©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Carinthia II	175./95. Jahrgang	S. 27–45	Klagenfurt 1985

Aus dem Institut für Pflanzenphysiologie der Universität Wien

Zur Frage der Besiedelung schwermetallhältiger Abraumhalden in Bleiberg/Kärnten

Teil I: *Silene vulgaris* ssp. *glareosa* (JORD.) MARSDEN-JONES & TURILL.

Von Helmuth SIEGHARDT[1])

Mit 14 Abbildungen

Zusammenfassung: Die vorliegenden pflanzenanatomischen und physiologischen Untersuchungen wurden an *Silene vulgaris* ssp. *glareosa* (Caryophyllaceae) ausgeführt. Diese schwermetalltolerante Pflanze ist aufgrund ihres in große Tiefe reichenden, aber auch oberflächlich reich verzweigten Wurzelsystems in der Lage, die kalk- und schwermetallreichen Schutthalden im Raum Bleiberg/Kreuth in Kärnten zu besiedeln. *Silene* ist als „Oxalat-Typ" offenbar befähigt, den überwiegenden Teil des aufgenommenen Calciums durch vermehrte Produktion von Oxalat in Form unlöslicher Kristalldrusen im Blattgewebe festzulegen. Die Tatsache, daß in diesen Kristallen auch Zink nachgewiesen werden konnte, wird als ein Mechanismus zur Verminderung des Schwermetallstresses in der Pflanze angesehen. Eine Kontamination des Blattgewebes durch schwermetallhältigen Staub via Stomata ist wahrscheinlich und durch histochemische Befunde unterstützt. Nach diesen Befunden wird das Blei hauptsächlich an den Zellwänden des Rindengewebes der Wurzel adsorptiv gebunden. In jungen (primären) Wurzeln von *Silene* dürfte der Endodermis die Rolle einer partiellen Transportschranke für das Schwermetall Blei (nicht aber für das Element Zink) zukommen, die es der Pflanze ermöglicht, Blei von einem Ferntransport via Xylem in die oberirdischen Organe weitgehend auszuschließen. Für die Zinkaufnahme könnte das Calcium einen gewissen „stimulierenden" Effekt besitzen. Zum Unterschied von Blei, das hauptsächlich im Wurzelrindengewebe fixiert ist, sind die höchsten Zinkwerte in den Blättern zu beobachten. In der hohen Akkumulationskapazität der Zellwände für die Schwermetalle Blei und Zink wird ein weiterer Mechanismus zur Schwermetalltoleranz vermutet. *Silene* scheint aufgrund morphologisch-anatomischer und physiologischer Merkmale einen selektiven Vorteil zu besitzen, auf diesen Bergbauhalden auch zu überleben.

Summary: Anatomical and ecophysiological studies on uptake and distribution of heavy metals in *Silene vulgaris* ssp. *glareosa* (Caryophyllaceae) were carried out. This species is settling steep dumps in some mining areas in Bleiberg/Kreuth in Carinthia. The species

[1]) Publikation Nr. 56 der MaB-Projektgruppe Urbanökologie.

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

developes a well branched root system, which allows firm horizontal and vertical establishment as well and which is adapted to the special habitat conditions. Numerous crystals of calcium oxalate compounds (large oxalate druses) were found in the leaves, which are assumed to be depots for some heavy metals (e.g. for zinc). It is evident, that cell walls of the root tissue are the mainly sites of heavy metal deposition. The role of the endodermis as a partial barrier for radial heavy metal transport into the stele is discussed. A special histochemical method allows the detection of heavy metals (lead and zinc) in plant tissues. The root cortex cell wall capacity for heavy metals may be one reason for the heavy metal tolerance of this plant species.

1. EINLEITUNG

Die Besiedelung anthropogener Schwermetallstandorte, vor allem Aufschüttungen bergbaulicher Herkunft, bleibt nur wenigen Spezialisten unter den Pflanzen vorbehalten. Diese Schwermetallpflanzen oder „Metallophyten" sind an den betreffenden Lebensraum angepaßt; dies ermöglicht, sowohl den Schwermetallreichtum des Substrates als auch das oft einseitige Ionenangebot physiologisch zu bewältigen. Gelingt dies der Pflanze, so liegt nach LEVITT (1972) Schwermetallresistenz vor; im Sinne des Autors kann diese Widerstandskraft gegen den Stressor entweder durch eine Verhinderung der Schwermetallaufnahme in die Pflanze erreicht werden oder aber durch eine Toleranz, also eine physiologische Verträglichkeit, wobei das betreffende Schwermetallion intrazellulär häufig kovalent bzw. polar an eine organische Struktur (Chelator) gebunden ist.

Heutzutage gilt eine spezifische Schwermetallresistenz dann als gesichert, wenn die im Substrat des natürlichen Standortes vorhandenen Schwermetalle in pflanzenverfügbarer Form vorhanden sind (BAKER, 1978a, b, c, und 1981; BAUMEISTER, 1954; BIEBL, 1947; BRADSHAW, 1952; ERNST, 1966, 1968, 1972 und 1974; GREGORY und BRADSHAW, 1965; GRIES, 1966 und 1968; KARATAGLIS, 1982; RÜTHER, 1967; SCHILLER, 1974; SIMON, 1978; WILKINS, 1978; WU und ANTONOVICS, 1975a und b).

Im Raum Bleiberg/Kreuth (östliche Gailtaler Alpen) befinden sich zahlreiche Halden in z. T. sehr steilen Hanglagen, die aus dem Bergbau und der Verarbeitung schwermetallhältiger Erze (Blei-, Zink- und Molybdänerze) stammen. Diese Abraumhalden sind nur spärlich von einigen wenigen Pionierpflanzen, vornehmlich an den Rändern und in kleineren Oasen, besiedelt. Unter den Haldenpflanzen befinden sich Vertreter der Caryophyllaceen (z. B. *Minuartia verna* ssp. *verna, Saponaria ocymoides* und *Silene vulgaris* ssp. *glareosa*), die edaphisch begünstigtere (relativ feinerde- und nährstoffreiche) Standortnischen besiedeln. Einigen Arten aus dieser Familie, deren Verbreitungsschwerpunkt auf silikatischem Muttergestein liegt, wird die Fähigkeit zugeschrieben, den internen Spiegel an gelöstem Ca^{2+} z. B. durch die Produktion von Oxalat möglichst niedrig zu halten. KINZEL (1982) bezeichnet solcherart Pflanzen, die einem Gehalt an gelösten Calcium-Ionen durch Produktion von Oxalat oder anderen Ca-fällenden Verbindungen entgegenwirken, als „calciophobe"

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Typen; möglicherweise steht die Besiedelung der kalk- und schwermetallreichen Abraumhalden damit in Zusammenhang.

Aus der Literatur ist bekannt (vgl. ERNST, 1974), daß die Gattung *Silene* schwermetallresistente Ökotypen ausbildet. Dem Fragenkomplex der bauplanmäßigen Adaptation bzw. stoffwechselphysiologischen Konstitution in Zusammenhang mit der Schwermetalltoleranz gilt daher das besondere Interesse und soll in der vorliegenden Arbeit behandelt werden. Ein zweiter Teil soll sich mit ähnlicher Fragestellung mit *Erysimum sylvestre* beschäftigen, die ebenfalls befähigt ist, auf diesen extremen Standorten zu überleben, um typische Merkmale der Anpassung an diese Standorte besser definieren zu können.

2. MATERIAL UND METHODIK

Die extreme Steilheit des Geländes, der hohe Anteil an grobem Schuttmaterial, der Mangel an feinerdereichem organischen Substrat bedingen eine hohe Wasserleitfähigkeit und ein geringes Wasserhaltevermögen. Daraus resultiert im allgemeinen ein trockener Standort mit geringer Humusbildung inmitten eines humiden Klimagebietes (vgl. WALTER und LIETH, 1960). Eine detaillierte Standortsbeschreibung und eine ökophysiologische Charakterisierung einiger ausgewählter Haldenpflanzen findet sich bei MAIER et al., 1981.

