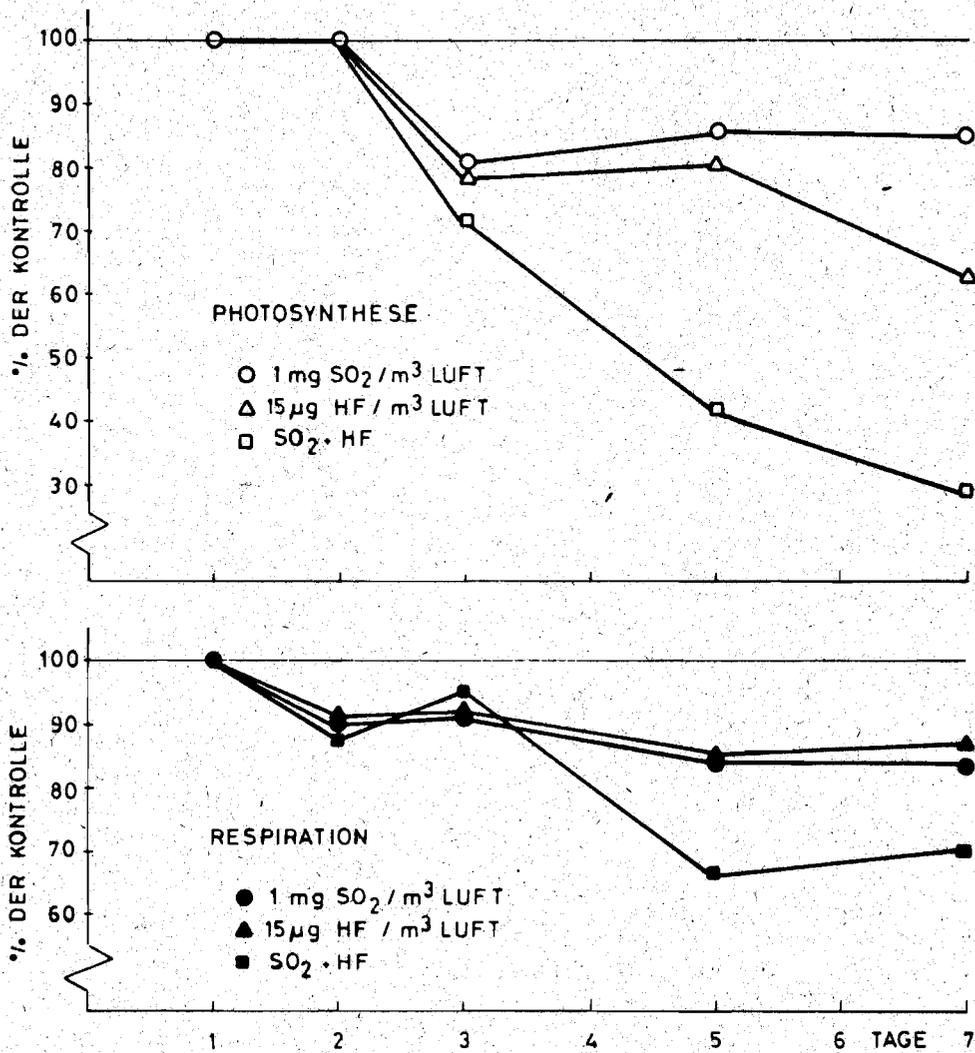


Abb. 36 CO₂-Gaswechsel von *Setaria italica* nach Einwirkung von 15 µg HF/m³ Luft und 1 mg SO₂/m³ Luft bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95 %

Am Ende der Begasung war der Lichtkompensationspunkt der mit den Einzelkomponenten begasten Pflanzen mit einem Wert von 5800 Lux leicht erhöht gegenüber einem Kontrollwert von 5300 Lux (Abb. 37). Der Lichtkompensationspunkt der Pflanzen in der Kombination stieg auf 7400 Lux an.

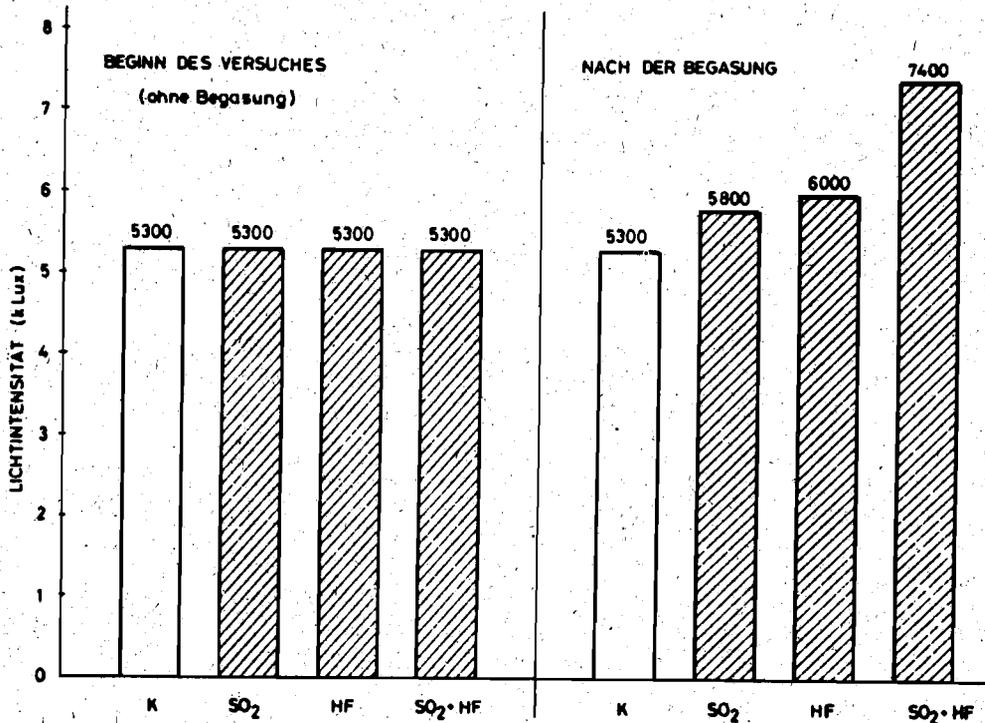


Abb. 37 Änderungen im Lichtkompensationspunkt von *Setaria italica* nach Einwirkung von 15 µg HF/m³ Luft und 1 mg SO₂/m³ Luft bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95 %

Die beschriebenen Untersuchungen an Futterhirse lassen sich wie folgt zusammenfassen: Unter klimatischen Verhältnissen, die in etwa einem Sommertag entsprechen, war in der Kombination sowohl die F- als auch die S-Anreicherung geringer als in den Begasungen mit den jeweiligen Einzelkomponenten. Die Wirkungen auf die Trockensubstanzbildung und die Photosyntheseleistung war dagegen verstärkt. Die Photosyntheseleistung in der Kombination war überadditiv reduziert. Der Lichtkompensationspunkt erhöhte sich unter dem Einfluß von HF und SO₂, wobei dieser Anstieg, in der Kombination wesentlich stärker war.

Alle genannten Reaktionen waren bei hoher oder niedriger Temperatur weniger deutlich ausgeprägt als unter der mittleren Temperatur, zum Teil waren in diesen Temperaturbereichen überhaupt keine signifikanten Abweichungen von den Kontrollwerten festzustellen. So trat weder eine Verminderung in der Trockensubstanz noch eine Veränderung im Lichtkompensationspunkt auf; die Photosyntheseleistung war jedoch in beiden Temperaturstufen reduziert.

Bei hoher Luftfeuchtigkeit war in der Kombination die F-Anreicherung stärker als bei der Begasung mit HF allein. Die gleichzeitige Begasung mit HF und SO₂ verminderte die Trockensubstanzbildung. Der Lichtkompensationspunkt wurde erhöht, die Photosyntheseleistung überadditiv vermindert.

3. Diskussion

Luftqualitätsbeurteilungen für Fluor mit Hilfe standardisierter Pflanzenkulturen setzen die Verwendung möglichst F-resistenter Pflanzenarten voraus, die auch unter hohen Belastungen Fluor noch kontinuierlich aufnehmen. Einflüsse der endogenen und exogenen Wachstums- bzw. Umweltfaktoren müssen in einem auf ein Minimum reduzierten Streubereich bleiben (SCHOLL 1970, SCHOLL 1971, BENNETT und HILL 1973).

Die Weidelgrasart Lolium multiflorum, Sorte Lema, die in dem standardisierten Graskulturverfahren nach SCHOLL (1971) weit verbreitet Anwendung findet, entspricht diesen Anforderungen, in dem sie auch bei hohen HF-Konzentrationen von etwa $30 \mu\text{g HF}/\text{m}^3$ Luft noch voll funktionsfähig bleibt. Daß Lolium multiflorum keine immissionsbedingten Reaktionen zeigte, ist bei der Verwendung dieses Verfahrens zur Überwachung von Belastungsgebieten von besonderer Bedeutung, da diese Reaktionen dann allein von Umweltfaktoren abhängig sind, denen auch die übrigen Pflanzen im Überwachungsgebiet ausgesetzt sind.

In mehreren Untersuchungen bei verschiedenen Konzentrationen in einem Bereich von $1,6 - 32,3 \mu\text{g HF}/\text{m}^3$ Luft konnte nachgewiesen werden, daß die F-Aufnahme bei Lolium multiflorum während einer Expositionszeit von 14 Tagen linear verläuft. Von der Voraussetzung ausgehend, daß über eine bestimmte Zeit Pflanzen Fluor passiv aufnehmen, wäre die oft zitierte Beziehung zwischen Dosis und Aufnahmerate $\Delta F = KCT$ anwendbar, wobei ΔF die Zunahme des F-Gehaltes der Vegetation über dem Normalgehalt hinaus in ppm darstellt; C ist die Durchschnittskonzentration gasförmiger F-Verbindungen in der Luft (in $\mu\text{g HF}/\text{m}^3$); und T entspricht der

Expositionszeit (in Tagen). BRANDT (1971) schlug diese Gleichung vor als eine Möglichkeit zur Abschätzung der Beziehung zwischen der HF-Konzentration in der Luft und der Fluor-Aufnahme von Pflanzen. Hierbei muß berücksichtigt werden, daß K keinesfalls eine Konstante ist, sondern mit der HF-Konzentration, der Expositionszeit sowie mit den Wachstumsfaktoren der jeweiligen Pflanzenart variiert (McCUNE 1969, NAS 1971). Diese Beziehung, obwohl mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, ist in manchen bestimmten Fällen brauchbar (WEINSTEIN 1977). Auf der anderen Seite haben MacLEAN et al. (1969) gezeigt, daß die F-Anreicherung in Futterpflanzen bei äquivalenter Dose nicht immer konstant bleibt, sondern eher von der HF-Konzentration als von der Expositionsdauer abhängig ist.

In eigenen Versuchen mit Lolium multiflorum konnte nachgewiesen werden, daß zwar ein linearer Zusammenhang zwischen Fluor-Aufnahme und Expositionzeit, nicht jedoch zwischen Fluor-Aufnahme und HF-Konzentration besteht. Zu einer Beschreibung der Beziehung zwischen Fluor-Konzentration und Fluor-Aufnahme bei Lolium multiflorum ist die oben angeführte Gleichung somit nicht anwendbar. Die einheitliche Vorgabe der Expositionszeit ist daher wesentlicher Bestandteil des Graskulturverfahrens.

In den hier beschriebenen Untersuchungen über Lolium multiflorum zeigte sich auch eine ausgeprägte Abhängigkeit der Fluor-Aufnahme von dem Pflanzenalter und der Jahreszeit. Hierbei spielten alters- und jahreszeitbedingte Unterschiede in der Wuchsleistung sowie im CO₂-Gaswechsel eine bedeutende Rolle. Vom Frühjahr zum Hochsommer hin hatten die 20 Tage alten Pflanzen nicht nur höhere Werte im Wachstum und CO₂-Gaswechsel als die 30 Tage alten

Pflanzen, sondern auch höhere F-Anreicherungen. Schon in Versuchen von ADAMS et al. (1956) mit Kiefern sowie von HITCHCOCK et al. (1962) mit Gladiolen wurde gezeigt, daß das Pflanzenalter für den Resistenzgrad der Pflanzen gegenüber Fluor von Bedeutung ist, wobei sich jüngere Pflanzen im allgemeinen als empfindlicher erwiesen. Bei der sehr resistenten Grasart Lolium multiflorum nahmen bei gegebener Konzentration die jüngeren, sich schneller entwickelnden Pflanzen weitaus mehr Fluor auf als die älteren. Demnach wären unter länger anhaltenden Belastungen mit höheren Konzentrationen zuerst die in immissionsbedingten Reaktionen an den jüngeren Pflanzen zu erwarten. Das Pflanzenalter ist aus diesen Gründen bei der Anwendung des Graskulturverfahrens stets gleich zu halten. Zur Überwachung von Belasungsgebieten mit HF-Konzentrationen empfiehlt es sich, jüngere Pflanzen zu nehmen, da die dann resultierenden F-Anreicherungen einen besseren Nachweis von Fluor-Immissionen ermöglichen würden.

Neben einem Rückgang im Wachstum zeigte Lolium multiflorum vom Frühjahr zum Hochsommer hin eine Verminderung sowohl im CO₂-Gaswechsel als auch in der F-Aufnahme. Da bei diesen Untersuchungen Temperatur, Luftfeuchtigkeit sowie Lichtangebot konstant gehalten und nicht den für die jeweilige Jahreszeit normalen klimatischen Bedingungen angepaßt wurden, handelt es sich hierbei um endogene jahreszeitliche Rhythmen.

Auf Grund des hohen Resistenzgrades sowie der Linearität der F-Aufnahme von Lolium multiflorum in Abhängigkeit von der Expositionszeit innerhalb einer breiten Spanne von HF-Konzentrationen sind die Voraussetzungen für Vergleiche mit den Reaktionen anderer Pflanzenarten in Hinblick auf die angestrebte Begrenzung der F-Aufnahmerate in der

Graskultur zum Schutz von Pflanzen und Nutztieren gegeben (SCHOLL 1976). Begasungsversuche mit einer Reihe von Nutzpflanzen bei verschiedenen hohen HF-Konzentrationen ergaben, daß die F-Anreicherung in Lolium multiflorum gegenüber der in den anderen Pflanzenarten durchschnittlich doppelt so hoch war, ein Wert, wie er auch in vergleichenden Untersuchungen im Freiland gefunden worden ist (SCHOLL 1976). Aus diesen Erhebungen im Freiland ist eine Begrenzung der F-Aufnahmerate zum Schutz von Vegetation und Weidetieren von SCHOLL (1976) abgeleitet worden. Anhand dieser Werte werden die hier festgestellten Reaktionen von Nutzpflanzen diskutiert, wobei die F-Anreicherungen als Einzelwerte für ein 14-tägiges Meßzeitintervall anzusehen sind.

