

Pflanzenanatomische und röntgenspektroskopische Studien an *Silene vulgaris* subsp. *glareosa* – Besiedler schwermetallhaltiger Kalk-Schutthalden des Südostalpenraumes

Christina MLADEK und Helmuth SIEGHARDT

Silene vulgaris subsp. *glareosa* (Schutt-Leimkraut) ist in der Lage aufgrund besonderer anatomisch-morphologischer aber auch physiologischer Merkmale (Oxalat-Typ) schwermetallhaltige Kalk-Schutthalden im Raum Bleiberg/Kreuth in Kärnten zu besiedeln. Diese Spezies hat für verschiedene Schwermetalle unterschiedliche „Strategien“ der Stressbewältigung entwickelt. Neben Mechanismen, Schwermetalle in Wurzeln und Blättern artspezifisch zu fixieren, spielen Biokristalle (Ca-Oxalat-Drusen) als interne Kompartimente für die Detoxifizierung von Schwermetallen (Aluminium, Blei, Kupfer, Zink) eine große Rolle. Aber auch Pflanzennährstoffe wie Calcium, Magnesium, Kalium und Eisen werden in diese kristallinen Strukturen eingebaut. Die Immobilisierung von Schwermetallen in verschiedenen Kompartimenten der Pflanze ist ein wirksamer Toleranzmechanismus, die interne Konzentration potentiell toxischer Elemente niedrig zu halten und damit den Stoffwechsel zu entlasten.

MLADEK CH. and SIEGHARDT H., 2002: Anatomical and X-ray microanalytical studies on *Silene vulgaris* subsp. *glareosa* – inhabiting heavy-metal containing calcareous screes in the Southeastern Alps.

Due to special anatomical-morphological structures and physiological characteristics (oxalate type), *Silene vulgaris* subsp. *glareosa* is able to survive on metalliferous lime scree slopes in the area of Bleiberg/Kreuth (Carinthia, Austria). This species has developed various strategies to cope with different heavy metal stresses. In addition to different mechanisms of fixing heavy metals in roots and leaves, biocrystals (Ca-oxalate glands) are metabolic compartmentation sites for detoxification of heavy metals (Al, Cu, Pb, Zn). Furthermore, nutrients such as Ca, Mg, K and Fe are incorporated into these biocrystals. Complexation of heavy metals is part of a tolerance strategy to keep concentrations of potentially toxic elements in the metabolism low.

Keywords: biocrystals, heavy metals, metallophytes, *Silene vulgaris*, X-ray microanalysis.

Einleitung

Pflanzen von Schwermetallstandorten haben sich im Lauf ihrer Ontogenie an den Schwermetallstress angepasst, um auf solchen Sonderstandorten überleben zu können. Viele dieser „Metallophyten“ haben spezielle Anpassungsmechanismen entwickelt, um im Überschuss vorhandene Schwermetalle im Cytosol wirksam zu kompartimentieren, um damit Einbußen der Leistung der Pflanze, von Pflanzenteilen oder Zellprozessen zu verhindern. Damit schwermetallreiche Substrate erfolgreich besiedelt werden können, haben Pflanzen auf zellulärem Niveau zwei Möglichkeiten, Schwermetallstress zu minimieren: Einschränkung der Schwermetallaufnahme („avoidance“ sensu LEVITT 1980, „excluder“ sensu BAKER 1981) oder Toleranz gegen aufgenommene Schwermetalle. Verminderte Aufnahme von Schwermetallen ist eine typische Vermeidungsstrategie, bei der die Zelle geringeren Mengen eines Schwermetalles ausgesetzt wird. Eine zusammenfassende Darstellung möglicher Strategien und Anpassungsmechanismen an Schwermetallstress bei Schwermetallpflanzen findet sich bei PUNZ und SIEGHARDT (1993), HAGEMEYER und BRECKLE (1996) und ERNST (1996).