Im Sommer 1983 wurden im Bereich der rutschenden und der ruhenden Halde sowie in angrenzenden Föhren-/Fichtenbeständen tieferer Hanglagen Pflanzenproben gewonnen. Aufgrund der besonderen ökophysiologischen Situation der Haldenpflanzen wurde speziell für die pflanzenanatomischen Studien *Silene vulgaris* ssp. *glareosa* ausgewählt. Diese Art bildet mit *Erysimum sylvestre* den Großteil der Vegetation auf diesem zentralen Teil der Halde. *Silene* scheint sich den extremen Bedingungen am Standort nicht nur physiologisch, sondern auch anatomisch-morphologisch durch die Ausbildung eines in große Tiefe reichenden Wurzelsystems gut angepaßt zu haben und somit auch zur Festigung des Substrates wesentlich beizutragen (vgl. Abb. 1).

Pflanzenanatomie: Das Probenmaterial wurde in die einzelnen Organe getrennt und anschließend in 70%igem Alkohol fixiert und konserviert. Für die pflanzenanatomischen Untersuchungen wurden sowohl Hand- (Flächenschnitte) und Mikrotomschnitte (Querschnitte) von Blättern als auch Schnittserien von Wurzeln (Haupt- und Seitenwurzeln) angefertigt. Die Schnittdicke betrug bei den Organquerschnitten 25–50 μm (Schlittenmikrotom OM, Fa. REICHERT-JUNG/Wien). Die Auswertung erfolgte mit Hilfe der Mikrofotographie (REICHERT Diavar mit elektronischer Systemkamera Kam Es). Alle Aufnahmen wurden mit Ilford Pan F (18 DIN/50 ASA) gemacht. Die REM-Aufnahmen wurden am Zentrum für Ultrastrukturforschung der Universität für Bodenkultur in Wien gemacht.

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

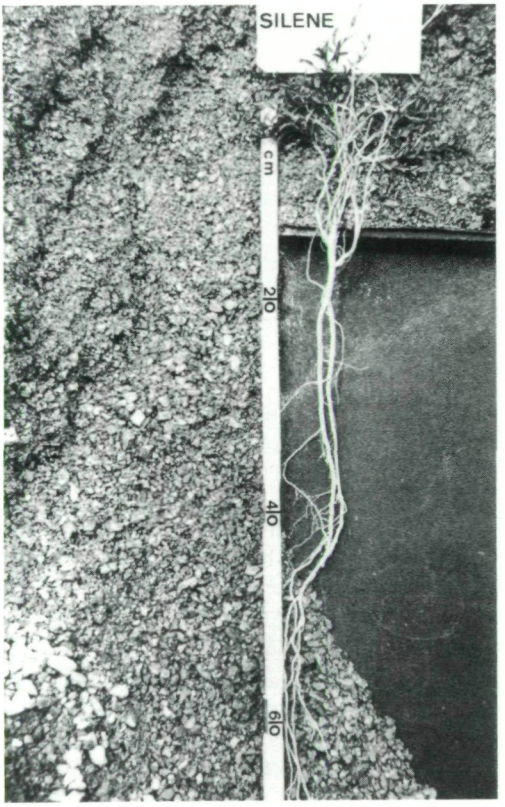

Abb. 1:
Wurzelsystem von *Silene vulgaris;* Standort „rutschende" Halde (Erläuterungen siehe Text).

Histochemie: Blei wurde mit Natriumrhodizonat ($C_6O_6Na_2$) histochemisch nachgewiesen, wobei Schnitt- und Stückfärbungen zur Anwendung gebracht wurden (methodische Einzelheiten siehe SIEGHARDT, 1984). Zink, neben Blei das häufigste Schwermetall in *Silene*, wurde mit Dithizon (Diphenylthiocarbazon) an fixiertem Material nach neuerlicher Rückführung in Aqua dest. nachgewiesen; Dithizon fällt ein schwach rosarotes Innerkomplexsalz aus neutraler Lösung. Allerdings ist die Zn-Spezifität dieses histochemischen Nachweises nicht ganz eindeutig.

Einzelne Kristalldrusen im Blatt von *Silene* wurden mikrochemisch durch verd. H_2SO_4 in Gips umgewandelt, der in Form einzelner Nadeln oder Nadelbüschel in Idioblasten des Blattmesophylls beobachtet werden konnte. Mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenstrahlanalyse (EDAX) konnte überdies die Elementzusammensetzung der Kristalldrusen bestimmt werden.

Quantitative Elementanalyse: Für die quantitative Elementanalyse wurde das aufgetrennte, bei 105°C getrocknete und zerkleinerte

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Pflanzenmaterial naß verascht (konz. $HClO_4$ und HNO_3 im Verhältnis 1:3) und die Elementgehalte mit Hilfe der Atomabsorptionsspektralphotometrie ermittelt.

3. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Blatt- und wurzelanatomische Studien

Das bifaziale Laubblatt von *Silene vulgaris* besitzt auf der Blattober- und Unterseite zahlreiche Spaltöffnungen, die teilweise in die Epidermis eingesenkt sind. Morphologisch lassen sich die Stomata aufgrund der Anordnung der Schließzellen und benachbarter Epidermiszellen dem sogenannten Caryophyllaceen-Typus (= diacytischer Typus) der Spaltöffnungen zuordnen; d. h., im typischen Fall ist jede Spaltöffnung von zwei Nebenzellen umgeben, deren gemeinsame Zellwand im rechten Winkel zur Längsachse der Stomata verläuft (Abb. 2; vgl. FAHN, 1982). Auffallend sind die verdickten und stark getüpfelten Zellwände der Epidermis, die zur mechanischen Festigung des Oberhautgewebes mitbeitragen. Die charakteristische Mikromorphologie der oberen und unteren Blattepidermis bietet Möglichkeiten zur Deposition von Staubpartikeln unterschiedlicher Größe und Form (vgl. Abb. 3). Es ist nicht auszuschließen, daß vor allem kleinere Einzelstaubpartikel in die Spaltöffnungen gelangen und damit die Mechanik des Spaltöffnungsapparates (das Öffnen und Schließen der Stomata) wesentlich beeinträchtigen können. Die Folge wäre dann eine

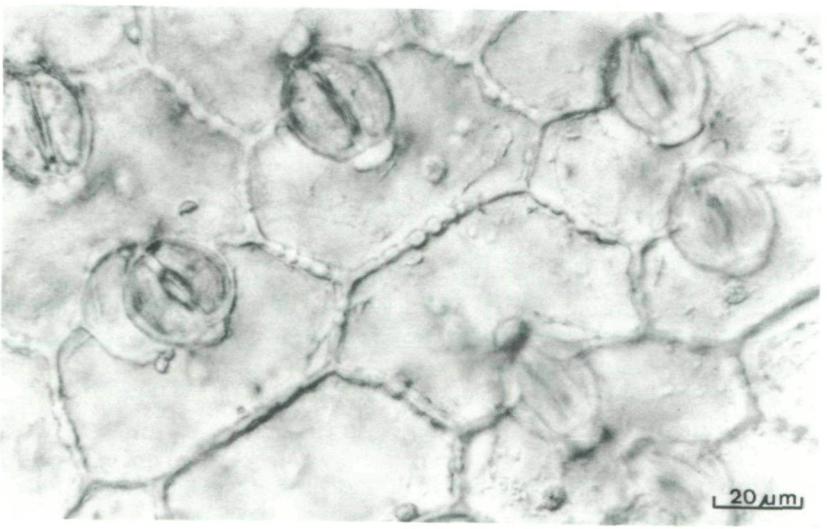

Abb. 2: Blattunterseite von *Silene:* Spaltöffnungen in Aufsicht; die Zellwände benachbarter Epidermiszellen sind getüpfelt (partieller Interferenzkontrast).