Wie in anderen Untersuchungen an Buschbohnen (TRESHOW und HARNER 1968) und Tomaten (ADAMS et al. 1957, HILL et al. 1959, MacLEAN et al. 1976) waren auch hier diese Pflanzenarten sehr widerstandsfähig. Im Gegensatz zu den Befunden von TRESHOW und HARNER (1968) wurden keine immissionsbedingten Auswirkungen auf den Zuwachs von Bohnen festgestellt. Selbst Anreicherungen bis zu 970 ppm F in der Trockensubstanz verursachten keine signifikanten Verminderungen der Trockensubstanzbildung. Auswirkungen auf den CO₂-Gaswechsel konnten ebenfalls nicht nachgewiesen werden. MacLEAN et al. (1976) zeigten, daß HF das Wachstum von Tomaten sogar stimulieren kann, wie auch BAUMEISTER und BURGHARDT (1957) an Pflanzen in Wasserkultur feststellten. In eigenen Untersuchungen wurde weder eine Stimulation noch eine Verminderung im Wachstum von Tomaten festgestellt. Bei der hierbei erreichten F-Anreicherung von etwa 480 ppm F blieben auch Auswirkungen auf den CO₂-Gaswechsel aus.

Die von SCHOLL (1976) aufgestellte Begrenzung der F-Aufnahmerate von Lolium multiflorum wird für sehr empfindliche, empfindliche und die übrigen Pflanzenarten unterteilt. Der vorgeschlagene Wert von 160 ppm F in der TS von Lolium multiflorum als Grenzwert für die Gruppe der resistente Pflanzenarten bietet den widerstandsfähigen Buschbohnen und Tomaten einen völligen Schutz. Selbst bei einer deutlichen Überschreitung dieses Wertes ist mit Schäden an diesen Pflanzenarten noch nicht zu rechnen. Die einzelnen Pflanzenarten einer Resistenzgruppe sind naturgemäß durch die vorgeschlagenen Werte unterschiedlich stark geschützt.

So gehört nach den eigenen Befunden auch die Futterhirse zu den weniger empfindlichen Pflanzenarten. Bei Anreicherungen bis zu 500 ppm in der TS wurden weder sichtbare Schädigungen noch Auswirkungen auf den Zuwachs festgestellt. Reaktionen im CO₂-Gaswechsel wurden erst bei Anreicherungen oberhalb von etwa 400 ppm F beobachtet, entsprechend einer Anreicherung von etwa 790 ppm F in Lolium multiflorum. Vermindert war die Photosyntheseleistung, während die Respiration unbeeinflusst blieb. Verminderungen in der Trockensubstanzbildung sind hiernach erst bei sehr hohen F-Anreicherungen zu erwarten.

Mais dagegen gehört zu den empfindlichen Pflanzenarten (NAS 1971, WEINSTEIN 1977), und erste Reaktionen in Form von Chlorosen wurden bei einem F-Gehalt von etwa 100 ppm F in der TS, entsprechend 250 ppm F in Lolium multiflorum festgestellt. In Übereinstimmung mit zahlreichen anderen Untersuchungen (ZIMMERMAN 1951, ADAMS et al. 1957, DAINES et al. 1960, HITCHCOCK et al. 1964) traten keine statistisch nachweisbaren Änderungen im Wachstum auf.

Im CO_2 -Gaswechsel sank die Photosyntheseleistung mit zunehmendem F-Gehalt bis 50 ppm F in der TS ab, um danach wieder anzusteigen. Oberhalb von 100 ppm F in der TS war keine weitere Veränderung im CO_2 -Gaswechsel festzustellen. Bei einem F-Gehalt von 50 ppm F in Mais betrug der F-Gehalt in Lolium multiflorum etwa 100 ppm. Obwohl bis zu diesem Gehalt die Photosyntheseleistung von Mais vermindert wurde, hatte diese Verminderung durch den anschließenden Anstieg keinen Einfluß auf das Pflanzenwachstum. Der von SCHOLL (1976) vorgeschlagene Grenzwert für empfindliche Pflanzenarten von 100 ppm F in Lolium multiflorum reicht zum Schutz von Mais folglich aus.

Zu den sehr empfindlichen Pflanzenarten gehören schließlich Gladiolen (HITCHCOCK et al. 1962, NAS 1971, WEINSTEIN 1977). Diese Pflanzen wiesen stark sortenspezifische Reaktionen auf, wie unter anderen aus den Untersuchungen von HITCHCOCK et al. (1962) bekannt ist. Fluor-Anreicherungen in der Sorte Snow Princess waren etwa 2 mal höher als die in der Sorte Flower Song und weisen auf einen höheren sortenbedingten Resistenzgrad hin. Reaktionen wie Chlorosen, Nekrosen sowie starke Verminderungen der Wuchsleistung und des CO_2 -Gaswechsels traten in Snow Princess ebenfalls bei F-Anreicherungen auf, die doppelt so hoch waren als Anreicherungen in Flower Song, die gleichartige Reaktionen verursachten.

Im Vergleich zu den in der Literatur vorliegenden Anreicherungswerten (ADAMS et al. 1957) liegt die Anreicherung bei den zwei Sorten um etwa 50% niedriger. Diese Abweichungen beruhen offenbar darauf, daß ganze Blätter und nicht nur geschädigte Teile davon für die chemischen Analysen verwendet wurden. Diese Art der Probenahme

ermöglichte einen bessern Vergleich mit den Reaktionen der anderen untersuchten Pflanzenarten. Da Fluor bei Gladiolen bekanntlich in starker Masse zu den Blattspitzen verlagert wird (BENEDICT et al. 1964) traten Verdünnungseffekte durch die unbeeinflusste Pflanzenmasse auf.

Der entsprechende F-Gehalt in Lolium multiflorum betrug bei den angegebenen Anreicherungen in Gladiolen etwa 20 ppm F. Der vorgeschlagene Grenzwert von 50 ppm F in Lolium multiflorum (SCHOLL 1976) liegt also zu hoch, um einen ausreichenden Schutz für diese sehr empfindlichen Pflanzenvarietäten zu gewährleisten.

Die hier untersuchten Nutzpflanzen stellen naturgemäß nur eine sehr geringe Auswahl aus dem Artenspektrum der genannten drei Resistenzgruppen dar. Die gefundenen Reaktionen verdeutlichen, daß die hohe Resistenz und die kontinuierliche Fluor-Aufnahme von Lolium multiflorum gute Voraussetzungen bieten für eine Festlegung von Grenzwerten in Lolium multiflorum zum Schutz der übrigen Vegetation.

Das immissionsbedingte Gefährdungspotential wird wesentlich durch das gleichzeitige Auftreten mehrerer biologisch wirkender Luftverunreinigungen in Belastungsgebieten bestimmt. Da das Graskulturverfahren hauptsächlich in Gebieten mit schwefel- bzw. fluorhaltigen Immissionen verwendet wird, sind Kenntnisse über die Reaktionen von Lolium multiflorum unter dem kombinierten Einfluß von HF und SO₂ vordringlich.

Lolium multiflorum erwies sich als relativ empfindlich gegenüber SO₂, wie auch Untersuchungen von BELL und CLOUGH (1973) an Lolium perenne erwarten ließen. Schädwirkungen oder Auswirkungen auf den CO₂-Gaswechsel

wurden allein in den Behandlungsstufen mit SO_2 festgestellt; HF allein verursachte keine Schädigungen.

In der Kombination von HF und SO_2 waren die F- bzw. S-Anreicherungen im allgemeinen vermindert im Vergleich zu Anreicherungen unter den Einzelkomponenten. Ähnliche Reaktionen wurden auch an Mais, Gladiolen, Luzerne und Knaulgras beobachtet (WEINSTEIN 1977). Dieser Rückgang beruht vermutlich auf Störungen der Stomatafunktionen durch SO_2 . Obwohl die Schadstoffanreicherungen vermindert waren, traten hier die stärksten Wirkungen auf. Im CO_2 -Gaswechsel sind diese Wirkungen besonders deutlich, mit einem Abfall der Photosyntheseleistung bis zu 45%. Der Grad der Verminderungen im CO_2 -Gaswechsel entsprach dem Umfang der Blattschädigung; nur in den Behandlungsstufen mit SO_2 traten solche Reaktionen auf.

Die weniger resistente Futterhirse zeigte ähnliche Reaktionen wie Lolium multiflorum. Hierbei waren bei verminderter F- und S-Anreicherung in der Kombination die Wirkungen auf die Trockensubstanzbildung sowie den CO_2 -Gaswechsel stark ausgeprägt, wobei die Verminderung der Photosyntheseleistung sich in allen Untersuchungen als überadditiv erwies.

Wie in Untersuchungen von MacLEAN und SCHNEIDER (1970) an Gladiolen und WIEBE und POOVAIAH (1973) mit Sojabohnen führte auch hier eine Erhöhung der Temperatur zu einer Zunahme der Schadstoffanreicherung. Ergänzend ergab sich aus den hier beschriebenen Untersuchungen, daß eine Verminderung der Temperatur die Schadstoffanreicherung verringert. Obwohl unter beiden Temperaturstufen die Photosyntheseleistung in der Kombination stark vermindert wurde, konnten keine signifikanten Auswirkungen auf die Trockensubstanzbildung festgestellt werden. Mit steigender

Luftfeuchtigkeit dagegen erhöhte sich nicht nur die Schadstoffaufnahme sondern auch die Schadwirkung, wie auch DAINES et al. (1952) und MacLEAN und SCHNEIDER (1973) fanden.

Der Lichtkompensationspunkt, d.h. die Lichtintensität bei der sich Abgabe und Aufnahme von CO₂ ausgleichen, gibt über den Wirkungsgrad des CO₂-Gaswechsels Aufschluß (GAASTRA 1959, LIETH 1960). Im Gegensatz zu Lolium multiflorum wurden unter den klimatischen Bedingungen von 20°C und einer relativen Feuchtigkeit von 75% bei der Futterhirse immissionsbedingte Erhöhungen im Lichtkompensationspunkt festgestellt. In der Kombination war diese Verschiebung, wie auch die Verminderung in der Photosyntheseleistung, überadditiv. Änderungen im Lichtkompensationspunkt wurden jedoch früher beobachtet als die Auswirkungen auf den CO₂-Gaswechsel. Temperaturen von 30° bzw. 10°C führten in allen Behandlungsstufen zu einer Erhöhung des Lichtkompensationspunktes, ohne daß immissionsbedingte Unterschiede festgestellt wurden.

Untersuchungen über Kombinationswirkungen von HF und SO₂ haben gezeigt, daß die Anwesenheit von SO₂ zu einer erhöhten Schadwirkung an Lolium multiflorum führen kann. Im Hinblick auf das Graskulturverfahren ist hier der Einfluß auf die F-Anreicherung und die verstärkten Auswirkungen auf den CO₂-Gaswechsel sowie die Trockensubstanzbildung bei Lolium multiflorum besonders hervorzuheben. Daß Kombinationen von HF und SO₂ zu verstärkten Auswirkungen auf die Reaktionen von Pflanzen führen können, ergibt sich aus den Untersuchungen mit Futterhirse. Da jedoch bisher wenig über solche Auswirkungen bekannt ist, sind noch ausführlichere Untersuchungen über Kombinationswirkungen notwendig, um exakte Vergleiche der Reaktionen von Lolium multiflorum mit denen anderer Nutzpflanzen zu ermöglichen.

4. Zusammenfassung

Das von SCHOLL (1971) entwickelte Graskulturverfahren unter Verwendung der Weidelgrasart Lolium multiflorum, Sorte Lema als biologisches Meßobjekt hat sich zur Ermittlung und Beurteilung von Gefährdungen von Pflanzen und Nutztieren durch Fluorwasserstoff als besonders geeignet erwiesen.

In der vorliegenden Arbeit wird über Begasungsversuche mit Fluorwasserstoff berichtet, die das Ziel hatten, die Grundlagen zur Beurteilung der Möglichkeiten und Grenzen des Graskulturverfahrens zu erweitern. Um Unterlagen über die Beziehungen zwischen der F-Anreicherung in der Graskultur und der Gefährdung anderer Pflanzenarten zu erhalten, wurden vergleichende Untersuchungen mit verschiedenen Nutzpflanzen durchgeführt. Infolge der heute weit verbreiteten Emittentendichte, sind Kombinationswirkungen durch das gleichzeitige Auftreten mehrerer Komponenten zu erwarten. Da Schwefeldioxid in Belastungsgebieten am häufigsten vorkommt, waren auch Untersuchungen über die Kombinationswirkungen von HF und SO₂ Gegenstand dieser Arbeit.

Die Versuchspflanzen wurden in einer speziell hierfür entwickelten Begasungsanlage verschieden hohen HF-Konzentrationen ausgesetzt. Temperatur, Luftfeuchtigkeit sowie Lichtintensität und Beleuchtungsdauer ließen sich in den erforderlichen Bereichen regeln. Die Versuche über die Kombinationswirkungen von HF und SO₂ wurden in einer Klimakammer unter Verwendung einer aus 4 Einzelküvetten bestehenden Versuchsanlage durchgeführt. Für die Herstellung von HF-Konzentrationen wurde eine Dosierungsanlage entwickelt, die nach dem Prinzip der Ver-

dampfung einer HF-Lösung arbeitet und mit der die vorgegebenen Fluorwasserstoffkonzentrationen in einem geringen Streubereich gehalten werden konnten.

Zur Kennzeichnung immissionsbedingter Wirkungen dienten neben der Fluor-Anreicherung im Pflanzenmaterial äußere Schädigungsmerkmale sowie Auswirkungen auf den Gaswechsel und den Zuwachs. Bei den Untersuchungen über Kombinationswirkungen wurden zusätzlich die Auswirkungen auf den Lichtkompensationspunkt geprüft.

Lolium multiflorum erwies sich als sehr widerstandsfähig. Selbst bei der höchsten Konzentration von $23,6 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft traten keine Änderungen in der äußeren Beschaffenheit der Pflanzen auf. Signifikante Auswirkungen wurden weder im CO_2 -Gaswechsel noch beim Zuwachs festgestellt. Deutlich waren jedoch die jahreszeit- und altersbedingten Schwankungen im Wachstum und im Gaswechsel. Im allgemeinen zeigten die 20 Tage alten Pflanzen eine stärkere Wuchsleistung als die 30 Tage alten. Der jahreszeitbedingte Rückgang in der Photosyntheseleistung vom Frühjahr zum Hochsommer hin spiegelt sich in der Wuchsleistung beider Altersgruppen wider.

Die Fluor-Aufnahme verlief bei allen Konzentrationen und in beiden Altersgruppen linear während der Versuchsdauer von 14 Tagen. Die jüngeren Pflanzen reicherten wesentlich mehr Fluor an als die älteren.

In vergleichenden Untersuchungen mit verschiedenen Nutzpflanzen ergab sich folgende Resistenzreihe: Gladiolen < Mais < Futterhirse < Buschtomaten < Buschbohnen < Weidelgras. Die F-Aufnahme verlief außer bei Futterhirse bei allen Pflanzenarten linear während der Begasungszeit;

ihre F-Anreicherung war im allgemeinen um rund 50 % geringer als bei Lolium multiflorum. Bei Buschbohne und Buschtomate wurden keine immissionsbedingten Änderungen festgestellt. Die Photosyntheseleistung von Futterhirse wurde vermindert und die Respiration leicht erhöht, Auswirkungen auf den Zuwachs und die äußere Beschaffenheit traten nicht auf. Mais zeigte leichte Nekrosen bei einer Konzentration von $22,8 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft, gleichzeitig waren Photosyntheseleistung und Trockensubstanzbildung vermindert. Gladiolen wiesen unter einer Konzentration von $0,67 \mu\text{g HF/m}^3$ Luft starke Nekrosen auf. Photosynthese und Trockensubstanzbildung fielen bei erhöhter Respiration stark ab.

In den Untersuchungen über Kombinationswirkungen an Lolium multiflorum bei einer HF-Konzentration von $15 \mu\text{g HF/m}^3$ und einer SO_2 -Konzentration von $1 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Luft traten nur in den Behandlungsstufen mit SO_2 Schädwirkungen auf. Anreicherungen von F und S waren in der Kombination geringer als in den Begasungen mit den Einzelkomponenten. Auswirkungen auf den Lichtkompensationspunkt ließen sich nicht feststellen. Auch in den Untersuchungen mit Futterhirse wirkte sich SO_2 stärker auf die Trockensubstanzbildung sowie den CO_2 -Gaswechsel als HF aus. Bei gleichzeitiger Einwirkung von HF und SO_2 war der CO_2 -Gaswechsel überadditiv vermindert, obwohl, wie auch bei Lolium multiflorum, die F- und S-Anreicherungen geringer waren als unter den Einzelkomponenten. Der Lichtkompensationspunkt war in allen Begasungsstufen erhöht.

5. Literaturverzeichnis

- ADAMS, D.F.
SHAW, C.G.
GNAGY, R.M.
KOPPE, R.K.
MAYHEW, D.J. und
YERKES, W.D. 1956: Relationship of atmospheric fluoride levels and injury indexes on gladiolus and ponderosa pine.
J. Agr. Food Chem. 4, 64-66
- ADAMS, D.F.
HENDRIX, J.W. und
APPLEGATE, H.G. 1957: Relationship among exposure periods, foliar burn, and fluorine content of plants exposed to hydrogen fluoride.
J. Agr. Food Chem. 5, 108-116
- ACDE, G. und
KRAUSE, H.F. 1927: Untersuchungen über das Verhalten von Fluoridzusätzen zu Gläsern und Emails. III. Untersuchungen über die Ursachen des Fluorverlustes beim Erschmelzen von Gläsern und Emails mit Fluoridzusätzen.
Z. Angew. Chem. 40, 886-895
- APPLEGATE, H.G. und
ADAMS, D.F. 1960: Effect of atmospheric fluoride on respiration of bush beans
Bot. Gazette 121, 223-227
- APPLEGATE, H.G. und
ADAMS, D.F. 1960: "Invisible injury" of bush beans by atmospheric and aqueous fluorides.
Intl. J. Air Pollut. 4, 231-248
- APPLEGATE, H.G.
ADAMS, D.F. und
CARRIKER, R.C. 1960: Effect of aqueous fluoride solutions on respiration of intact bush bean seedlings. I. Inhibition and stimulation of oxygen uptake.
Am. J. Bot. 47, 339-345
- ARNDT, U.
STRAMPLAT, W. und
KRAUTSCHEID, S. 1973: Aufbau und Funktion eines Klimakammersystems für Begasungsexperimente.
Schriftenr. d. Landesanst. f. Immissionsschutz 29, 49-57
- BALLANTYNE, D.J. 1972: Fluoride inhibition of the Hill reaction in bean chloroplasts.
Atmos. Environ. 6, 267-273

- BAUMEISTER, W. und
BURCHARDT, H. 1957: Die Bedeutung der Elemente
Zink und Fluor für das
Pflanzenwachstum.
Forschungsber. Wirtsch.
Verkehrsministeriums Nordrhein-
Westfalen Nr. 388
- BELL, J.N.B. und
CLOUGH, W.S. 1973: Depression of yield in
ryegrass exposed to sulphur
dioxide.
Nature 241, 47-49
- BENEDICT, H.M.
ROSS, J.M. und
WADE, R.W. 1964: The disposition of atmospheric
fluorides by vegetation.
Intl. J. Air Water Pollut.
8, 279-289
- BENNETT, J.H. und
HILL, A.C. 1973: Inhibition of apparent
photosynthesis by air
pollutants.
J. Environ. Qual. 2, 526-530
- BOHNE, H. 1962: Industrielle Rauchschiiden
durch Fluor.
Mitt. Deut. Landwirt.-Ges.
(Frankfurt/M) 77, 575-578
- BOHNE, H. 1964: Fluor Emissionen und Tunnel-
ofen.
Staub 24, 261-265.
- BOHNE, H. 1970: Fluorides and sulfur dioxide
as causes of plant damage.
Fluoride, Quart. Rep.,
3, 137-142
- BOTTLÄNDER, W. 1966: Technische Hilfsmittel zur
Erzeugung und Ermittlung
optimaler Lebensbedingungen
für Pflanzen.
Die Bodenkultur 17, 195-236
- BRANDT, C.J. und
RHOADES, R.W. 1972: Effects of limestone dust
accumulation on composition
of a forest community.
Environ. Pollut. 3, 217-225
- BRANDT, C.J. und
RHOADES, R.W. 1973: Effects of limestone dust
accumulation on lateral growth
of forest trees.
Environ. Pollut. 4, 207-213

- BRANDT, C.S. und
HECK, W.W. 1968: Effects of air pollutants on
vegetation.
In: Air Pollution, Vol. 1
Ed.: A.C. Stern, 401-443
- BRANDT, C.S. 1971: Ambient air quality criteria
for hydrofluorine and fluorides.
VDI-Ber., Heft 164, 23-31
- BREDEMANN, G. 1956: Biochemie und Physiologie des
Fluors.
Akademie-Verlag, Berlin
- BREWER, R.F.
CREVELING, R.K.
GUILLEMET, F.B. und
SUTHERLAND, F.H. 1960: The effects of hydrogen fluoride
gas on seven citrus varieties.
Proc. Am. Soc. Hort. Sci.
74, 236-243
- BREWER, R.F.
GARBER, M.J.
GUILLEMET, F.B. und
SUTHERLAND, F.H. 1967: The effects of accumulated
fluoride on yields and fruit
quality of "Washington" navel
oranges.
Proc. Am. Soc. Hort. Sci.
91, 150-156
- BREWER, R.F.
SUTHERLAND, F.H. und
GUILLEMET, F.B. 1969: Effects of various fluoride
sources on citrus growth and
fruit production.
Environ. Sci. Tech. 3, 378-381
- BUCK, M. und
STRATMANN, H. 1965: Ein Verfahren zur Bestimmung
sehr geringer Konzentrationen
von Fluor-Ionen in der
Atmosphäre.
Brennstoff-Chemie 46, 231-235
- BUCK, M. und
REUSMANN, G. 1971: A new semiautomatic method for
fluoride determination in plant
and air samples.
Fluoride 4, 5-15
- BULL, J.N. und
MANSFIELD, T.A. 1974: Photosynthesis in leaves
exposed to SO₂ and NO₂.
Nature 250, 443-444
- CHANG, C.W. und
THOMPSON, C.R. 1966: Effect of fluoride on nucleic
acids and growth in germinating
corn seedling roots.
Physiologia Plantarum 19, 911-918

- CHANG, C.W. 1967: Study of phytase and fluoride effects in germinating corn seeds.
Cereal Chem. 44, 129-142
- CHUNG, C.W. und NICKERSON, W.J. 1954: Polysaccharide syntheses in growing yeast.
J. Biol. Chem. 208, 395-407
- CHRISTIANI, H. und GAUTIER, R. 1925: Emanations fluorées des usines. Etude expérimentale de l'action du fluor sur les végétaux.
Ann. Hyg. Pub. Ind. Soc. 3, 49-64
- CHRISTIANSEN, G.S. und THIMANN, K.V. 1950: The metabolism of stem tissue during growth and its inhibition. II. Respiration and ether-soluble material.
Arch. Biochem. 26, 248-259
- DAINES, R.H. 1952: The effect of fluorine on plants as determined by soil nutrition and fumigation studies.
In: Air Pollution
Ed.: L.D. McCabe, 97-104
- LEONE, I. und BRENNAN, E.
- DAINES, R.H. 1960: Air pollution as it affects agriculture in New Jersey.
N.J. Agr. Expt. Sta. Bull. Nr. 794
- LEONE, I.A. und BRENNAN, E.
- DAMMAN, C. und MANEGOLD, O. 1904: Vergiftungen durch fluorhaltigen phosphorsauren Futterkalk.
Deutsche tierärztl. Wchnschr. 12, 129-131, 141-143
- DE ONG, E.R. 1946: Injury to apricot leaves from fluorine deposit.
Phytopath. 36, 469-472
- DOCHINGER, L.S. 1970: Chlorotic dwarf of eastern white pine caused by ozone and sulfur dioxide interaction.
Nature 225, 476
- BENDER, F.W.
FOX, F.O. und HECK, W.W.

- FAES, H. 1921: Les dommages causées aux cultures par les usines d'électrochimie. Diplomarbeit
Lausanne: Payot et Cie 107 S.
- GAASTRA, P. 1959: Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature, and stomatal diffusion resistance. Meded. Landbouwhogeschool, Wageningen 59, 1-68
- GARBER, K. 1967: Über den Fluorgehalt der Pflanzen. Qual. Plant. et Mater. Veg. 15, 29-36
- GARBER, K.
GUDERIAN, R. und
STRATMANN, H. 1967: Untersuchungen über die Aufnahme von Fluor aus dem Boden durch Pflanzen. Qual. Plant. et Mater. Veg. 15, 223-236
- GUDERIAN, R.
van HAUT, H. und
STRATMANN, H. 1969: Experimentelle Untersuchungen über pflanzenschädigende Fluorwasserstoff-Konzentrationen. Forschber. d. Landes NW Heft 2017, 1-54
- GUDERIAN, R. und
THIEL, K. 1973: Versuchsanlage zur Ermittlung immissionsbedingter Kombinationswirkungen an Pflanzen. Schriftenr. d. Landesanst. f. Immissionsschutz 29, 61-64
- GUDERIAN, R.
KRAUSE, G.H.M. und
KAISER, H. 1977: Untersuchungen zur Kombinationswirkung von Schwefeldioxid und schwermetallhaltigen Stäuben auf Pflanzen. Schriftenr. d. Landesanst. f. Immissionsschutz 40, 23-30
- HAAGEN-SMIT, A.J.
DARLEY, E.F.
ZAITLIN, M.
HULL, H. und
NOBLE, W. 1952: Investigation on injury to plants from air pollution in the Los Angeles area. Plant Physiol. 27, 18-34

- HAMIG, W.H.
SCHIFFNER, G. und
WISLICENUS, H. 1913: Bericht über die zur
Beseitigung von Ziegelei-
rauchschäden im Auftrage des
Kgl. Sächs. Finanzministeriums
vorgenommenen Versuche, 1911,
1912, 1913.
Jahrb. Berg- u. Hüttenwesen
Königreich Sachsen, A47-A86
- HANSEN, E.D.
WIEBE, H.H. und
THORNE, W. 1958: Air pollution with relation
to agronomic crops. VII.
Fluoride uptake from soils.
Agron. J. 50, 565-568
- HAUT, H., VAN 1972: Testkammerverfahren zum
Nachweis phototoxischer
Immissionskomponenten.
Environ. Pollut. 3, 123-132
- HAUT, H., VAN 1975: Experimentelle Untersuchungen
an Pflanzen zur Ermittlung
von Luftqualitätskriterien.
Schriftenr. d. Landesanst. f.
Immissionsschutz 33, 39-43
- HECK, W.W. 1968: Effects of oxidants and
pollutants.
J. Occup Med. 10, 496-499
- HILL, A.C.
TRANSTRUM, L.G.
PACK, M.R. und
WINTERS, W.S. 1958: Air pollution with relation to
agronomic crops. VI. An
investigation of the "Hidden
Injury" theory of fluoride
damage to plants.
Agron. J. 50, 562-565
- HILL, A.C.
PACK, M.R.
TRANSTRUM, L.G. und
WINTERS, W.S. 1959: Effects of atmospheric
fluorides and various types
of injury on the respiration
of leaf tissue.
Plant Physiol. 34, 11-16
- HILL, A.C. 1969: Air quality standards for
fluoride vegetation effects.
JAPCA 19, 331-336
- HITCHCOCK, A.E.
ZIMMERMAN, P.W. und
COE, R.R. 1962: Results of ten years' work
(1951-1960) on the effect of
fluorides on gladiolus.
Contrib. Boyce Thompson Inst.
21, 303-344

- HITCHCOCK, A.E.
WEINSTEIN, L.H.
McCUNE, D.C. und
JACOBSON, J.S. 1964: Effects of fluorine compounds
on vegetation, with special
reference to sweet corn.
JAPCA 14, 503-508
- HITCHCOCK, A.E.
McCUNE, D.C.
WEINSTEIN, L.H.
MacLEAN, D.C.
JACOBSON J.S. und
MANDL, R.H. 1971: Effects of hydrogen fluoride
fumigation on alfalfa and
orchard grass: A summary of
experiments from 1952 through
1965.
Contrib. Boyce Thompson Inst.
24, 363-386
- HUPKA, E. und
YUY, P. 1929: Gehäuftes Auftreten von
Osteomalacie unter Weide-
rindern verursacht durch
Fluorwasserstoffsäure
enthaltenden Fabrikrauch.
Arch. wissensch. u. prakt.
Tierheilk. 60, 21-39
- ISRAEL, G.W. 1974: Evaluation and comparison of
three atmospheric fluoride
monitors under field conditions.
Atmos. Environ. 8, 159-166.
- JACOBSON, J.S.
WEINSTEIN, L.H.
McCUNE, D.C. und
HITCHCOCK, A.E. 1966: The accumulation of fluorine
by plants.
JAPCA 16, 412-417
- JACOBSON, J.S. und
WEINSTEIN, L.H. 1977: Sampling and analysis of
fluoride: Methods for ambient
air, plant and animal tissues,
water, soil, and foods.
J. Occup. Med. 19, 79-87
- JAMES, W.O. 1953: The use of respiratory
inhibitors.
Ann. Rev. Plant Physiol.
4, 59-90
- KIELLEY, W.W. und
MEYERHOF, O. 1948: Studies on adenosine-tri-
phosphatase of muscle. II.
A new magnesium activated
adenosinetriphosphatase.
J. Biol. Chem. 176, 591-601
- KOTTE, W. 1929: Rauchschiiden an Steinobst-
Fruchten.
Nachrichtenbl. deutsch.
Pflanzenschutzdienst
9, 91-92

- KRAUSE, G.H.M. 1975: Phytotoxische Wechselwirkungen zwischen Schwefeldioxid und den Schwermetallen Zink und Cadmium. Schriftenr. d. Landesanst. f. Immissionsschutz Heft 34, 86-91
- KRAUSE, G.H.M. und KAISER, H. 1977: Plant response to heavy metals and sulphur dioxide. Environ. Pollut. 12, 63-71
- LEONARD, C.D. und GRAVES, H.B. 1972: Effect of fluoride air pollution on Florida citrus. Fluoride 5, 145-163
- LIETH, H. 1960: Über den Lichtkompensationspunkt der Landpflanzen I. und II. Planta 54, 530-576
- LOVELACE, C.J. und MILLER, G.W. 1967: In vitro effects of fluoride on tricarboxylic acid cycle dehydrogenases and oxidative phosphorylation. I. J. Histochem. Cytochem. 15, 195-201
- LOVELACE, C.J. und MILLER, G.W. 1967: Histochemical investigations on the in vivo effects of fluoride on tricarboxylic acid cycle dehydrogenases from Pelargonium zonale. II. J. Histochem. Cytochem. 15, 202-206
- LUSTINEC, J. 1960: Respiratory pathways in gibberellin treated wheat. The effect of fluoride on the respiration rate. Biol. Plant. 2, 223-226
- KREKULE, J. und POKORNA, V. 1962: Activation of glycolysis and inhibition of glucose transport into leaves by fluoride. Biol. Plant. 4, 126-130
- LUSTINEC, J. 1955: Fate and effects of hydrofluoric acid added to four Tennessee soils in a 4-year lysimeter study. Agric. Food Chem. 3, 777-782
- POKORNA, V. und RUZICKA, J. 1955: Fate and effects of hydrofluoric acid added to four Tennessee soils in a 4-year lysimeter study. Agric. Food Chem. 3, 777-782
- MacINTIRE, W.H. 1955: Fate and effects of hydrofluoric acid added to four Tennessee soils in a 4-year lysimeter study. Agric. Food Chem. 3, 777-782
- STERGES, A.J. und SHAW, W.M. 1955: Fate and effects of hydrofluoric acid added to four Tennessee soils in a 4-year lysimeter study. Agric. Food Chem. 3, 777-782