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

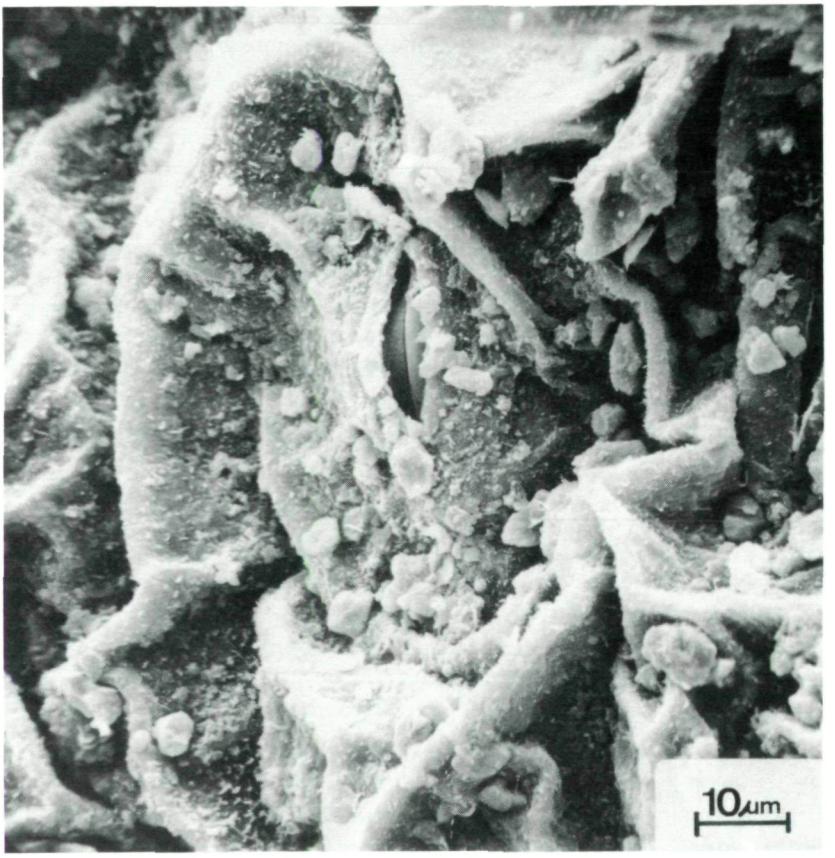

Abb. 3: Rasterelektronenmikroskopisches Bild der Blattoberseite von *Silene* (Ausschnitt); die Deposition von Staubpartikeln um die Spaltöffnung ist deutlich zu sehen.

weitgehend unkontrollierte Wasserdampfabgabe durch einzelne Stomata, was bei einer unzureichenden Wasserversorgung der Pflanze zu einem Anstieg des Wassersättigungsdefizites des Blattes führen und somit Auswirkungen auch auf das gesamte Energiebudget der Pflanze haben müßte (vgl. FLÜCKIGER et al., 1977; MAIER et al., 1979).

Das Assimilationsgewebe des Blattes ist in ein oberes und unteres Palisadenparenchym sowie in ein medianes Schwammparenchym gegliedert; letzteres ist Sitz zahlreicher kollateral-geschlossener Gefäßbündel. Das Hauptbündel ist von einer parenchymatischen Bündelscheide umschlossen; der abaxiale Phloemteil trägt eine Kappe aus kollenchymatischen Zellen, die auch zur mechanischen Festigung des Blattes mitbeitragen.

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

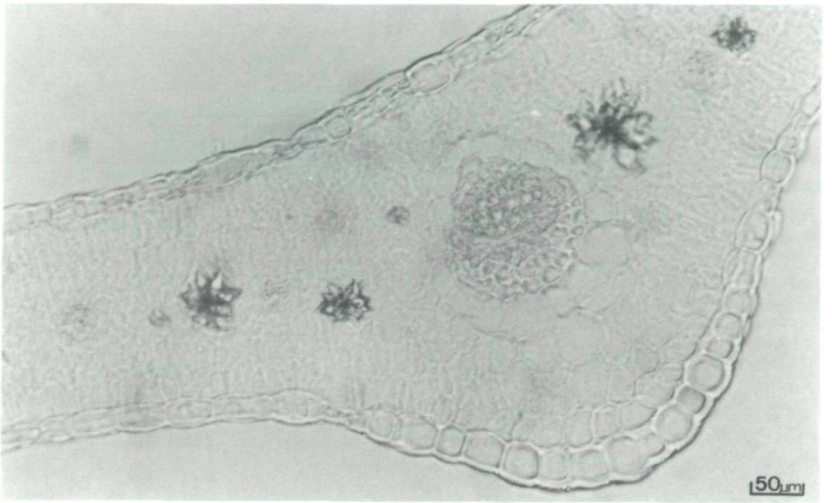

Abb. 4: Blattquerschnitt von *Silene;* die Kristallidioblasten liegen im Schwammparenchym des Blattes.

Bemerkenswert sind die zahlreichen Kristalldrusen im Blattmesophyll (vgl. Abb. 4 u. 5). Die Gattung *Silene* scheint in hohem Maße die Fähigkeit zu besitzen, den überwiegenden Teil des aufgenommenen Calciums durch vermehrte Produktion von Oxalat in Form von unlöslichem Ca-

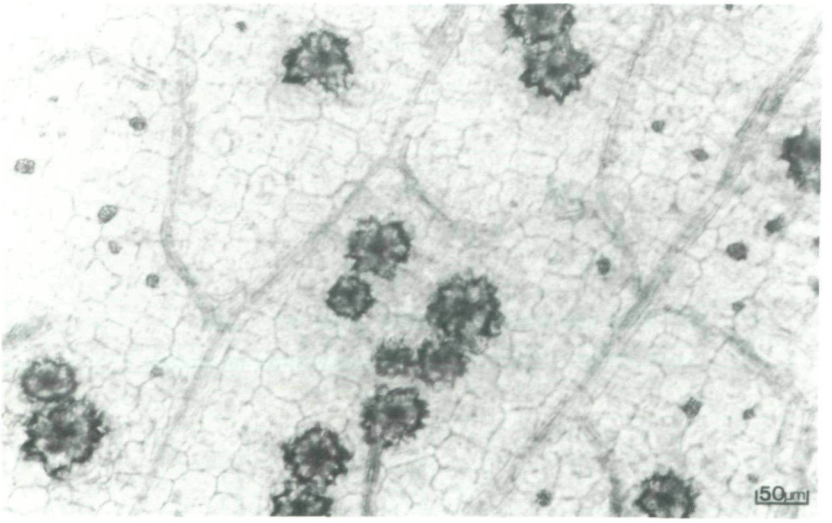

Abb. 5: Blattunterseite von *Silene* (Flächenansicht): zahlreiche Oxalat-Kristalle liegen in den Interkostalfeldern zwischen den Hauptnerven (Aufhellung mit Chloralhydrat).

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Abb. 6: Ca-Oxalatdrusen aus dem Blattmesophyll von *Silene* (Interferenzkontrast).

Oxalat festzulegen und damit den inneren Spiegel an gelöstem Ca^{2+} niedrigzuhalten. Wie bereits in der Einleitung ausgeführt, charakterisiert KINZEL (1982) in diesem Zusammenhang die sich entsprechend verhaltenden Caryophyllaceen als „calciophobe" Physiotypen.