- MacLEAN, D.C.
WEINSTEIN, L.H. und
MANDL, R.H. 1967: Continuous monitoring of high concentrations of atmospheric fluoride. Controb. Boyce Thompson Inst. 24, 9-10
- MacLEAN, D.C.
ROARK, O.F.
FOLKERTS, G. und
SCHNEIDER, R.E. 1969: Influence of mineral nutrition on the sensitivity of tomato plants to hydrogen fluoride. Environ. Sci. Tech. 3, 1201-1204
- MacLEAN, D.C.
SCHNEIDER, R.E. und
WEINSTEIN, L.H. 1969: Accumulation of fluoride by forage crops. Contrib. Boyce Thompson Inst. 24, 165-166
- MacLEAN, D.C. und
SCHNEIDER, R.E. 1970: Fluoride phytotoxicity: Its alteration by temperature. Proc. 2. Int. Clean Air Cong. Washington, D.C., Dez. 6-11, 292-295
- MacLEAN, D.C. und
SCHNEIDER, R.E. 1973: Fluoride accumulation by forage: Continuous vs. intermittent exposures to hydrogen fluoride. J. Environ. Qual. 2, 501-503
- MacLEAN, D.C.
SCHNEIDER, R.E. und
McCUNE, D.C. 1976: Fluoride susceptibility of tomato plants as affected by magnesium nutrition. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 101, 347-352
- MANDL, R.H.
WEINSTEIN, L.H.
WEISKOPF, G.J. und
MAJOR, J.L. 1970: The separation and collection of gaseous and particulate fluorides. Proc. 2. Int. Clean Air Cong. Washington, D.C., Dez. 6-11, 450-458
- MANDL, R.H.
O'NEILL, M.C. und
WEINSTEIN, L.H. 1974: The effect of ozone on the phytotoxicity of sulfur dioxide for alfalfa. Plant Physiol. Ann. Suppl. June, Ref. Nr. 168
- MANDL, R.H.
WEINSTEIN, L.H. und
KEVENY, M. 1975: Effects of hydrogen fluoride and sulfur dioxide alone and in combination on several species of plants. Environ. Pollut., im Druck

- MASSART, L. und
DUFAYT, R. 1942: Über die KCN- und NaF-
Hemmung der Gärung mit
besonderer Berücksichtigung
der Metalle als Aktivatoren
der Fermente.
Z. physiol. Chem. Hoppe-Seyler's
272, 157-170
- MATSUSHIMA, J. und
BREWER, R.F. 1972: Influence of sulfur dioxide
and hydrogen fluoride as a
mix or reciprocal exposure
on citrus growth and devel-
opment.
JAPCA 22, 710-713
- MAYERHOFER, J. 1891: Über Pflanzenbeschädigungen,
veranlaßt durch den Betrieb
einer Superphosphatfabrik.
Ber. 10. Versamml. Bayr.
Vertreter Angew. Chem.
Augsburg, 127 S.
- McCUNE, D.C.
DeHERTOGH, A.A. und
WEINSTEIN, L.H. 1967: Effect of HF fumigation on
¹⁴C-glucose metabolism.
In: Abstracts of Papers,
153. Meeting, Amer. Chem.
Soc., Miami Beach, Florida,
April 9-14, T-15, Abstract 15
- McCUNE, D.C. 1969: Fluoride criteria for
vegetation reflect the
diversity of plant kingdom.
Environ. Sci. Tech. 3, 720-725
- McCUNE, D.C. und
HITCHCOCK, A.E. 1970: Fluoride in forage: Factors
determining its accumulation
from the atmosphere and
concentration in the plant.
Proc. 2. Int. Clean Air Cong.
Washington, D.C., Dez. 6-11,
289-292
- McCUNE, D.C. 1975: persön. Mitt.
- McGLENDON, J.F. und
GERSHON-COHEN, J. 1955: Reduction of dental caries
and goiter by crops fertilized
with fluorine and iodine.
J. Agr. Food Chem. 3, 72-73

- McLAUGHLIN, S.B. und BARNES, R.L. 1975: Effects of fluoride on photosynthesis and respiration of some south-east American forest trees. Environ. Pollut. 8, 91-96
- McNULTY, I.B. und NEWMAN, D.W. 1956: The effects of a lime spray on the respiration rate and chlorophyll content of leaves exposed to atmospheric fluorides. Utah Acad. Sci. Proc. 33, 73-79
- McNULTY, I.B. und NEWMAN, D.W. 1957: Effects of atmospheric fluoride on respiration rate of bush bean and gladiolus leaves. Plant Physiol. 32, 121-124
- McNULTY, I.B. 1959: The influence of fluoride on leaf respiration. Proc. 9. Int. Bot. Cong., Vol. 2, 245
- McNULTY, I.B. und NEWMAN, D.W. 1961: Mechanism(s) of fluoride induced chlorosis. Plant Physiol. 36, 385-388
- MELCHIOR, N. und MELCHIOR, J.B. 1956: Inhibition of yeast hexokinase by fluoride ion. Science 124, 402-403
- MENSER, H.A. und HEGGESTAD, H.E. 1966: Ozone and sulfur dioxide synergism; injury to tobacco plants. Science 153, 424-425
- MIDDLETON, J.T. 1958: Damage to vegetation from polluted atmospheres. JAPCA 8, 9-15
- DARLEY, E.F. und BREWER, R.F.
- MILLER, G.W. 1958: Properties of enolase in extracts from pea seeds. Plant Physiol. 33, 199-206
- MITCHELL, H.H. und EDMAN, M. 1945: Fluorine in soils, plants, and animals. Soil Sci. 60, 81-90

- MOHAMED, A.H.
APPLEGATE, H.G. und
SMITH, J.D. 1966: Cytological reactions
induced by sodium fluoride
in *Allium cepa* root tip
chromosomes.
Can. J. Genet. Cytol.
8, 241-244
- MOHAMED, A.H.
SMITH, J.D. und
APPLEGATE, H.G. 1966: Cytological effects of
hydrogen fluoride on tomato
chromosomes.
Can. J. Genet. Cytol.
8, 575-583
- MOHAMED, A.H. 1969: Cytogenetic effects of
hydrogen fluoride on plants.
Fluoride 2, 76-84
- NAS 1970: Fluorides. Biologic effects
of atmospheric pollutants.
Nat. Acad. Sci. (Wash.)
- NEWMAN, D.W. und
McNULTY, I.B. 1957: The effects of fluoride
fumigation on the chloro-
phyll content of leaves.
Plant Physiol. 32 (Suppl.),
vii (abstract)
- NEWMAN, D.W. und
McNULTY, I.B. 1959: Fluoride effects on chloro-
plast pigments.
Proc. 9. Int. Bot. Cong.,
Vol. 2, 281 (abstract).
- OST, H. 1896: Untersuchung von Rauchschäden.
Chem. Ztg. 20, 165-171
- OST, H. 1907: Der Kampf gegen schädliche
Industriegase.
Z. angew. Chem. 20, 1689-1693
- PILET, P.E. 1963: Action du fluor et de l'acide
 β -indolylacétique sur la
respiration de disques de
feuilles.
Bull. Soc. Vaudoise Sci.
Natur 68, 359-360
- POOVAIAH, B.W. und
WIEBE, H.H. 1969: Tylosis formation in response
to fluoride fumigation of
leaves.
Phytopath. 59, 518-519

- REINERT, R.A.
HEAGLE, A.S.
MILLER, J.R. und
GECKELER, W.R. 1970: Field studies of air pollution injury to vegetation in Cincinnati, Ohio. Plant Dis. Rep. 54, 8-11
- REUSMANN, G. und
WESTPHALEN, J. 1969: Ein elektrometrisches Verfahren zur Bestimmung des Fluorgehaltes im Pflanzenmaterial. Staub 29, 413-415
- REUSMANN, G. und
WESTPHALEN, J. 1976: Ein mechanisiertes Verfahren zur Bestimmung von Gesamtschwefel und Chlorid in Pflanzenmaterial. Schriftenr. d. Landesanst. f. Immissionsschutz, 37, 123-128
- REUSMANN, G. und
STRAMPLAT, W. 1977: in Vorbereitung.
- RHODE, A. 1895: Schädigung von Roggenfeldern durch die einer Superphosphatfabrik entströmenden Gase. Z. Pflanzenkr. 5, 135-136
- ROHOLM, K. 1934: Fluorose der Schafe auf Island nach Vulkanausbrüchen? Arch. wissenschaft. u. prakt. Tierheilk. 67, 420-435
- ROSS, C.W.
WIEBE, H.H. und
MILLER, G.W. 1962: Effect of fluoride on glucose catabolism in plant leaves. Plant Physiol. 37, 305-309
- ROSS, C.W.
WIEBE, H.H.
MILLER, G.W. und
HURST, R.L. 1968: Respiratory pathway, flower color, and leaf area of gladiolus as factors in the resistance to fluoride injury. Bot. Gazette 129, 49-52
- SCHOLL, G. 1971: Ein biologisches Verfahren zur Bestimmung der Herkunft und Verbreitung von Fluorverbindungen in der Luft. Landwirtschaftl. Forsch. 26 (1. Sonderheft), 29-35

- SCHOLL, G.
KAISER, H. und
RUDOLPH, H. 1971: Technische Anleitung für das
Verfahren der Weidelgras-
Kultur zur Bestimmung der
Immissionsrate von Fluor.
Forschber. d. Landesanst. f.
Immissionsschutz
- SCHOLL, G. 1972: Ein biologisches Verfahren
zum Nachweis von Fluorver-
bindungen in Immissionen.
Mitt. d. forst. Bundes-
Versuchsanst, Wien, Heft 97,
255-269
- SCHOLL, G. und
SCHÖNBECK, H. 1973: Untersuchungen zur Erstellung
eines Wirkungskatasters für
Luftverunreinigungen in
Nordrhein-Westfalen.
Proc. 3. Int. Clean Air Cong.
Düsseldorf, A98-A103
- SCHOLL, G. und
SCHÖNBECK, H. 1974: Erhebungen über Immissions-
raten und Wirkungen von
Luftverunreinigungen im
Rahmen eines Wirkungskatasters.
Schriftenr. d. Landesanst. f.
Immissionsschutz, Heft 33, 73-
80
- SCHOLL, G. 1976: Vorschläge für die Begrenz-
ung der Aufnahme von
Fluorid in standardisierter
Graskultur zum Schutz von
Pflanzen und Weidetieren.
Schriftenr. d. Landesanst. f.
Immissionsschutz, Heft 37, 129-
132
- SHUPE, J.L. und
OLSON, A.E. 1971: Clinical aspects of fluorosis
in horses.
J. Amer. Vet. Med Assc. 158,
167-174
- SMITH, B.N. 1961: The effects of fluorides on
basic plant processes.
Diplomarbeit, Univ. of Utah,
Salt Lake City

- SPIERINGS, F.H. und
WOLTING, H.G. 1971: Der Einfluß sehr niedriger
HF-Konzentrationen auf die
Länge der Blattspitzen-
Schädigung und den Zwiebel-
ertrag bei der Tulpenvarietät
"Paris".
VDI-Berichte 164, 19-21
- STAHL, W. 1927: Rauchschäden durch Fluor-
verbindungen.
Metall Erz. 24, 338
- SUTTIE, J.W. 1964: Effects of inorganic fluor-
ides on animals.
JAPCA 14, 461-464
- SUTTIE, J.W. 1969: Air quality standards for the
protection of farm animals
from fluorides.
JAPCA 19, 239-242
- THOMAS, M.D. und
HENDRICKS, R.H. 1956: Effect of air pollution on
plants.
In: Air Pollution Handbook
Eds.: P.L. Magill, F.R.
Holden, C. Ackley. 9-44
- THOMAS, M.D. und
ALTHER, E.W. 1966: The effects of fluoride on
plants.
In: Handbook of Exp. Pharmacol.
Eds.: O. Eichler, A. Farah, H.
Herken, A. Welch, F. Smith.
Vol. 20, Part 1, 231-306
- TINGEY, D.T.
REINERT, R.A.
DUNNING, J.A. und
HECK, W.W. 1971: Vegetation injury from the
interaction of nitrogen
dioxide and sulfur dioxide.
Phytopath. 61, 1506-1511
- TINGEY, D.T.
REINERT, R.A.
DUNNING, J.A. und
HECK, W.W. 1973: Foliar injury responses of
eleven plant species to
ozone/sulfur dioxide mixtures.
Atmos. Environ. 7, 201-208
- TRESHOW, M. und
HARNER, F.M. 1968: Growth responses of Pinto
bean and alfalfa to sub-
lethal fluoride concentra-
tions.
Can. J. Bot. 46, 1207-1210

- TRESHOW, M. und
PACK, M.R. 1970: Fluoride.
In: Recognition of air
pollution injury to veg-
etation: A pictorial atlas.
Eds.: J. Jacobson, A.C. Hill
D1-D6
- WALLIS, W.J.
MILLER, G.W.
PSENAK, M. und
SHIEH, J. 1974: Fluoride effects on chloro-
phyll biosynthesis in
Nicotiana tabacum.
Fluoride 7, 69-77
- WANG, T.H.
LIN, C.S.
WU, C. und
LIAO, C. 1949: The fluorine content of
Fukien tea.
Food Res. 14, 98-103
- WARBURG, O. und
CHRISTIAN, W. 1942: Isolierung und Kristallisation
des Gärungsferment Enolase.
Biochem. Z. 310, 385-421
- WEI, L.L. 1973: Effect of hydrogen fluoride
on ultrastructure of soybean
leaf cells.
Diss. Abstr. Int. 33, 2973B
- WEINSTEIN, L.H. 1961: Effects of atmospheric
fluoride on metabolic
constituents of tomato and
bean leaves.
Contrib. Boyce Thompson Inst.
21, 215-231
- WEINSTEIN, L.H. 1977: Fluoride and plant life.
J. Occup. Med. 19, 49-78
- WHITE, K.L.
HILL, A.C. und
BENNETT, J.H. 1974: Synergistic inhibition of
apparent photosynthesis rate
of alfalfa by combinations
of sulfur dioxide and nitrogen
dioxide.
Environ. Sci. Tech. 8, 574-576
- WIEBE, H.H. und
POOVAIAH, B.W. 1973: Influence of moisture, heat,
and light stress on hydrogen
fluoride fumigation injury
to soybeans.
Plant Physiol. 52, 542-545

- WILLE, F. 1922: Die Rauchscha-denfrage der
Aluminumfabriken mit besonderer
Berücksichtigung der Aluminum-
fabrik Chippis.
Berlin: P. Parey, 66 S.
- WISLICENUS, H. 1901: Zur Beurteilung und Abwehr
von Rauchscha-den.
Z. angew. Chem. 14, 689-712
- WOLTZ, S.S. und
LEONARD, C.D. 1964: Effect of atmospheric
fluorides upon certain meta-
bolic processes in valencia
orange leaves.
Proc. Fla. State Hort. Soc.
77, 9-15
- YANG, S.F. und
MILLER, G.W. 1963: Biochemical studies on the
effect of fluoride on higher
plants. 3. The effect of
fluoride on dark carbon
dioxide fixation.
Biochem. J. 88, 517-522
- YU, M.-H. und
MILLER, G.W. 1967: Effect of fluoride on the
respiration of leaves from
higher plants.
Plant and Cell Physiol.
8, 483-493
- ZIMMERMAN, P.W. 1951: Impurities in the air and
their influence on plant
life.
Proc. Nat. Air Pollut. Symp.
1, 135-141

6. Tabellenanhang

Tabelle 1. Pflanzenhöhe, Trockensubstanz und Fluor-Gehalt von 20 Tage alten Lolium multiflorum Pflanzen im Frühjahr

Zeitpunkt der Probenahme (Tage)	4,4 µg HF/m ³ Luft			Kontrolle		
	Δ Höhe (cm)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)	Δ Höhe (cm)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)
2	4,0	0,25	54,71	4,0	0,20	9,5
	4,0	0,13	41,41	4,5	0,25	9,8
	4,5	0,14	30,91	4,0	0,18	11,5
	4,5	0,16	66,91	4,0	0,17	8,9
	\bar{x} s	4,25 ±0,29	0,17 ±0,05	48,49 ±15,68	4,13 ±0,25	9,20 ±0,04
4	8,0	0,50	142,11	8,5	0,55	9,1
	8,0	0,50	92,61	8,0	0,53	10,5
	8,0	0,40	152,11	8,5	0,48	9,8
	8,5	0,57	88,91	8,5	0,53	9,4
	\bar{x} s	8,13 ±0,25	0,49 ±0,07	118,94 ±32,82	8,38 ±0,25	0,52 ±0,03
6	12,0	0,72	128,00	12,0	0,73	9,3
	12,0	0,93	186,40	12,5	0,77	9,8
	13,0	0,96	190,10	12,0	0,80	10,2
	12,0	1,05	167,40	12,0	1,07	9,3
	\bar{x} s	12,25 ±0,50	0,92 ±0,14	167,98 ±28,44	12,13 ±0,25	0,84 ±0,15
8	14,5	1,64	183,60	14,5	1,19	7,2
	15,0	1,22	218,00	14,5	1,50	10,4
	14,5	1,22	254,00	14,5	1,45	9,1
	14,5	1,37	126,00	14,5	1,61	10,8
	\bar{x} s	14,63 ±0,25	1,36 ±0,20	195,40 ±54,47	14,50 ±0,00	1,44 ±0,18
10	15,5	2,18	159,10	15,0	2,15	9,6
	16,5	1,50	215,60	15,0	1,55	8,7
	17,0	1,95	154,00	17,5	2,02	10,3
	17,0	1,73	218,10	16,5	2,23	9,8
	\bar{x} s	16,50 ±0,71	1,84 ±0,29	186,70 ±34,89	16,00 ±1,22	1,99 ±0,30
12	18,0	2,50	240,60	18,0	2,46	9,5
	19,0	2,95	277,10	18,5	2,27	9,4
	19,0	2,40	184,00	18,5	2,54	7,6
	19,0	2,70	199,00	18,5	3,01	9,8
	\bar{x} s	18,75 ±0,50	2,64 ±0,24	222,93 ±44,15	18,38 ±0,25	2,57 ±0,31
14	20,5	2,90	268,00	19,5	2,75	10,4
	21,0	3,45	238,50	21,5	3,63	9,3
	20,5	3,73	160,00	19,5	3,03	10,1
	21,5	3,40	273,00	21,0	3,66	9,0
	\bar{x} s	20,88 ±0,48	3,37 ±0,35	234,88 ±52,19	20,38 ±1,03	3,27 ±0,45

Tabelle 2. Pflanzenhöhe, Frischgewicht, Trockensubstanz und Fluor-Gehalt von 30 Tage alten *Lolium multiflorum* Pflanzen im Frühjahr

Zeitpunkt der Probenahme (Tage)	4,0 µg HF/m ³ Luft				Kontrolle			
	Δ Höhe (cm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)	Δ Höhe (cm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)
2	3,5		0,23	23,2	3,0		0,14	9,5
	3,5		0,21	21,1	3,5		0,30	10,8
	3,5		0,14	---	3,5		0,17	9,6
	3,5		0,41	18,8	4,0		0,21	9,4
\bar{x}	3,50	----	0,25	21,02	3,50	----	0,21	9,83
s	±0,00	----	±0,11	± 2,23	±0,41	----	±0,07	±0,66
4	6,0	5,52	0,44	60,7	6,0	6,52	0,63	11,3
	6,0	4,32	0,36	77,5	6,0	4,24	0,37	9,3
	6,0	5,11	0,45	71,5	6,0	4,48	0,44	8,9
	6,0	6,08	0,59	53,1	6,5	6,58	0,57	10,5
\bar{x}	6,00	5,26	0,46	65,70	6,13	5,46	0,50	10,00
s	±0,00	±0,74	±0,10	±10,90	±0,25	±1,27	±0,12	±1,10
6	10,0	8,75	0,88	79,7	10,0	7,76	0,67	9,8
	10,0	5,54	0,45	89,0	10,5	7,15	0,54	10,2
	10,0	8,84	0,87	68,3	9,5	8,46	0,89	9,3
	9,5	10,90	0,98	56,0	9,5	8,67	0,77	9,3
\bar{x}	9,88	8,51	0,80	73,25	9,88	8,01	0,72	9,65
s	±0,25	±2,21	±0,24	±14,28	±0,48	±0,59	±0,15	±0,44
8	11,5	11,18	1,27	107,0	13,5	11,49	1,35	10,4
	12,5	14,15	1,27	98,0	12,0	11,76	1,23	7,5
	13,5	8,22	0,98	148,0	12,5	10,34	0,96	10,9
	13,5	10,52	1,09	138,5	12,0	9,89	1,13	9,4
\bar{x}	12,75	11,02	1,15	122,88	12,50	10,87	1,17	9,55
s	±0,96	±2,44	±0,14	±24,18	±0,71	±0,90	±0,16	±1,50
10	15,5	16,13	1,84	105,0	16,5	17,33	1,90	9,8
	16,5	14,59	1,59	110,0	17,0	13,65	1,40	9,6
	17,0	12,93	1,27	129,5	15,5	11,61	1,38	9,7
	16,0	14,84	1,42	127,0	15,5	16,49	1,84	9,8
\bar{x}	16,25	14,62	1,53	117,88	16,13	14,77	1,63	9,73
s	±0,65	±1,32	±0,24	±12,20	±0,75	±2,63	±0,28	±0,10
12	18,0	17,38	2,24	108,0	18,0	18,43	2,43	10,5
	19,0	18,43	2,47	112,0	20,0	22,74	2,74	11,1
	18,5	21,64	2,49	143,0	20,0	17,85	2,15	7,8
	19,5	21,80	2,84	157,0	19,0	17,32	2,35	8,0
\bar{x}	18,75	19,81	2,51	130,00	19,25	19,09	2,42	9,35
s	±0,65	±2,24	±0,25	±23,85	±0,96	±2,48	±0,25	±1,59
14	22,5	23,20	3,56	151,0	21,0	25,54	3,64	9,6
	21,5	22,37	3,47	124,5	22,0	19,16	2,90	10,2
	21,5	23,07	3,47	166,0	21,5	20,56	3,58	9,3
	21,0	22,29	3,32	1,53,0	22,0	25,20	3,95	9,5
\bar{x}	21,63	22,73	3,46	148,63	21,63	22,62	3,52	9,65
s	±0,63	±0,47	±0,10	±17,40	±0,48	±3,24	±0,44	±0,39

Tabelle 3. Pflanzenhöhe, Frischgewicht, Trockensubstanz und Fluor-Gehalt von 20 Tage alten *Lolium multiflorum* Pflanzen im Frühsommer

Zeitpunkt der Probenahme (Tage)	19,8 µg HF/m ³ Luft				Kontrolle			
	Δ Höhe (cm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)	Δ Höhe (cm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)
2	1,5	1,40	0,10	37,9	1,5	1,42	0,12	8,9
	1,5	1,38	0,11	13,3	1,5	1,56	0,10	7,7
	1,0	1,50	0,16	20,2	2,0	1,30	0,10	11,6
	1,5	1,28	0,12	20,1	1,5	1,45	0,12	7,4
\bar{x}	1,38	1,39	0,12	24,38	1,63	1,42	0,11	8,90
s	±0,25	±0,09	±0,03	± 9,03	±0,25	±0,08	±0,01	±1,91
4	6,5	4,34	0,38	160,0	6,0	4,30	0,42	10,2
	7,5	4,11	0,41	340,0	6,5	5,28	0,45	12,8
	7,0	3,60	0,44	197,0	7,5	5,00	0,42	7,3
	7,0	5,34	0,44	242,0	8,0	4,30	0,44	10,7
\bar{x}	7,00	4,35	0,38	234,75	7,00	4,72	0,43	10,25
s	±0,41	±0,73	±0,06	±77,77	±0,91	±0,50	±0,01	±2,27
6	9,5	6,40	0,64	296,0	8,5	5,72	0,50	11,1
	9,5	7,32	0,68	376,5	9,0	6,87	0,63	9,3
	10,5	6,34	0,68	309,0	9,5	5,64	0,51	10,8
	10,0	6,20	0,68	288,0	10,5	7,22	0,73	9,4
\bar{x}	9,88	6,57	0,67	317,38	9,38	6,36	0,59	10,18
s	±0,48	±0,51	±0,02	±40,36	±0,85	±0,80	±0,11	±0,90
8	13,0	8,86	1,11	565,0	15,0	8,67	0,93	9,8
	13,5	8,81	0,93	531,5	15,0	9,64	1,15	10,0
	13,0	7,74	0,84	630,0	13,5	9,94	1,15	10,2
	13,0	8,69	0,83	624,0	13,0	8,29	1,03	9,5
\bar{x}	13,13	8,53	0,93	587,63	14,13	9,14	1,07	9,88
s	±0,25	±0,53	±0,13	±47,54	±1,03	±0,78	±0,11	±0,33
10	16,0	11,83	1,20	650,0	15,5	11,40	1,20	12,6
	16,5	15,86	1,98	541,0	17,5	16,55	1,92	7,7
	16,0	12,05	1,34	707,0	17,5	12,05	1,52	9,2
	16,0	15,06	1,66	718,0	16,5	12,30	1,64	9,4
\bar{x}	16,13	13,70	1,55	654,00	16,75	13,08	1,57	9,73
s	±0,25	±2,06	±0,35	±81,01	±0,96	±2,35	±0,30	±2,06
12	20,5	20,77	2,40	691,0	22,0	18,47	2,10	11,7
	20,0	16,42	2,16	780,0	20,5	19,56	2,36	4,7
	21,5	21,15	2,48	622,5	21,5	19,47	2,38	14,8
	20,5	18,11	2,24	685,0	21,0	18,67	2,38	7,1
\bar{x}	20,63	19,11	2,32	694,63	21,25	18,79	2,31	9,58
s	±0,25	±2,25	±0,15	±64,80	±0,65	±0,46	±0,14	±4,54
14	22,5	23,26	2,92	750,0	23,0	26,97	3,50	11,1
	22,5	21,60	2,81	786,0	19,5	20,99	3,09	7,8
	22,5	26,82	3,36	728,0	23,0	24,75	2,88	10,5
	22,5	22,35	3,02	798,5	23,5	22,64	3,06	10,1
\bar{x}	22,50	23,51	3,03	765,63	22,25	23,84	3,13	9,87
s	±0,00	±2,31	±0,24	±32,43	±1,85	±2,59	±0,26	±1,44

Tabelle 4. Pflanzenhöhe, Frischgewicht, Trockensubstanz und Fluor-Gehalt von 30 Tage alten *Lolium multiflorum* Pflanzen im Fröhsommer

Zeitpunkt der Probenahme (Tage)	23,6 µg HF/m ³ Luft				Kontrolle			
	Δ Höhe (cm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)	Δ Höhe (cm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)
2	3,5	1,22	0,03	----	3,0	1,85	0,03	8,8
	3,0	1,22	0,01	20,6	3,0	0,95	0,03	9,9
	3,0	1,08	0,01	28,4	3,5	1,24	0,06	8,5
	3,5	1,43	0,06	31,1	3,5	1,12	0,10	7,3
	\bar{x} s	3,25 ±0,29	1,21 ±0,16	0,03 ±0,02	26,70 ±5,45	3,25 ±0,29	1,29 ±0,39	0,06 ±0,03
4	5,5	1,98	0,10	198,0	6,0	3,82	0,12	8,6
	6,5	3,05	0,12	189,5	6,5	2,12	0,10	7,4
	6,0	3,24	0,13	110,0	5,5	2,34	0,18	12,3
	6,5	2,00	0,10	240,0	6,0	2,32	0,10	5,8
	\bar{x} s	6,13 ±0,48	2,57 ±0,67	0,11 ±0,01	184,38 ±54,28	6,00 ±0,41	2,65 ±0,79	0,12 ±0,03
6	8,5	5,55	0,37	257,0	8,5	5,34	0,30	8,5
	8,0	4,16	0,35	255,0	9,0	3,00	0,30	9,2
	7,0	3,73	0,45	100,0	7,5	3,78	0,48	6,9
	7,5	3,40	0,34	71,3	7,5	4,62	0,47	7,0
	\bar{x} s	7,75 ±0,65	4,21 ±0,95	0,38 ±0,05	170,83 ±39,05	7,88 ±0,48	4,19 ±1,02	0,39 ±0,10
8	12,0	6,30	1,06	518,0	11,5	8,53	0,94	8,3
	11,0	4,96	0,84	455,5	11,0	5,49	0,66	8,1
	11,5	5,96	0,60	522,0	11,5	5,50	0,64	7,7
	11,0	7,73	0,76	290,0	11,0	6,42	0,73	9,6
	\bar{x} s	11,38 ±0,48	6,24 ±1,15	0,82 ±0,19	446,38 ±98,61	11,25 ±0,29	6,74 ±1,28	0,74 ±0,14
10	14,5	12,04	1,00	462,0	13,5	10,50	1,06	7,3
	14,5	11,79	1,27	362,0	14,0	10,71	1,40	6,3
	13,5	10,40	1,11	595,0	14,5	11,63	1,15	10,4
	15,0	11,91	1,12	585,0	13,5	11,54	1,17	7,0
	\bar{x} s	14,38 ±0,63	11,54 ±0,76	1,13 ±0,11	501,25 ±95,94	13,88 ±0,48	11,10 ±0,57	1,12 ±0,05
12	14,5	12,00	1,45	514,0	15,5	12,34	1,30	8,2
	16,5	13,02	1,43	487,0	16,5	11,48	1,59	8,5
	17,0	13,59	1,50	549,5	16,0	15,74	1,71	6,7
	15,5	12,62	1,68	490,0	17,0	11,54	1,57	8,0
	\bar{x} s	15,88 ±1,11	12,81 ±0,67	1,54 ±0,12	514,63 ±27,63	16,25 ±0,65	12,78 ±2,02	1,54 ±0,17
14	21,0	19,85	2,33	488,0	20,0	15,78	2,57	8,5
	18,5	16,24	2,00	625,0	18,5	14,92	2,08	7,1
	17,0	13,40	1,90	575,0	16,5	15,00	1,64	6,8
	18,0	13,43	1,88	423,0	18,0	15,34	1,80	8,7
	\bar{x} s	18,63 ±1,70	15,73 ±3,05	2,03 ±0,21	528,00 ±90,07	18,25 ±1,44	15,26 ±0,39	2,02 ±0,41