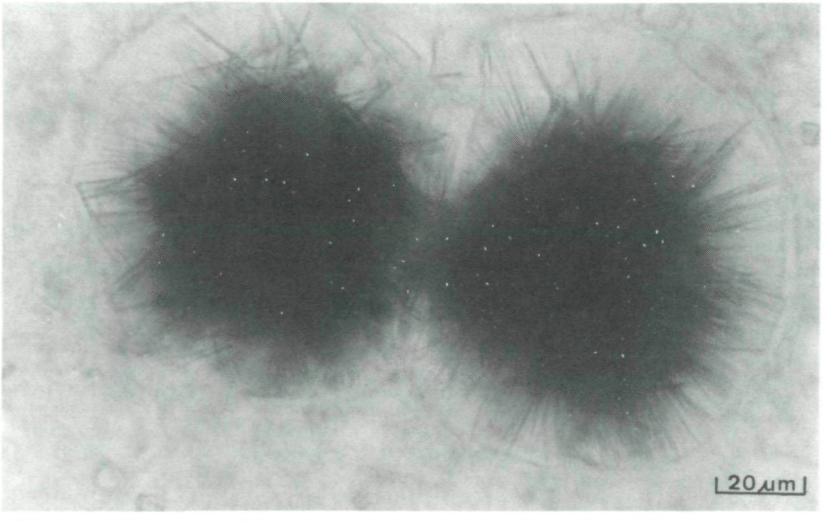

Abb. 7: Bildung monokliner Gipsnadeln nach Behandlung der Oxalatdrusen mit verd. H_2SO_4.

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Histochemisch läßt sich sehr leicht überprüfen, ob diese Kristalldrusen aus Ca-Oxalat bestehen; wie die Abbildungen 6 und 7 zeigen, wandeln sich Oxalatdrusen unter Einwirkung von verdünnter Schwefelsäure sehr rasch in Gips um. Man kann z. B. an Blattflächenschnitten die Entstehung einzelner Gipsnadeln in den Kristallidioblasten in situ gut verfolgen. Mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenstrahlmikroanalyse (EDAX) war es möglich, einzelne dieser Kristalle im Rasterelektronenmikroskop auf ihre qualitative Elementzusammensetzung zu untersuchen (Abb. 8 und 9). Neben dem Gehalt an Calcium überrascht vor allem der hohe Anteil an Eisen in den Kristallen; auch Zink konnte in geringem Ausmaß festgestellt werden. Blei hingegen war in keinem der untersuchten Kristalle nachzuweisen; es ist aber nicht auszuschließen, daß dieses Schwermetall an andere organische Strukturen gebunden ist, die eben dieser Methode nicht zu-

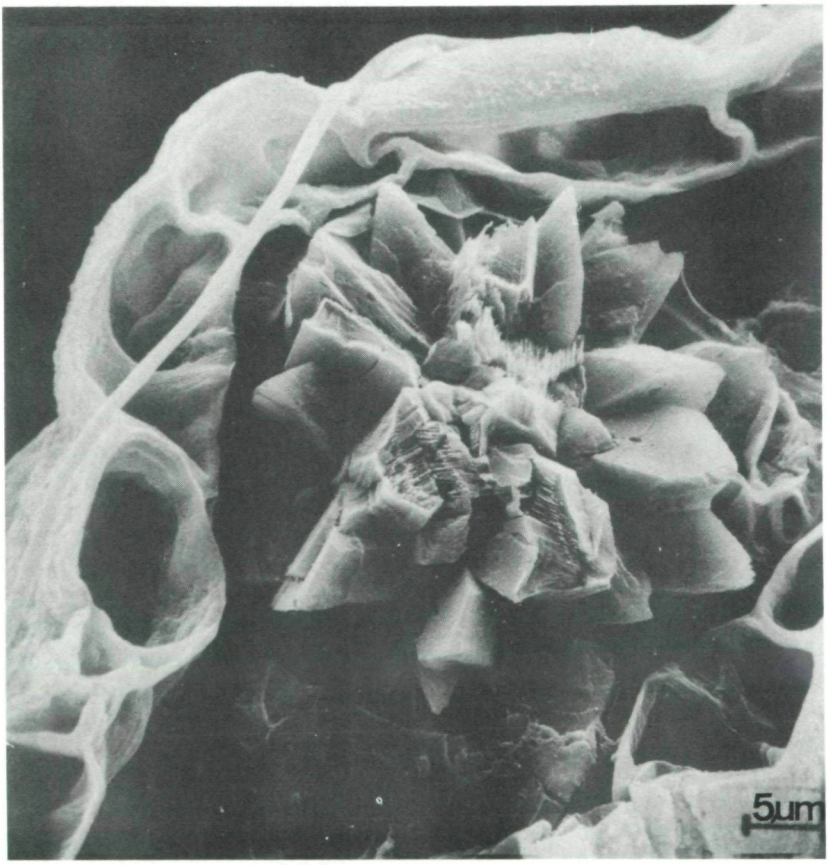

Abb. 8: Ca-Oxalatdruse aus dem Blattgewebe von *Silene* (REM-Aufnahme).

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

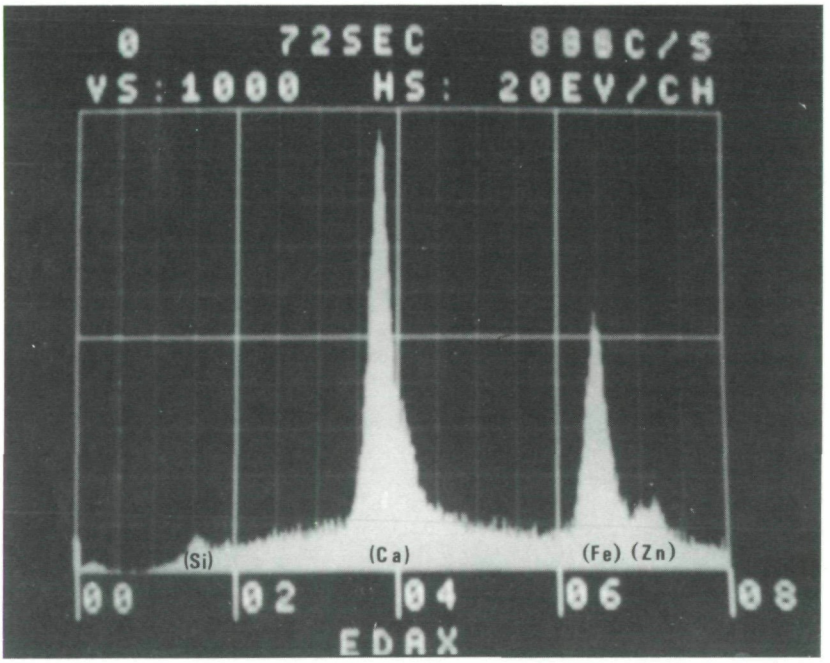

Abb. 9: Energiedispersives Spektrum einer Kristalldruse: neben Ca sind die Elemente Fe, Si und Zn in der Kristalldruse enthalten.

gänglich sind. Aus der Literatur ist bekannt, daß manche Kristalle in pflanzlichen Geweben auch als Depots für Schwermetall-Kationen dienen können (AHMAD, 1968; MORRISON et al., 1981). Auf diese Weise könnten auch toxische Schwermetalle in Verbindung mit Ca^{2+} in Oxalatkristallen immobilisiert und damit dem Stoffwechsel entzogen werden – Möglichkeit einer Schwermetalltoleranz durch Immobilisierung der Schwermetalle in den Kristalldrusen von *Silene*.