Tabelle 5. Pflanzenhöhe, Frischgewicht, Trockensubstanz und Fluor-Gehalt von 20 Tage alten *Lolium multiflorum* Pflanzen im Hochsommer

Zeitpunkt der Probenahme (Tage)	1,6 µg HF/m ³ Luft				Kontrolle			
	Δ Höhe (cm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)	Δ Höhe (cm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)
2	4,0	3,82	0,42	6,2	4,0	3,85	0,40	8,3
	3,5	3,97	0,47	9,4	4,0	3,63	0,35	9,3
	4,0	3,77	0,46	11,0	4,0	4,15	0,35	10,1
	4,0	3,38	0,40	9,6	3,0	3,25	0,50	8,2
	\bar{x} s	3,75 ±0,50	3,74 ±0,25	0,44 ±0,03	8,55 ±2,09	3,75 ±0,50	3,72 ±0,38	0,40 ±0,07
4	5,5	3,12	0,67	13,3	6,5	3,94	0,61	8,7
	6,0	4,05	0,57	17,3	6,5	4,20	0,66	7,8
	3,5	3,80	0,53	15,9	6,0	4,21	0,60	8,3
	6,0	4,81	0,54	13,1	6,0	3,83	0,58	9,0
	\bar{x} s	5,75 ±0,29	3,95 ±0,70	0,58 ±0,06	14,90 ±2,05	6,25 ±0,29	4,05 ±0,19	0,61 ±0,03
6	8,0	5,36	0,81	15,6	9,0	4,96	0,82	7,0
	8,0	4,91	0,73	14,3	8,0	4,95	0,69	9,5
	8,0	4,25	0,73	16,4	9,0	4,68	0,65	7,7
	9,0	4,00	0,74	16,4	8,0	4,67	0,64	10,2
	\bar{x} s	8,25 ±0,50	4,81 ±0,86	0,75 ±0,04	15,68 ±0,99	8,50 ±0,58	4,82 ±0,16	0,70 ±0,08
8	10,0	6,65	1,09	17,8	11,0	6,56	1,29	8,0
	10,0	5,95	0,96	17,7	10,5	6,25	1,17	8,1
	11,0	7,30	1,18	19,7	11,0	5,56	1,10	6,6
	10,0	6,38	1,05	17,5	10,0	5,55	0,81	8,5
	\bar{x} s	10,00 ±0,00	6,55 ±0,60	1,07 ±0,09	18,18 ±1,02	10,63 ±0,48	6,05 ±0,44	1,09 ±0,20
10	11,5	7,20	1,25	19,7	11,0	7,73	1,25	7,7
	11,5	6,44	1,21	19,4	11,5	6,58	1,24	9,2
	11,5	6,16	1,16	20,1	12,0	6,42	1,15	8,4
	11,0	7,22	1,15	17,4	12,0	7,72	1,20	7,2
	\bar{x} s	11,38 ±0,25	6,76 ±0,54	1,19 ±0,05	19,15 ±1,20	11,53 ±0,48	7,11 ±0,71	1,21 ±0,05
12	12,5	10,65	1,58	19,6	12,5	11,00	1,70	7,8
	13,0	10,93	1,90	24,0	12,5	10,80	1,49	7,8
	13,0	8,63	1,30	18,8	13,0	8,73	1,30	7,3
	13,5	10,91	1,58	28,0	13,5	9,60	1,54	7,2
	\bar{x} s	13,00 ±0,41	10,28 ±1,11	1,62 ±0,25	22,60 ±4,26	12,80 ±0,48	10,03 ±1,07	1,51 ±0,16
14	14,0	12,32	1,85	24,0	14,0	12,23	2,24	6,3
	14,0	11,47	1,98	22,4	14,0	11,57	2,07	8,1
	13,5	11,84	2,00	19,4	14,0	12,88	1,80	8,4
	14,0	11,76	1,90	25,8	14,0	11,07	1,90	8,9
	\bar{x} s	13,88 ±0,25	11,85 ±0,35	1,93 ±0,07	22,90 ±2,72	14,00 ±0,00	11,94 ±0,79	2,00 ±0,19

Tabelle 6. Pflanzennähe, Frischgewicht, Trockensubstanz und Fluor-Gehalt von 30 Tage alten *Lolium multiflorum* Pflanzen im Hochsommer

Zeitpunkt der Probenahme (Tage)	19,5 µg HF/m ³ Luft				Kontrolle			
	Δ Höhe (cm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	Δ F Gehalt (ppm)	Δ Höhe (cm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	Δ F Gehalt (ppm)
2	3,0	2,0	0,27	76,7	3,0	1,68	0,40	8,8
	2,5	1,67	0,28	58,6	3,0	1,84	0,30	9,6
	2,5	1,66	0,30	53,3	3,0	2,00	0,33	8,9
	3,0	1,63	0,23	79,6	2,5	1,07	0,30	8,6
\bar{x}	2,75	1,61	0,28	67,05	2,88	1,65	0,33	8,98
s	±0,29	±0,17	±0,01	±13,05	±0,25	±0,41	±0,05	±0,43
4	6,0	2,28	0,38	224,0	5,5	2,46	0,48	8,7
	5,0	3,52	0,58	168,0	5,5	2,60	0,52	8,2
	5,5	2,00	0,35	241,0	6,0	2,81	0,43	8,2
	5,0	2,86	0,45	156,0	6,0	2,95	0,52	8,5
\bar{x}	5,38	2,67	0,44	197,25	5,75	2,71	0,49	8,40
s	±0,48	±0,67	±0,10	±41,58	±0,29	±0,22	±0,04	±0,24
6	6,5	2,20	0,59	329,0	7,0	2,20	0,66	5,8
	6,5	2,92	0,75	298,0	6,5	3,74	0,78	9,8
	7,0	3,53	0,72	193,0	7,0	3,30	0,70	7,5
	7,0	2,76	0,55	191,0	7,0	2,44	0,57	7,9
\bar{x}	6,75	2,85	0,66	252,75	6,88	2,92	0,68	7,75
s	±0,29	±0,55	±0,10	±71,29	±0,25	±0,72	±0,09	±1,64
8	8,5	2,77	0,90	253,0	10,0	3,21	0,85	8,0
	9,0	3,50	0,73	314,0	10,0	4,13	0,95	10,3
	8,5	3,44	0,78	318,0	9,5	3,07	0,77	9,6
	9,0	2,91	0,64	311,0	8,5	3,00	0,62	11,6
\bar{x}	8,75	3,16	0,76	299,00	9,50	3,35	0,80	9,88
s	±0,29	±0,37	±0,11	±30,90	±0,71	±0,53	±0,14	±1,50
10	9,0	3,21	1,02	361,0	11,0	4,46	1,06	10,5
	10,5	3,54	0,95	508,0	10,0	3,92	0,85	10,3
	9,0	4,50	0,90	296,0	9,5	3,00	0,74	11,5
	10,0	3,38	1,01	377,0	9,5	3,73	1,06	9,0
\bar{x}	9,63	3,66	0,97	385,50	10,00	3,78	0,93	10,33
s	±0,75	±0,58	±0,06	±88,86	±0,71	±0,60	±0,16	±1,03
12	10,5	4,17	1,17	411,0	11,0	3,60	0,97	10,2
	11,0	4,23	1,20	579,0	11,0	5,41	1,30	11,9
	10,5	3,60	1,07	497,0	10,5	4,43	1,20	10,6
	11,0	4,00	1,12	494,0	10,5	4,40	1,24	10,8
\bar{x}	10,75	4,00	1,14	495,25	10,75	4,31	1,18	10,88
s	±0,29	±0,28	±0,06	±68,60	±0,29	±0,99	±0,14	±0,73

Tabelle 7. Frischgewicht, Trockensubstanz und Fluor-Gehalt von Buschbohnen (Phaseolus vulgaris)

Zeitpunkt der Probenahme (Tage)	4,13 $\mu\text{g HF/m}^3$ Luft			Kontrolle		
	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)
6	3,35	0,50	81,2	5,30	0,71	
	5,23	0,68	82,6	5,41	0,74	
	3,62	0,59	63,6	4,10	0,56	9,1
	5,73	0,87	78,7	3,61	0,55	10,5
	\bar{x}	4,48	0,66	76,53	4,73	0,64
s	$\pm 1,17$	$\pm 0,16$	$\pm 8,77$	$\pm 1,06$	$\pm 0,10$	
10	6,72	1,04	88,8	7,40	1,10	
	5,76	0,74	112,0	8,08	1,20	10,0
	8,17	1,23	89,5	7,88	1,28	9,8
	7,45	1,00	124,0	8,27	1,30	
	\bar{x}	7,03	1,00	103,58	7,90	1,22
s	$\pm 1,03$	$\pm 0,20$	$\pm 17,36$	$\pm 0,37$	$\pm 0,09$	
14	10,48	1,62	133,5	12,40	1,68	
	13,31	2,01	134,0	12,14	1,81	10,3
	13,56	2,02	127,0	13,23	1,66	10,7
	13,92	2,26	134,0	12,18	1,80	
	\bar{x}	12,82	1,93	132,13	12,49	1,74
s	$\pm 1,58$	$\pm 0,26$	$\pm 3,42$	$\pm 0,51$	$\pm 0,08$	

Tabelle 8. Frischgewicht, Trockensubstanz und Fluor-Gehalt von Buschbohnen (Phaseolus vulgaris)

Zeitpunkt der Probenahme (Tage)	23,5 µg HF/m ³ Luft			Kontrolle		
	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)
3	2,27	0,40	525,0	2,80	0,57	
	1,40	0,22	618,0	1,40	0,25	10,8
	2,15	0,35	528,0	2,10	0,40	9,5
	2,00	0,33	502,0	1,35	0,34	10,2
	1,25	0,28	473,0	1,35	0,36	
\bar{x}	1,81	0,32	529,20	1,80	0,38	10,17
s	±0,46	±0,07	±54,32	±0,64	±0,12	±0,65
8	7,10	1,52	865,0	6,05	1,50	10,0
	7,02	1,40	700,0	7,18	1,72	9,8
	6,25	1,34	831,0	6,50	1,59	9,8
	7,05	1,49	806,0	6,00	1,37	
	6,32	1,40	813,0	6,40	1,20	
\bar{x}	6,75	1,43	803,00	6,43	1,48	9,87
s	±0,42	±0,07	±61,94	±0,47	±0,20	±0,12
10	9,60	1,92	920,0	9,47	1,85	
	9,17	1,67	998,0	8,93	1,64	
	8,80	1,53	975,0	9,68	1,90	9,6
	9,68	1,88	1040,0	9,50	1,88	9,8
	9,05	1,74	958,0	9,08	1,78	10,5
\bar{x}	9,26	1,75	978,20	9,33	1,81	9,97
s	±0,37	±0,16	±44,77	±0,31	±0,11	±0,47

Tabelle 9. Frischgewicht, Trockensubstanz und Fluor-Gehalt von Buschtomaten (Lycopersicum esculentum)

Zeitpunkt der Probenahme (Tage)	21,3 µg HF/m ³ Luft			Kontrolle		
	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)
5	27,41	4,52	222,0	30,57	5,06	7,1
	26,37	4,40	232,0	26,40	4,50	
	25,58	4,26	237,0	25,62	4,08	
	-----	-----	-----	25,00	4,24	7,9
	\bar{x} s	26,45 ±0,92	4,39 ±0,13	230,33 ± 7,64	26,90 ±2,51	4,47 ±0,43
9	33,84	5,64	396,0	32,85	5,00	
	35,47	5,91	362,0	36,65	6,00	6,6
	30,18	5,03	399,0	31,00	5,00	
	31,10	5,18	379,0	30,20	4,70	9,2
	\bar{x} s	32,65 ±2,44	5,44 ±0,41	384,00 ±17,11	32,68 ±2,87	5,18 ±0,57
10	36,29	6,05	533,0	37,40	6,23	
	34,80	5,80	455,0	35,50	5,92	8,2
	37,40	6,23	445,0	34,09	5,68	8,7
	33,92	5,65	455,0	34,17	5,70	
	\bar{x} s	35,60 ±1,55	5,93 ±0,26	472,00 ±40,94	35,29 ±1,55	5,88 ±0,26
12	44,18	7,36	505,0	42,81	7,14	8,1
	42,78	7,13	474,0	46,52	7,75	
	45,20	7,53	522,0	40,58	6,76	7,8
	40,12	6,69	460,0	43,67	7,28	
	\bar{x} s	43,07 ±2,20	7,18 ±0,37	490,25 ±28,31	43,40 ±2,46	7,23 ±0,41

Tabelle 10. Frischgewicht, Trockensubstanz und Fluor-Gehalt von Mais (Zea mays)

Zeitpunkt der Probenahme (Tage)	3,95 $\mu\text{g HF/m}^3$ Luft			Kontrolle		
	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)
6	11,69	0,87	55,4	10,18	0,70	
	12,66	0,95	56,8	10,70	0,76	
	11,49	0,77	58,0	11,34	0,85	8,3
	9,83	0,68	53,8	11,21	0,84	7,6
	\bar{x}	11,42	0,82	56,00	10,86	0,79
s	$\pm 1,18$	$\pm 0,12$	$\pm 1,81$	$\pm 0,53$	$\pm 0,07$	
8	14,80	1,00	62,8	19,13	1,39	7,7
	19,91	1,25	78,0	14,73	1,00	
	17,40	1,07	71,1	14,49	0,87	
	20,00	1,38	70,1	22,41	1,70	7,4
	\bar{x}	18,03	1,18	70,50	17,69	1,24
s	$\pm 2,47$	$\pm 0,17$	$\pm 6,22$	$\pm 3,80$	$\pm 0,38$	
10	23,51	1,97	76,4	26,68	2,30	9,5
	22,72	1,52	74,5	21,23	1,36	
	21,64	1,69	85,5	26,93	2,33	9,6
	18,07	1,26	80,4	22,21	1,83	
	\bar{x}	21,49	1,61	78,70	24,26	1,96
s	$\pm 2,40$	$\pm 0,30$	$\pm 4,04$	$\pm 2,96$	$\pm 0,46$	
12	30,64	2,94	85,2	32,13	3,13	7,8
	29,29	2,38	80,4	28,36	3,00	7,0
	21,14	1,64	87,9	24,23	2,13	
	23,20	2,20	83,0	30,28	2,89	
	\bar{x}	26,07	2,29	84,13	28,75	2,79
s	$\pm 4,61$	$\pm 0,54$	$\pm 3,19$	$\pm 3,38$	$\pm 0,45$	

Tabelle 11. Frischgewicht, Trockensubstanz und Fluor-Gehalt von Mais (Zea mays)