Das intakte Wurzelsystem von *Silene vulgaris* besteht aus einer meist in größere Tiefe (70 bis 100 cm) reichenden Pfahlwurzel und aus mehreren oberflächennahen Seiten- und Feinwurzelsystemen. Dies ermöglicht der Pflanze, sich einerseits im rutschenden Substrat fest zu verankern und andererseits mit ihren Feinwurzeln relativ nährstoffreiche Mirkoareale des Rohbodens zu besiedeln. Den hohen mechanischen Anforderungen entspricht auch der anatomische Bau der Wurzeln. Haupt- und Seitenwurzeln lassen kaum Unterschiede erkennen: die Wurzelachse ist in der Regel von einem mehr oder weniger mächtigen Periderm nach außen hin abgeschlossen. Durch die rauhe und z. T. sehr rissige Oberfläche des Korkmantels (vgl. Abb. 10) wird eine Schwermetallkontamination des Wurzelrindengewebes wahrscheinlich; histochemisch konnten jedenfalls sog. „spots"

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

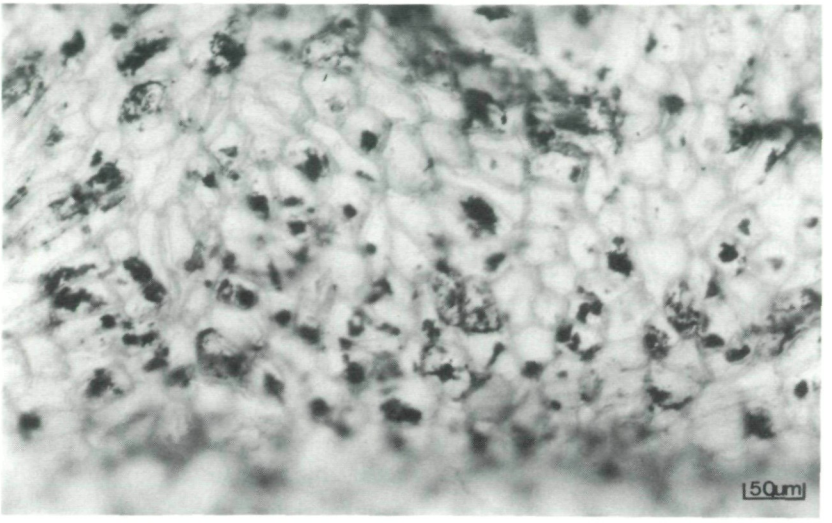

Abb. 10: Längsschnitt durch eine Seitenwurzel von *Silene;* die dunklen Flecken sind Orte eines positiven Pb-Nachweises im Bereich des Periderms.

(Orte eines positiven Schwermetallnachweises) in großer Zahl an Seitenwurzeln festgestellt werden, die als Kontaktstellen zu schwermetallhältigen Bodenpartikeln gedeutet werden. Auf diese Weise könnten toxische Schwermetalle in den AFS der Wurzel gelangen, und zwar unabhängig von der Aufnahme über das Feinwurzelsystem mit seinen zahlreichen Wurzelhaaren. Unter dem Korkgewebe folgt in zentripetaler Richtung die sekundäre Rinde, die sowohl bei Haupt- als auch Seitenwurzeln in eine äußere und in eine innere Rinde unterteilt ist (Abb. 11); die Zellen der äußeren Rinde sind in der Regel weitlumiger als die der inneren Rinde, und die Zellwände sind kollenchymatisch verdickt. In der lebenden Wurzel dient dieser Teil der Rinde als Reservestoffspeicher für diverse Kohlenhydrate. Der kompakte Bau des Xylems ist für eine sekundäre Wurzel typisch: es ist aus größeren und kleineren Gefäßen und z. T. verholztem Parenchym aufgebaut (Abb. 12).

Zum histochemischen Schwermetallnachweis

Bereits im Zuge früherer Untersuchungen (vgl. MAIER et al., 1981) konnten Hinweise auf eine spezifische Schwermetallaufnahme in das Wurzelsystem von Haldenpflanzen gewonnen werden. Speziell bei *Silene* gelang der histochemische Nachweis der Bleiaufnahme und -fixierung (zur Methodik vgl. SIEGHARDT, 1984). In der Abb. 11 ist zu sehen, daß das Blei hauptsächlich in der Rinde und hier vor allem in den äußeren Rindenzellen fixiert ist. Das Gewebe des Zentralzylinders scheint hingegen weitgehend bleifrei zu sein (vgl. Abb. 12); histochemisch konnte dieses Schwermetall

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

nur in Einzelfällen in den Zellwänden größerer Gefäße und im Xylemparenchym nachgewiesen werden. Wie ja bekannt ist, sind vor allem die Zellwände bevorzugte Adsorptionsstellen für die Bleiionen (LANE u. MARTIN, 1977 und 1980; LANE et al., 1978). Als wahrscheinliche Bindungsstellen kommen dabei Pektine in Frage, die aufgrund ihrer „anionischen Eigenschaften" als natürliche Kationenaustauscher zur Bindung von divalenten Metallkationen befähigt sind. Andererseits ist die Akkumulationskapazität der sekundären und z. T. verdickten Zellwände im Rindengewebe älterer Wurzeln größer; d. h., es steht ein größerer Pool an freien Adsorptionsstellen für das Schwermetall zur Verfügung, und deshalb wird mit zunehmendem Alter der Wurzel auch mehr Blei in diesem Organ akkumuliert. Die Mobilität bzw. die Translokation des Bleis in die oberirdischen Organe hängt nicht zuletzt von der Sättigung dieser freien (austauschbaren) Stellen in der Zellwandmatrix ab. Aufgrund histochemischer Befunde ist anzunehmen, daß bei der Entladung des Schwermetalltransportes in die Xylembahnen das Xylemparenchym mitbeteiligt ist; der positive Bleinachweis in diesen Zellen unterstützt diese Ansicht (vgl. anschließendes Kapitel). Wie aus der Abb. 11 weiters zu sehen ist, zeigt sich der Bleiniederschlag bevorzugt an der Grenze zwischen innerer Zellwandlamelle und Zellumen. Eine aktive Beteiligung der beiden Plasmagrenzschichten (Plasmalemma und Tonoplast) läßt sich aus den histochemischen Befunden allein nicht ableiten. Es wäre aber denkbar, daß Interaktionen des Bleis z. B. mit Phosphat zur Bildung unlöslicher Metallphosphate führen; ähnliche Wechselbeziehungen dieses Schwermetalles mit

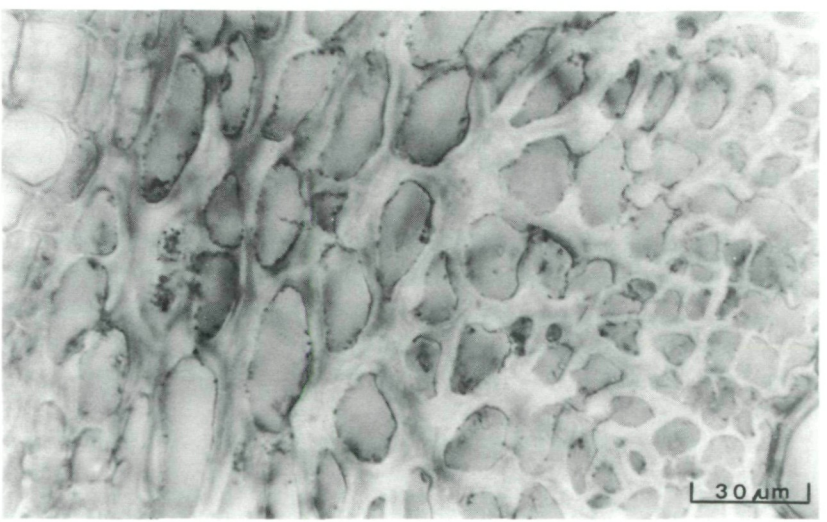

Abb. 11: Querschnitt durch eine sekundäre Wurzel von *Silene*; Pb-Nachweis im Bereich der äußeren sekundären Wurzelrinde (körnig-granulärer Niederschlag an der Grenze Zellwand/Zellumen).

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

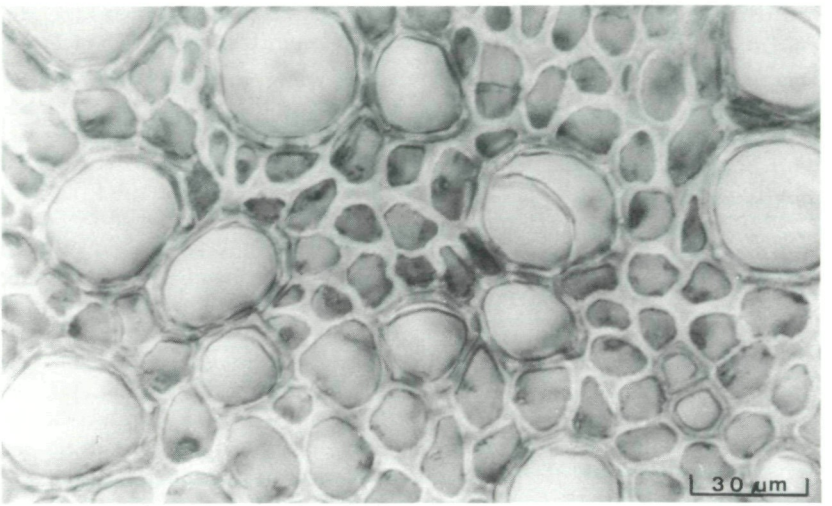

Abb. 12: Bereich des sek. Xylems; positiver Bleinachweis nur vereinzelt um die größeren Gefäße bzw. in den angrenzenden Parenchymzellen.

Phosphatasen, ATPasen und proteingebundenen SH-Gruppen werden als mögliche Mechanismen zur Bleitoleranz angesehen (vgl. ERNST, 1982).

Aufgrund der hohen Spezifität von Natriumrhodizonat für Blei (bzw. mit Einschränkung von Dithizon für Zink) kann anhand von Schnittserien durch das Wurzelgewebe der Weg dieses Schwermetalles in zentripetaler Richtung bis in den Zentralzylinder lichtmikroskopisch „sichtbar" gemacht werden. Die Aufnahme bzw. die freie Diffusion des Bleis in den AFS*) der Wurzel läßt sich mit dieser histochemischen Methode in situ gut verfolgen.

Die quantitative Bestimmung von Schwermetallen
(nach nasser Veraschung)

Nach Mitteilungen der BBU in Bleiberg/Kreuth weist das kalkreiche Schuttmaterial der Abraumhalden Blei- und Zinkgehalte von durchschnittlich 5000 bis 7000 ppm Blei und 20.000 bis 25.000 ppm Zink auf. Da derzeit noch keine Daten über die Menge an pflanzenverfügbaren Schwermetallen in diesem Substrat vorliegen, können noch keine Aussagen zum Boden-Wurzel-Kreislauf der Schwermetallbelastung gemacht werden. Nach Untersuchungen von ZÖTTL et al. (1979), HERMS u. BRÜMMER (1984) werden die Schwermetalle Blei und Zink vor allem an pedogenen Oxiden, Tonmineralen und im Humus (Humin- und Fulvosäuren) ad-

*) AFS (Apparent Free Space)

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

sorptiv festgelegt, wobei organische und mineralische Komplexbildner die Ad- und Desorptionsreaktionen wesentlich beeinflussen können.

Das Ausmaß der Schwermetallverfügbarkeit hängt in erster Linie vom pH der Bodenlösung ab: mit steigendem pH nimmt die Löslichkeit des Bleis in der Bodenlösung ab, während umgekehrt die Rücklösung des Zinks aus dem Sorptionskomplex deutlich ansteigt (PICKERING, 1983). Dabei ist allerdings mit der Bildung von Hydroxiden zu rechnen, die die Pflanzenverfügbarkeit von Schwermetallen beeinflussen (vgl. ERNST, 1968). Ferner ist ja zu berücksichtigen, daß durch die Stoffwechselaktivität der Wurzeln sowohl die physikochemischen als auch die biologischen Eigenschaften des Bodens verändert werden; so führt etwa eine vermehrte Kationenaufnahme in das Wurzelgewebe zur Freisetzung von H^+ im Austausch für Kationen, wodurch die Bodenacidität merklich ansteigt. Umgekehrt kann es bei Aufnahme überwiegend anionischer Nährstoffe zur OH^- bzw. HCO_3^- „Produktion" der Pflanzenwurzeln kommen. Auf diese Art und Weise werden im Nahbereich der Wurzelsysteme (Rhizosphäre) Bedingungen geschaffen, die, nach Bodenart und Bodentypus verschieden, zu einer unterschiedlichen Nährstoffversorgung der Pflanze führen können. Für den alkalischen Rohboden der Bleiberger Schutthalden bedeutet dies, daß *Silene vulgaris* auch unter diesen Umständen die Schwermetalle Blei und Zink in das Wurzelsystem aufnehmen kann.

Wie aus den Untersuchungen von BAKER (1978c), JOHNSTON u. PROCTOR (1977) und SIMON (1978) hervorgeht, führt ein hoher Calciumspiegel in der Außenlösung bei Zn/Pb-toleranten Populationen von *Silene maritima* zu einem bemerkenswerten Anstieg dieser Schwermetalle im Wurzelgewebe; parallel dazu konnte aber eine verminderte Translokation von Zn/Pb in die oberirdischen Organe festgestellt werden. Vom Ca^{2+} ist ja bekannt, daß es einen gewissen „stabilisierenden Effekt" z. B. auf das Plasmalemma bei Streßbedingungen haben kann; diese Eigenschaft und die Rolle des Calciums bei Vorgängen der Membranpermeabilität unterstreichen die Bedeutung dieses Makronährstoffes für die Schwermetalltoleranz (WAINWRIGHT u. WOOLHOUSE, 1977; WILKINS, 1957).

Die Abbildungen 13 und 14 zeigen die Schwermetallgehalte in den Wurzeln und Blättern von *Silene*. Blei wird hauptsächlich in den Wurzeln festgelegt, wobei der überwiegende Teil in der Wurzelrinde fixiert ist. Im Zentralzylinder ist wesentlich weniger Blei festzustellen. Diese analytischen Ergebnisse unterstützen sehr gut die cytologischen Befunde, wonach der Großteil des Bleis in den Zellwänden der sekundären Rinde fixiert ist (vgl. Abb. 11 und 12).

Der Bleinachweis in den Blättern von *Silene* muß nicht zwangsläufig bedeuten, daß dieses Schwermetall via Xylembahnen in die oberirdischen Organe transportiert und hier deponiert wird. Wie Abb. 3 deutlich zeigt, ist eine Kontamination der Blätter mit schwermetallhältigem Staub gegeben; einzelne Staubpartikel (geeigneter Form und Größe) können durch-

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

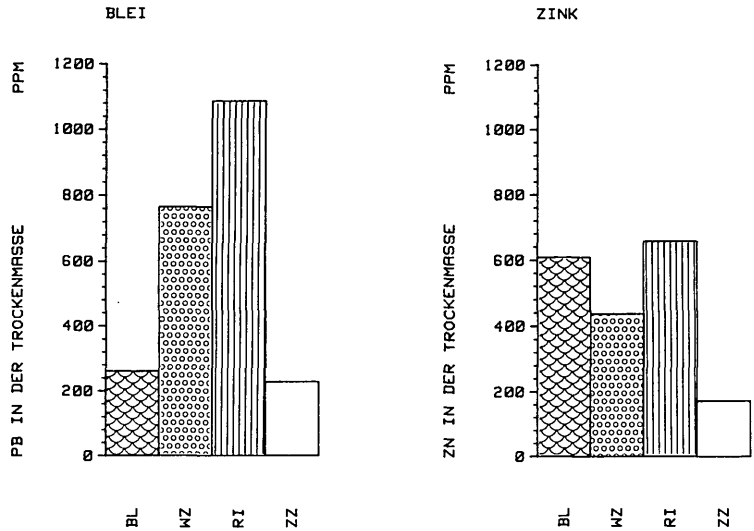

Abb. 13: Blei- und Zinkgehalt in der Trockenmasse von *Silene*. Bl: Blatt; WZ: Wurzel total; RI: Wurzelrinde; ZZ: Zentralzylinder der Wurzel.