Zeitpunkt der Probenahme (Tage)	22,8 µg HF/m ³ Luft			Kontrolle		
	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)
4	15,14	1,20	90,0	11,98	0,58	
	15,00	1,20	107,0	13,78	1,13	7,6
	12,00	0,50	108,0	14,69	0,90	
	13,81	0,55	107,0	13,73	1,05	7,1
\bar{x}	13,99	0,86	103,00	13,55	0,92	7,35
s	±1,45	±0,39	± 8,68	±1,13	±0,24	
6	22,00	2,21	135,0	20,58	2,03	8,5
	23,33	2,21	128,0	24,35	1,86	
	23,00	1,96	131,0	22,43	1,98	
	19,00	1,40	158,0	21,82	2,05	7,3
\bar{x}	21,83	1,95	138,00	22,30	1,98	7,9
s	±1,97	±0,38	±13,64	±1,57	±0,09	
9	32,62	2,40	175,0	31,00	2,37	
	34,65	2,58	205,0	34,78	2,85	
	40,50	3,16	190,0	34,80	3,07	6,8
	26,52	2,05	227,0	39,45	3,40	7,4
\bar{x}	33,07	2,55	199,25	35,01	2,92	7,1
s	±5,73	±0,46	±22,19	±3,46	±0,43	
12	43,83	3,56	240,0	48,04	3,84	7,4
	41,97	3,20	265,0	41,83	3,35	
	46,06	3,42	281,0	47,50	3,80	6,5
	42,13	3,38	282,0	46,30	3,70	
\bar{x}	43,50	3,39	267,00	45,92	3,67	6,95
s	±1,90	±0,15	±19,61	±2,82	±0,22	

Tabelle 12. Frischgewicht, Trockensubstanz und Fluor-Gehalt von Gladiolen der Sorte Flower Song

Zeitpunkt der Probenahme (Tage)	0,67 $\mu\text{g HF/m}^3$ Luft			Kontrolle		
	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)
4	5,50	0,63	3,6	18,15	2,18	
	6,55	0,75	3,7	7,74	0,93	3,9
	14,67	1,68	3,6	7,24	0,87	3,7
	9,61	1,10	4,4	18,07	2,17	
\bar{x}	9,08	1,04	3,83	12,80	1,54	3,80
s	$\pm 4,11$	$\pm 0,47$	$\pm 0,39$	$\pm 6,13$	$\pm 0,74$	
6	12,40	1,42	4,6	19,15	2,30	3,5
	17,12	1,96	4,8	23,07	2,77	
	13,10	1,50	4,0	21,65	2,60	3,9
	13,97	1,60	4,6	14,99	1,80	
\bar{x}	14,15	1,62	4,50	19,72	2,37	3,70
s	$\pm 2,08$	$\pm 0,24$	$\pm 0,35$	$\pm 3,54$	$\pm 0,43$	
8	11,09	1,27	5,1	22,15	2,66	
	20,52	2,35	5,8	24,40	2,93	3,6
	14,24	1,63	5,6	17,24	2,07	
	15,11	1,73	6,3	20,82	2,50	4,2
\bar{x}	15,24	1,75	5,70	21,15	2,54	3,95
s	$\pm 3,92$	$\pm 0,45$	$\pm 0,50$	$\pm 3,00$	$\pm 0,36$	
12	19,21	2,20	6,8	23,90	2,87	3,5
	16,33	1,87	7,2	32,48	3,90	3,7
	17,47	2,00	7,0	33,31	4,00	
	16,94	1,94	8,8	29,98	3,60	
\bar{x}	17,49	2,00	7,45	29,92	3,59	3,60
s	$\pm 1,24$	$\pm 0,14$	$\pm 0,91$	$\pm 4,25$	$\pm 0,51$	

Tabelle 13. Frischgewicht, Trockensubstanz und Fluor-Gehalt von Gladiolen der Sorte Snow Princess

Zeitpunkt der Probenahme (Tage)	0,67 µg HF/m ³ Luft			Kontrolle		
	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)
3	3,06	0,70	3,9	1,06	0,33	5,3
	1,05	0,35	9,5	2,79	0,51	
	1,60	0,46	7,1	4,85	0,81	4,3
	2,50	0,58	7,3	3,57	0,60	
\bar{x}	2,05	0,52	8,20	3,07	0,56	4,80
s	±0,90	±0,15	±1,18	±1,59	±0,20	
6	4,00	1,09	9,5	10,64	2,33	6,1
	5,79	1,40	9,5	7,72	1,34	
	12,00	1,73	10,2	11,17	2,15	4,4
	13,18	2,08	10,2	5,05	1,31	
\bar{x}	8,74	1,58	9,85	8,65	1,78	5,25
s	±4,53	±0,43	±0,40	±2,84	±0,53	
8	8,65	1,73	10,4	13,83	2,43	
	9,45	1,89	10,6	12,58	2,00	
	11,30	2,26	10,6	6,83	1,56	6,9
	7,25	1,45	10,6	7,35	2,09	5,8
\bar{x}	9,16	1,83	10,55	10,15	2,02	6,35
s	±1,69	±0,34	±0,10	±3,57	±0,36	
10	6,00	1,35	10,5	12,46	2,63	
	8,85	1,77	11,5	13,85	2,90	4,8
	12,25	2,45	12,3	17,21	3,26	
	11,75	2,20	12,9	11,47	2,33	5,2
\bar{x}	9,71	1,94	11,80	13,75	2,78	5,00
s	±2,89	±0,48	±1,04	±2,51	±0,40	
12	5,91	2,86	12,2	18,18	3,75	3,8
	16,49	3,05	11,5	23,59	4,03	5,2
	9,76	2,28	12,4	13,87	3,06	
	7,20	2,68	12,3	12,28	3,70	
\bar{x}	9,84	2,72	12,10	16,98	3,64	4,50
s	±4,71	±0,33	±0,41	±5,06	±0,41	

Tabelle 14. Frischgewicht, Trockensubstanz und Fluor-Gehalt von Futterhirse (*Setaria italica*)

Zeitpunkt der Probenahme (Tage)	22,5 µg HF/m ³ Luft			Kontrolle		
	Δ FG (g)	Δ TS (g)	r' Gehalt (ppm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	r' Gehalt (ppm)
4	7,00	0,61	229,0	5,82	0,60	
	5,85	0,54	210,0	4,76	0,57	
	6,20	0,59	241,0	6,27	0,68	11,0
	4,70	0,50	196,0	5,30	0,50	10,7
	\bar{x}	5,94	0,56	219,00	5,54	0,59
s	±0,96	±0,05	±19,95	±0,65	±0,07	
6	7,46	0,82	331,0	7,64	0,95	
	6,43	0,80	335,0	9,82	1,00	10,5
	10,80	1,27	292,0	10,97	1,22	12,0
	9,47	1,01	308,0	8,23	0,98	
	\bar{x}	8,54	0,98	316,50	9,17	1,04
s	±1,97	±0,22	±20,21	±1,52	±0,12	
8	10,00	1,33	398,0	15,00	1,94	
	13,42	1,64	400,0	11,00	1,33	11,5
	11,58	1,50	380,0	10,00	1,15	10,8
	11,36	1,40	397,0	11,13	1,25	
	\bar{x}	11,59	1,47	393,75	11,78	1,42
s	±1,41	±0,13	± 9,25	±2,20	±0,36	
10	12,52	1,95	420,0	14,65	2,15	
	16,35	2,40	408,0	14,10	2,23	10,0
	14,27	2,00	417,0	13,12	1,80	11,0
	14,30	2,06	416,0	14,60	2,30	
	\bar{x}	14,36	2,10	415,25	14,12	2,13
s	±1,57	±0,20	±5,12	±0,71	±0,23	
12	19,84	2,84	421,0	17,80	2,69	
	17,63	2,57	437,0	18,53	2,75	10,8
	18,00	2,68	445,0	17,70	2,60	
	17,27	2,48	450,0	18,10	2,65	10,7
	\bar{x}	18,19	2,64	438,25	18,03	2,67
s	±1,14	±0,15	±12,69	±0,37	±0,06	

Tabelle 15. Frischgewicht, Trockensubstanz und Fluor-Gehalt von Futterhirse (Setaria italica)

Zeitpunkt der Probenahme (Tage)	32,3 µg HF/m ³ Luft			Kontrolle		
	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)	Δ FG (g)	Δ TS (g)	F Gehalt (ppm)
4	3,07	0,32	220,0	4,00	0,45	
	2,14	0,30	143,0	4,18	0,51	11,0
	4,25	0,45	238,0	3,49	0,30	
	4,11	0,54	254,0	3,30	0,38	10,9
	\bar{x} s	3,39 ±0,99	0,40 ±0,11	213,75 ±49,17	3,74 ±0,42	0,41 ±0,09
6	8,77	0,94	382,0	9,77	1,04	10,5
	8,16	0,91	379,0	8,16	0,72	10,3
	11,16	1,11	365,0	9,24	1,02	
	8,63	1,00	315,0	8,90	0,92	
	\bar{x} s	9,18 ±1,35	0,99 ±0,09	360,25 ±31,06	9,02 ±0,67	0,92 ±0,15
8	11,12	1,41	462,0	11,25	1,70	
	11,66	1,59	440,0	12,32	1,60	11,6
	12,88	2,00	405,0	11,30	1,48	
	11,62	1,20	439,0	11,65	1,32	10,3
	\bar{x} s	11,82 ±0,75	1,55 ±0,34	436,50 ±23,53	11,63 ±0,49	1,53 ±0,16
10	15,15	2,13	499,0	14,15	2,00	
	12,52	1,60	493,0	14,00	1,80	10,5
	14,00	2,03	445,0	15,22	2,14	12,9
	15,60	2,23	493,0	14,30	2,13	
	\bar{x} s	14,32 ±1,37	2,00 ±0,28	482,50 ±25,16	14,42 ±0,55	2,02 ±0,16
12	18,55	2,93	504,0	18,85	2,97	
	20,50	3,45	521,0	18,35	2,91	11,0
	18,05	2,78	497,0	18,30	2,91	10,7
	18,00	2,91	499,0	18,60	3,03	
	\bar{x} s	18,78 ±1,18	3,02 ±0,30	505,25 ±10,90	18,53 ±0,25	2,96 ±0,06

Tabelle 16. Frischgewicht, Trockensubstanz, Fluor- und Schwefel-Gehalt von Lolium multiflorum bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 %

Nach 7-tägiger Begasung

	Kontrolle				1 mg SO ₂ /m ³ Luft			
	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)
	8,30	0,96	10,4	3,2	7,28	0,73	10,8	8,6
	8,00	0,86	10,2	3,7	7,45	0,75	10,8	8,7
\bar{x}	8,15	0,91	10,30	3,45	7,37	0,74	10,80	8,65
s	±0,21	±0,07	±0,14	±0,35	±0,12	±0,01	±0,00	±0,07
	15/ug HF/m ³ Luft				1 mg SO ₂ /m ³ + 15/ug HF/m ³ Luft			
	8,54	0,95	738,0	3,2	8,27	0,79	752,0	6,3
	8,10	0,86	750,0	3,2	7,05	0,66	722,0	6,4
\bar{x}	8,32	0,91	744,00	3,20	7,66	0,73	737,00	6,35
s	±0,31	±0,06	± 8,49	±0,00	±0,86	±0,09	±21,21	±0,07

Nach 7-tägiger Erholung

	Kontrolle				1 mg SO ₂ /m ³ Luft			
	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)
	20,14	2,15	10,8	3,8	20,88	2,37	461,0	3,6
	20,68	2,30	12,0	3,8	18,15	2,02	480,0	3,7
\bar{x}	20,41	2,23	11,40	3,80	19,52	2,20	470,50	3,65
s	±0,38	±0,11	±0,85	±0,00	±1,93	±0,25	±13,44	±0,07
	15/ug HF/m ³ Luft				1 mg SO ₂ /m ³ + 15/ug HF/m ³ Luft			
	19,26	2,06	10,5	5,5	14,26	1,43	497,0	4,6
	17,63	1,89	10,7	5,3	14,94	1,54	396,0	4,4
\bar{x}	18,44	1,98	10,60	5,40	14,60	1,49	446,50	4,50
s	±1,16	±0,12	±0,14	±0,14	±0,48	±0,08	±71,42	±0,14

Tabelle 17. Frischgewicht, Trockensubstanz, Fluor- und Schwefel-Gehalt von Lolium multiflorum bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 %

	Kontrolle				0,4 mg SO ₂ /m ³ Luft			
	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)
	11,18	1,05	9,8	2,9	11,31	1,09	9,3	7,0
	10,63	1,05	10,6	3,2	9,85	0,90	10,2	8,4
	12,12	1,11	11,3	2,9	10,65	1,00	10,5	6,6
	13,19	1,22	10,5	3,1	10,83	1,00	10,0	7,0
X	11,78	1,11	10,55	3,03	10,66	1,00	10,00	7,25
s	±1,12	±0,08	±0,61	±0,15	±0,61	±0,08	±0,51	±0,79
	15/ug HF/m ³ Luft				0,4 mg SO ₂ /m ³ + 15/ug HF/m ³ Luft			
	10,91	1,05	730,0	3,1	11,36	1,05	694,0	5,8
	12,03	1,09	786,0	3,2	11,10	0,99	514,0	5,7
	11,86	1,15	817,0	3,0	10,62	0,93	652,0	6,1
	10,65	1,02	787,0	3,4	10,49	0,99	-----	---
X	11,36	1,08	780,00	3,25	10,89	0,99	620,00	5,83
s	±0,68	±0,06	±36,30	±0,16	±0,41	±0,05	±94,17	±0,19

Tabelle 18. Frischgewicht, Trockensubstanz, Fluor- und Schwefel-Gehalt von Lolium multiflorum bei einer Temperatur von 7°C am Tage bzw. 5°C in der Nacht und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 77 % bzw. 87 %

	Kontrolle				1 mg SO ₂ /m ³ Luft			
	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)
	8,58	0,76	9,5	3,7	9,16	0,82	9,8	9,4
	8,11	0,71	10,3	3,5	8,27	0,79	10,5	9,2
	10,67	1,00	9,2	3,7	7,64	0,69	10,8	9,1
	8,80	0,77	9,0	3,8	8,10	0,72	10,1	8,8
\bar{x}	9,04	0,81	9,50	3,68	8,29	0,76	10,30	9,13
s	±1,12	±0,13	±0,57	±0,13	±0,64	±0,06	±0,44	±0,25
	15/ug HF/m ³ Luft				1 mg SO ₂ /m ³ + 15/ug HF/m ³ Luft			
	8,48	0,77	686,0	3,5	7,65	0,64	437,0	7,2
	9,60	0,80	812,0	3,8	7,78	0,63	-----	7,4
	9,79	0,90	627,0	3,9	9,30	0,83	386,0	7,5
	7,12	0,68	583,0	3,8	7,37	0,61	487,0	7,7
\bar{x}	8,75	0,80	677,00	3,75	8,03	0,68	436,67	7,45
s	±1,23	±0,10	±99,40	±0,17	±0,87	±0,10	±50,50	±0,21

Tabelle 19. Frischgewicht, Trockensubstanz, Flugr- und Schwefel-Gehalt von Setaria italica bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 %