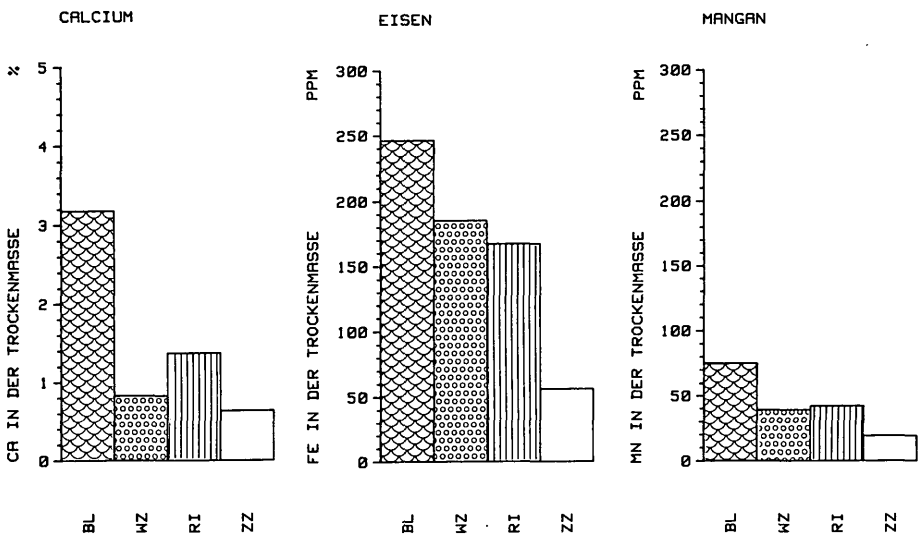

Abb. 14: Ca-, Fe- und Mn-Gehalt in der Trockenmasse von *Silene*. BL: Blatt; WZ: Wurzel total; RI: Wurzelrinde; ZZ: Zentralzylinder der Wurzel.

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

aus über die Stomata in das Blatt gelangen und hier mitunter zu toxischen Veränderungen des Gewebes führen. Histochemische Befunde sprechen jedenfalls für diese Möglichkeit.

Spezifische Aussagen über eine Schwermetallkontamination von Organen oder Gewebetypen können nach Totalanalyse pflanzlichen Probenmaterials nicht mehr gemacht werden. Histochemische und cytologische Untersuchungen vergrößern deshalb den Informationsgehalt über Schwermetallwirkungen und gestatten darüber hinaus, die Transportwege und die Kompartimentierung von Schwermetallen in pflanzlichen Geweben auch bildanalytisch zu erfassen (vgl. auch die Methode der Autoradiographie).

Für Zink lassen die Ergebnisse einen anderen Aufnahme- und Transportmechanismus vermuten: zwar läßt sich im Rindengewebe der Wurzel mehr Zink nachweisen als im Zentralzylinder, doch ist der Anteil in den Blättern bedeutend höher als in der gesamten Wurzel (Abb. 13). Die Mobilität des Zinks in der Wurel bzw. der Transport in die oberirdischen Organe scheint gegenüber Blei bevorzugt; der Zn-Gehalt liegt in den Blättern von *Silene* um das 2,3fache höher als der von Blei. Es kann aber hier nicht entschieden werden, ob diese „Förderung" des Zink-Transportes in die Sprosse auf das hohe Calciumangebot in der Bodenlösung zurückzuführen ist, wie dies BAKER (1978c) vermutet, oder aber die Folge eines vermehrten Effluxes an der Grenzfläche Xylemparenchym/Leitgefäße ist (vgl. OBERLÄNDER u. ROTH, 1978). ERNST (1982) hält die Bildung von Zn-Oxalat und anderer Zinkkomplexe z. B. in den Vakuolen des Blattgewebes zinktoleranter Pflanzen für möglich; der Autor sieht im Entzug des Schwermetalles aus dem aktiven Stoffwechsel (Bildung unlöslicher Zn-Verbindungen) einen physiologischen Mechanismus zur Schwermetalltoleranz der Pflanze (vgl. GODBOLD et al., 1984).

Hinsichtlich des Fe- und Mn-Gehaltes ist auffällig, daß das Eisen vor allem in den Blättern den höchsten Wert erreicht; mit hoher Wahrscheinlichkeit wird dieser Mikronährstoff in Oxalatdrusen irreversibel festgelegt, wie dies aus der Röntgenstrahl-Mikroanalyse hervorgeht (Abb. 9). Ob dadurch das Eisen, bekanntlich ein unentbehrlicher Pflanzennährstof, für Oxalatpflanzen möglicherweise zum Mangelfaktor wird und welche ökologischen Konsequenzen sich daraus ergeben, soll durch weitere Untersuchungen (vor allem Bodenanalysen) einer Klärung zugeführt werden.

Der sehr niedrige Mangangehalt wiederum könnte als Reaktion auf erhöhte Bleimengen in den Wurzeln angesehen werden; er ist einerseits durch den Austausch von H^+ aus dem Sorptionskomplex gegen Pb^{2+} und dem damit verbundenen Anstieg der Bodenacidität zu erklären und andererseits könnte durch die Aktivität der im Boden vorhandenen Bakterien die Mobilisierung des wesentlich leichter löslichen Mn^{2+}-Ions induziert werden (vgl. HORAK, 1979). Aufgrund der geringen Konzentration dürften aber keine toxischen Wirkungen zu erwarten sein.

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

DANK

Der Österreichischen Akademie der Wissenschaften und der Gemeinde Wien danke ich für die finanzielle Unterstützung. Herrn Univ.-Doz. Dr. R. ALBERT möchte ich für seine Diskussionsbereitschaft und für wertvolle Anregungen zu dieser Arbeit herzlich danken. Weiters gilt mein besonderer Dank Frau Dipl.-Ing. M. SARA und Herrn Dr. H. MÜLLER (Universität für Bodenkultur) für ihre technische Hilfestellung bei den REM-Aufnahmen.

LITERATUR

AHMAD, R. (1968): The mechanism of salt tolerance in *Suaeda fruticosa* and *Haloxylon recurvum*. – Plant and Soil 28(2):357–361.

BAKER, A. J. M. (1978a): Ecophysiological aspects of zinc tolerance in *Silene maritima* With. – New Phytol. 80:635–642.

– (1978b): Zinc-phosphorus interactions in a zinc-tolerant and non-tolerant population of *Silene maritima* With. – New Phytol. 81:331–339.

– (1978c): The uptake of zinc and calcium from solution culture by zinc-tolerant and non-tolerant *Silene maritima* With. in relation to calcium supply. – New Phytol. 81:321–330.

– (1981): Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. – Journal of Plant Nutrition 3(1–4):643–654.

BAUMEISTER, W. (1954): Über den Einfluß des Zinks bei *Silene inflata* SMITH. – Ber. Deutsch. Bot. Ges. 67:205–213.

BIEBL, R. (1947): Die Resistenz gegen Zink, Bor und Mangan als Mittel zur Kennzeichnung verschiedener pflanzlicher Plasmasorten. – Sitzber. Österr. Akad. Wiss., mathem.-naturwiss. Kl., Abt. I., 155:145–157.

BRADSHAW, A. D. (1952): Populations of *Agrostis tenuis* resistant to lead and zinc poisoning. – Nature (Lond.) 169:1098.

ERNST, W. (1966): Ökologisch-soziologische Untersuchungen an Schwermetallpflanzengesellschaften Südfrankreichs und des östlichen Harzvorlandes. – Flora (Jena) B 156:301–318.

– (1968): Zur Kenntnis der Soziologie und Ökologie der Schwermetallvegetation Großbritanniens. – Ber. Deutsch. Bot. Ges. 81:116–124.

– (1972): Schwermetallresistenz und Mineralstoffhaushalt. – Forschungsber. Land. Nordrhein-Westfalen 2251:1–38.

– (1974): Schwermetallvegetation der Erde. – Geobotanica selecta V, G. Fischer Verlag, Stuttgart.

– (1982): Schwermetallpflanzen. – In: H. KINZEL (ed.), Pflanzenökologie und Mineralstoffwechsel, Verlag E. Ulmer, Stuttgart.

FAHN, A. (1982): Plant anatomy (third edition). Pergamon Press Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris und Frankfurt.

FLÜCKIGER, W., H. FLÜCKIGER-KELLER, J. J. OERTLI und R. GUGGENHEIM (1977): Verschmutzung von Blatt- und Nadeloberflächen im Nahbereich einer Autobahn und deren Einfluß auf den stomatären Diffusionswiderstand. – Eur. J. For. Path. 7:358–364.

GODBOLD, D. L., W. J. HORST, J. C. COLLINS, D. A. THURMAN and H. MARSCHNER (1984): Accumulation of zinc and organic acids in roots of zinc-tolerant and non-tolerant ecotypes of *Deschampsia caespitosa*. – J. Plant Physiol. 116:59–69.

GREGORY, R. P. G., and A. D. BRADSHAW (1965): Heavy metal tolerance in populations of *Agrostis tenuis* Sibth. and other grasses. – New Phytol. 64:131–143.

GRIES, B. (1966): Zellphysiologische Untersuchungen über die Zinkresistenz bei Galmeiökotypen und Normalformen von *Silene cucubalus* Wib. – Flora (Jena) B 156:271–290.

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

– (1968): Über die Zinkresistenz der Schwermetallform von *Silene cucubalus* var. *humilis* im Laufe der Vegetationsperiode. – Ber. Deutsch. Bot. Ges. 81:276–285.

HERMS, U., und G. BRÜMMER (1984): Einflußgrößen der Schwermetallöslichkeit und -bindung in Böden. – Z. Pflanzenernaehr. Bodenk. 147:400–424.

HORAK, O. (1979): Untersuchungen zur Bleiaufnahme der Pflanze. – Die Bodenkultur 30(2):120–126.

JOHNSTON, W. R., and J. PROCTOR (1977): A comparative study of metal levels in plants from two contrasting lead-mine sites. – Plant and Soil 46:251–257.

KARATAGLIS, S. S. (1982): Combined tolerance to copper, zinc and lead by populations of *Agrostis tenuis*. – Oikos 38:234–241.

KINZEL, H. (1982): Pflanzenökologie und Mineralstoffwechsel. – Verlag E. Ulmer, Stuttgart.

LANE, S. D., and E. S. MARTIN (1977): A histochemical investigation of lead uptake in *Raphanus sativus*. – New Phytol. 79:281–286.

– (1980): Further observations on the distribution of lead in juvenile roots of *Raphanus sativus*. – Z. Pflanzenphysiol. 97:145–152.

LANE, S. D., E. S. MARTIN and J. F. GARROD (1978): Lead toxicity effects on indole-3-ylacetic acid-induced cell elongation. – Planta 144:79–84.

LEVITT, J. (1972): Responses of plants to environmental stress. – Acad. Press, New York–San Francisco–London.

MAIER, R., M. ALTGAYER, W. PUNZ, C. RAMMER, R. SCHINNINGER, H. SIEGHARDT, H. SLAD und C. WINTER (1979): Wasserhaushalt und Produktivität staubbelasteter Pflanzen in der Umgebung einer Zementfabrik in Kärnten. – Carinthia II, Klagenfurt, 169./89:167–193.

MAIER, R., W. PUNZ, H. SIEGHARDT, E. DOMSCHITZ, A. NAGL, S. WIENER, A. KULHANEK und W. MÜHLEBNER (1981): Zur Ökologie einiger Pflanzen auf den schwermetallhaltigen Halden in Bleiberg/Kärnten. – Carinthia II, Klagenfurt, 171./91.:201–222.

MORRISON, R. S., R. R. BROOKS, R. D. REEVES, F. MALAISSE, P. HOROWITZ, M. ARONSON and G. R. MERRIAM (1981): The diverse chemical forms of heavy metals in tissue extracts of some metallophytes from Shaba province, Zaïre. – Phytochemistry 20:455–458.

OBERLÄNDER, H. E., und K. ROTH (1978): Die Wirkung der Schwermetalle Chrom, Nickel, Kupfer, Zink, Cadmium, Quecksilber und Blei auf die Aufnahme und Verlagerung von Kalium und Phosphat bei jungen Gerstenpflanzen. – Z. Pflanzenernaehr. Bodenk. 141:107–116.

PICKERING, W. F. (1983): Extraction of copper, lead, zinc or cadmium ions sorbed on calcium carbonate. – Water, Air, and Soil Pollut. 20:299–309.

RÜTHER, F. (1967): Vergleichende physiologische Untersuchungen über die Resistenz von Schwermetallpflanzen. – Protoplasma 64:400–425.

SCHILLER, W. (1974): Versuche zur Kupferresistenz bei Schwermetallökotypen von *Silene cucubalus* Wib. – Flora (Jena) 163:327–347.

SIEGHARDT, H. (1984): Eine anatomisch-histochemische Studie zur Bleiverteilung in Primärwurzeln von *Pisum sativum* L. – Mikroskopie (Wien) 41:125–133.

SIMON, E. (1978): Heavy metals in soils, vegetation development and heavy metal tolerance in plant populations from metalliferous areas. – New Phytol. 81:175–188.

WAINWRIGHT, S. J., and H. W. WOOLHOUSE (1977): Some physiological aspects of zinc tolerance in *Agrostis tenuis* Sibth.: Cell elongation and membrane damage. – J. exp. Bot. 28:1029–1036.

WALTER, H., und H. LIETH (1960): Klimadiagramm-Weltatlas. – VEB G. Fischer Verlag, Jena.

WILKINS, D. A. (1957): A technique for the measurement of lead tolerance in plants. – Nature (Lond.) 180:37–38.

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

– (1978): The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth. – New Phytol. 80:623–633.

WU, L., and J. ANTONOVICS (1975a): Zinc and copper uptake by *Agrostis stolonifera*, tolerant to both zinc and copper. – New Phytol. 75:231–237.

– (1975b): Experimental ecological genetics in *Plantago*. – I. Induction of roots and shoots on leaves for large scale vegetative propagation and metal tolerance testing in *Plantago lanceolata*. – New Phytol. 75:277–282.

ZÖTTL, H. W., K. STAHR und F. HÄDRICH (1979): Umsatz von Spurenelementen in der Bärhalde und ihren Ökosystemen. – Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 29:569–576.

Anschrift des Verfassers: Dr. Helmuth SIEGHARDT, Institut für Pflanzenphysiologie der Universität Wien, Biologiezentrum Althanstraße 14, A-1090 Wien, Österreich.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Carinthia II

Jahr/Year: 1985

Band/Volume: 175_95

Autor(en)/Author(s): Sieghardt Helmut

Artikel/Article: Zur Frage der Besiedelung schwermetallhältiger Abraumhalden in Bleiberg/Kärnten. 27-45