Nach 7-tägiger Begasung

	Kontrolle				1 mg SO ₂ /m ³ Luft			
	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)
	8,00	1,04	6,6	2,4	10,68	1,00	3,4	4,2
	11,00	1,40	6,7	2,0	12,60	1,08	6,7	4,0
	9,36	1,12	5,8	2,1	10,60	0,80	5,9	3,2
	9,56	1,04	5,4	2,3	12,00	1,04	6,7	4,3
\bar{x}	9,48	1,15	6,13	2,20	11,56	0,98	5,68	3,93
s	±1,23	±0,17	±0,63	±0,18	±0,90	±0,12	±1,56	±0,50
					1 mg SO ₂ /m ³ + 15/ug HF/m ³ Luft			
					15/ug HF/m ³ Luft			
	13,84	1,20	224,0	2,9	11,16	0,96	218,0	3,1
	12,60	1,00	277,0	2,9	9,36	0,80	137,0	3,7
	11,52	1,08	234,0	2,5	10,00	0,84	216,0	3,5
	14,96	1,20	223,0	3,1	11,40	0,96	209,0	3,5
\bar{x}	13,23	1,12	239,50	2,85	10,48	0,89	195,00	3,45
s	±1,49	±0,10	±25,49	±0,25	±0,96	±0,08	±38,86	±0,25

Tabelle 19. Fortsetzung

Nach 7-tägiger Erholung

	Kontrolle				1 mg SO ₂ /m ³ Luft			
	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)
	12,80	2,07	6,0	1,3	10,27	1,75	8,8	2,0
	13,43	2,17	6,3	1,3	17,69	2,35	6,6	2,6
	13,43	2,29	6,9	1,2	17,33	2,00	5,1	2,5
	12,93	2,00	5,2	1,3	13,33	1,99	7,5	2,2
\bar{x}	13,15	2,13	6,10	1,28	14,66	2,02	7,00	2,33
s	±0,33	±0,13	±0,71	±0,05	±3,53	±0,25	±1,56	±0,28
	15 µg HF/m ³ Luft				1 mg SO ₂ /m ³ + 15 µg HF/m ³ Luft			
	17,29	1,49	243,0	2,2	12,89	1,37	190,0	2,5
	10,07	1,17	215,0	2,1	12,13	1,32	169,0	2,7
	10,53	1,33	166,0	2,1	10,83	1,12	149,0	2,7
	13,77	1,77	198,0	1,5	10,01	1,05	156,0	2,7
\bar{x}	12,92	1,44	205,50	1,98	11,47	1,22	166,00	2,65
	±3,35	±0,26	±32,21	±0,32	±1,29	±0,15	±18,02	±0,10

Tabelle 20. Frischgewicht, Trockensubstanz, Flug- und Schwefel-Gehalt von Setaria italica bei einer Temperatur von 30°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 %

	Kontrolle				1 mg SO ₂ /m ³ Luft			
	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)
	7,20	1,37	7,3	2,5	8,65	1,42	8,9	4,6
	7,08	1,30	7,0	2,8	9,02	1,05	8,6	4,8
	7,05	1,03	5,6	2,6	10,20	1,50	10,9	4,0
	7,17	1,42	8,1	2,0	11,47	1,30	8,7	4,4
\bar{x}	7,13	1,28	7,00	2,48	9,84	1,32	9,28	4,45
s	±0,07	±0,17	±1,04	±0,34	±1,27	±0,20	±1,09	±0,34
	15 µg HF/m ³ Luft				1 mg SO ₂ /m ³ + 15 µg HF/m ³ Luft			
	10,62	1,47	268,0	2,8	11,68	1,28	189,0	3,8
	10,58	1,44	250,0	2,7	11,66	1,58	232,0	3,5
	10,57	1,45	264,0	2,6	12,06	1,29	200,0	4,1
	9,64	1,04	290,0	3,2	11,40	1,21	225,0	4,3
\bar{x}	10,35	1,35	268,00	2,83	11,70	1,34	211,50	3,93
s	±0,48	±0,21	±16,57	±0,26	±0,27	±0,16	±20,34	±0,35

Tabelle 21. Frischgewicht, Trockensubstanz, Fluor- und Schwefel-Gehalt von Setaria italica bei einer Temperatur von 10°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 %

	Kontrolle				1 mg SO ₂ /m ³ Luft			
	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)
	3,00	0,38	11,3	2,6	2,92	0,39	8,4	3,2
	2,90	0,38	10,5	2,5	2,70	0,33	7,7	3,5
	2,10	0,29	10,4	2,1	2,56	0,30	9,6	3,5
	2,64	0,32	10,1	2,9	2,57	0,29	7,7	3,6
\bar{x}	2,66	0,34	10,55	2,53	2,69	0,33	8,35	3,45
s	±0,40	±0,04	±0,51	±0,33	±0,17	±0,04	±0,90	±0,17
	15 µg HF/m ³ Luft				1 mg SO ₂ /m ³ + 15 µg HF/m ³ Luft			
	2,25	0,33	192,0	2,3	2,91	0,37	160,0	3,0
	2,95	0,44	202,0	2,8	2,01	0,29	172,0	2,4
	2,78	0,35	187,0	2,6	2,62	0,34	180,0	2,7
	3,50	0,43	210,0	2,7	3,05	0,38	153,0	3,2
\bar{x}	2,87	0,39	197,75	2,60	2,65	0,35	166,25	2,83
s	±0,52	±0,06	±10,28	±0,22	±0,46	±0,04	±12,07	±0,35

Tabelle 22. Frischgewicht, Trockensubstanz, Fluor- und Schwefel-Gehalt von Setaria italica bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95 %

	Kontrolle				1 mg SO ₂ /m ³ Luft			
	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)	FG (g)	TS (g)	F (ppm)	S (mg/gTS)
	10,11	0,87	---	3,7	7,04	0,60	7,1	6,4
	10,63	0,87	---	3,8	9,06	0,71	9,9	6,7
	8,67	0,74	9,7	3,9	11,94	0,88	7,1	6,0
	10,39	0,89	7,2	3,6	9,80	0,89	7,9	5,9
\bar{x}	10,38	0,88	8,45	3,75	8,63	0,83	8,00	6,25
s	±0,26	±0,01	±1,77	±0,13	±1,43	±0,10	±1,32	±0,37
	15 µg HF/m ³ Luft				1 mg SO ₂ /m ³ + 15 µg HF/m ³ Luft			
	6,80	0,53	386,0	3,9	6,59	0,55	428,0	5,1
	9,64	0,95	288,0	3,9	6,00	0,48	391,0	6,2
	11,38	0,87	346,0	3,9	9,66	0,78	467,0	4,3
	10,87	0,91	551,0	3,7	8,13	0,63	432,0	5,7
\bar{x}	9,10	0,82	340,00	3,85	6,91	0,61	427,00	5,33
s	±2,09	±0,19	±49,27	±0,10	±1,10	±0,13	±35,32	±0,82

EFFECTS OF HYDROGEN FLUORIDE ON LOLIUM MULTIFLORUM AND OTHER AGRICULTURAL PLANTS

Summary

The standardized grass culture method developed by SCHOLL (1971) uses Italian ryegrass (Lolium multiflorum var. Lema) as a biological monitor and has been shown to be particularly useful in predicting and evaluating risks to plants and animals from action of hydrogen fluoride (HF).

Fumigation experiments with hydrogen fluoride were carried out to broaden the basis for judging the possibilities and limits of the grass culture method. A comparison with the reactions of various agricultural plants was made to determine the relationship between fluoride accumulation in the grass canopy and effects on other plants. As a result of increasing density of air pollution sources, effects of several pollutants occurring together can be expected. Since sulfur dioxide is one of the most common air pollutants in populated areas, experiments on the combined effects of HF and SO₂ were also carried out.

The test plants were exposed to various levels of HF in specially developed fumigation chambers. Temperature, humidity, and light intensity and duration could be regulated within the required ranges. The experiments on the combined effects of HF and SO₂ were carried out in a controlled environment chamber in four separate fumigation chambers. A generator was developed for producing the required concentrations of HF. This was based on the vaporization of an aqueous HF solution and constant concentrations with only a narrow range of deviation could be generated.

Criteria for determining air pollutant effects included fluoride accumulation in the plant, visible symptoms of injury, as well as effects on gas exchange and growth. In the experiments on combined effects, variations in the light compensation point were also studied.

Lolium multiflorum proved to be very resistant. There were no visible symptoms of injury even under the highest concentration of $23.6 \mu\text{g HF/m}^3$ air over 14 days. Significant effects on CO_2 gas exchange or on growth were not observed. However, distinct seasonal and age-dependent variations in growth and gas exchange were noted. In general, the 20-day old plants showed more vigorous growth than the 30-day old plants. The seasonal reduction in growth from spring to mid-summer was reflected in the growth of plants in both age groups.

Grass plants in both age groups showed linear uptake of fluoride under all concentrations over the 14 day fumigation period. Younger plants accumulated significantly more fluoride than older plants.

In comparative experiments with other agricultural plants the following resistance series was established: gladiolus (Gladiolus communis) < feed corn (Zea mays) < feed millet (Setaria italica) < bush tomato (Lycopersicon esculentum) < bush bean (Phaseolus vulgaris) < ryegrass (Lolium multiflorum). All species, except millet, showed linear uptake of fluoride during the exposure period. Accumulation of fluoride was generally 50% less than in Lolium multiflorum. No effects of HF were observed on bean or tomato. In millet, apparent photosynthesis was reduced and respiration increased slightly. Neither visible injury nor effects on growth was observed. Corn showed slight necrosis under $22.8 \mu\text{g HF/m}^3$ air and

apparent photosynthesis and dry matter production were reduced. Extensive necrosis occurred on gladiolus exposed to $0.67 \mu\text{g HF/m}^3$ air. Apparent photosynthesis and dry matter production dropped significantly and respiration increased.

Exposure to $15 \mu\text{g HF/m}^3$ and $1 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ air alone and in combination caused injury to Lolium multiflorum only in the treatments with SO_2 . The plants accumulated less F and S after exposure to the combination than after exposure to the single pollutants. Effects on the light compensation point were not observed. SO_2 also had a greater effect on dry matter production and CO_2 gas exchange of Setaria italica than did HF. The combination of SO_2 and HF caused a more than additive reduction in apparent photosynthesis, although, as with Lolium multiflorum, F and S accumulation was lower than after exposure to the single pollutants. The light compensation point was raised in all cases.

BERICHTE DER

LANDESANSTALT FÜR IMMISSIONSSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, ESSEN

- LIS-Berichte -

- Bericht-Nr. 1: KRAUTSCHEID, S. und P. NEUTZ: - vergriffen -
LIDAR zur Fernüberwachung von Staubemissionen.
- Nachweis der Kalibrierfähigkeit eines LIDAR-Systems -
Kurztitel: Fernüberwachung mit LIDAR
1978. 47 Seiten mit 11 Abbildungen, 6 Tabellen und 4 Literaturhinweisen
- Bericht-Nr. 2: BUCK, M.:
Die Bedeutung unterschiedlicher Randbedingungen bei der Messung und
Beurteilung der Luftqualität.
Kurztitel: Randbedingungen bei der Beurteilung der Luftqualität.
1978, 44 Seiten mit 8 Abbildungen, 10 Tabellen und 20 Literaturhinweisen.
- Bericht-Nr. 3: SCHEICH, G.: - vergriffen -
Entwicklung und Anwendung von Ausbreitungsmodellen und Luftüberwachungs-
programme in den USA.
Kurztitel: Luftüberwachung und Ausbreitungsmodelle - Ein USA - Reisebericht -
1979. 47 Seiten mit 17 Abbildungen und 74 Literaturhinweisen
- Bericht-Nr. 4: SPLITTGERBER, H. und K.H. WIETLAKE:
Ermittlung der Luftschalldämmung von Bauelementen für Industriebauten
am Bau.
Kurztitel: Luftschalldämmung von Bauelementen für Industriebauten.
1979. 133 Seiten mit 53 Abbildungen, 13 Tabellen und 6 Literaturhinweisen.
- Bericht-Nr. 5: SPLITTGERBER, H.:
Meßgrößen und Meßwerte bei Erschütterungsimmissionen.
Zur Problematik der Meßgrößen und Meßwerte bei Erschütterungsimmissionen.
Kurztitel: Meßgrößen und Meßwerte bei Erschütterungsimmissionen.
1979. 52 Seiten mit 13 Abbildungen, 2 Tabellen und 27 Literaturhinweisen.
- Bericht-Nr. 6: STRAUCH, H.:
Ermittlung der Dämmwirkung von Dachentlüftern für Werkshallen im Einbau-
zustand unter Berücksichtigung der baulichen Nebenwege.
Kurztitel: Dämmwirkung von Dachentlüftern.
1979. 33 Seiten mit 13 Abbildungen, 2 Tabellen und 7 Literaturhinweisen.

- Bericht-Nr. 7:** KRAUSE, G.M.H., B. PRINZ und K. ADAMEK:
 Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Falschfarbenfotografie für die Aufdeckung und Dokumentation von Immissionswirkungen auf Pflanzen.
 Kurztitel: Falschfarbenfotografie - Ein Mittel zur Erkennung von Pflanzenschäden.
 1980. 43 Seiten mit 9 Abbildungen, 2 Tabellen und 11 Karten.
- Bericht-Nr. 8:** WIETLAKE, K.H.:
 Erschütterungsminderung durch "Direktabfederung" von Schabotte-Schmiedehämmern.
 Kurztitel: Erschütterungsminderung durch "Direktabfederung" von Schmiedehämmern
 1980. 59 Seiten mit 15 Abbildungen, 5 Tabellen und 7 Literaturhinweisen.
- Bericht-Nr. 9:** STRAUCH, H.:
 Methoden zur Aufstellung von Lärminderungsplänen.
 Kurztitel: Konzept für Lärminderungspläne.
 1980. 49 Seiten mit 11 Abbildungen und 18 Literaturhinweisen.
- Bericht-Nr.10:** HILLEN, R:
 Untersuchung zur flächenbezogenen Geräuschbelastungs-Kennzeichnung -Ziele, Methodik, Ergebnisse-.
 Kurztitel: Flächenbezogene Geräusch-Immissionen.
 1980. 75 Seiten mit 18 Abbildungen, 7 Tabellen und 12 Literaturhinweisen.
- Bericht-Nr.11:** Manns H., H. Gies und W. Stramplat:
 Erprobung des Staub-Immissionsmeßgerätes FH62I für die kontinuierliche Bestimmung der Schwebstoffkonzentration in Luft.
 Kurztitel: Schwebstaubmeßgerät FH62I für die automatisierte Immissionsmessung.
 1980. 26 Seiten mit 10 Abbildungen und 2 Literaturhinweisen.
- Bericht-Nr.12:** Giebel, J. :
 Verhalten und Eigenschaften atmosphärischer Sperrschichten.
 Kurztitel: Verhalten atmosphärischer Sperrschichten.
 1981. 39 Seiten mit 12 Abbildungen, 3 Tabellen und 4 Literaturhinweisen.
- Bericht-Nr.13:** Bröker, G., H. Gliwa und E. Meurisch:
 Abscheidegrade von biologisch- und chemisch-aktiven Aggregaten zur Desodorierung osmogener Abluft von Tierkörperbeseitigungsanlagen.
 Kurztitel: Desodorierung der Abluft aus Tierkörperbeseitigungsanlagen.
 1981. 44 Seiten mit 7 Abbildungen, 13 Tabellen und 14 Literaturhinweisen.