Viele Vertreter der Caryophyllaceen haben u. a. die Fähigkeit, den internen Spiegel an gelöstem Ca^{2+} durch die Produktion von Oxalat möglichst niedrig zu halten. KINZEL (1982) bezeichnet solche Pflanzen, die dem Gehalt an gelösten Calcium-Ionen durch Produktion von Oxalat entgegenwirken, als „calciophobe“ Physiotypen (Oxalat-Typen). Sowohl in den Wurzeln als auch in den Blättern von *Silene* finden sich zahlreiche Calcium-Oxalat-Drusen, die offenbar das „Endprodukt“ dieses Stoffwechsels sind. Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen Fragen der anatomischen Anpassung und der Schwermetallverteilung in verschiedenen Organen und Geweben der Pflanze, um typische Merkmale der Anpassung an diese Standorte beschreiben und das Überleben dieser Pflanze auf derartigen Sonderstandorten besser verstehen zu können. Darüber hinaus interessiert die Frage, ob Kristalldrusen durch den Gehalt an Schwermetallen einen Beitrag zur Stressbewältigung liefern können.

Material und Methodik

Die pflanzenanatomischen Untersuchungen wurden an *Silene vulgaris* subsp. *glareosa* (JORD.) MARSDEN and TURILL. (Caryophyllaceae) durchgeführt. Diese Pflanze besiedelt die oft sehr steilen und schwermetallhaltigen Abraumhalden bergbaulicher Herkunft im Raum Bleiberg/Kreuth in Kärnten. Darüber hinaus ist diese Spezies ein typischer Vertreter der Steinschutt- und Geröllgesellschaften auf Kalk- und Dolomitschutt im Südostalpengebiet (Österreich; vgl. ADLER et al. 1994). Genaue Beschreibungen der Lokalität finden sich bei MAIER et al. (1981); SIEGHARDT (1985a und 1987).

Pflanzenanatomie: Das vorhandene Probenmaterial wurde für die anatomischen Studien in 30%igem Alkohol fixiert und konserviert. Mit Hilfe eines Schlittenmikrotoms (Typ OME, Fa. REICHERT-JUNG) wurden Querschnitte (20-30 μm Schnittdicke) von Wurzeln und Blättern angefertigt und anschließend anatomisch ausgewertet. Zur Dokumentation und späteren Auswertung der Dauerpräparate wurden mit Hilfe lichtmikroskopischer Methoden (Mikrofotografie) Bilder angefertigt und archiviert. Eine genaue Beschreibung der Methodik findet sich bei MLADEK (1998).

Rasterelektronenmikroskopie/Röntgenstrahl-Mikroanalyse: Die Pflanzenproben wurden nach gründlicher Reinigung mit Aqua dest. in Organe (Wurzel, Sprossachse und Blatt) aufgetrennt. Ein Teil der Proben wurde mit Hilfe der „Kritisch-Punkt-Trocknung“ (CP-Trocknung) fixiert, ein anderer Teil wurde gefriergetrocknet (48 Stunden bei 35 °C im Hochvakuum bei 2×10^{-4} mbar). Teilproben wurden mit Gold (für hohen Bildkontrast) als auch mit reiner Kohle für die Analytik der Schwermetalle bedampft. Für die Mikroelementanalyse wurden Stückproben von Wurzeln und Blättern von *Silene vulgaris* verwendet und im REM (JEOL 35 CF) mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzspektroskopie System LINK QX 2000 auf Schwermetallgehalte untersucht. Die entsprechenden Spektren wurden mit Hilfe eines Si (Li) Röntgenstrahl-Detektors zwischen 0 und 10 KeV (Kiloelektronen-Volt) bestimmt. Aus statistischen Gründen wurden dabei pro Organ 5 Wiederholungen an verschiedenen Geweben durchgeführt. Pro Analyse wurde im Anschluss eine Liste von 15 Elementen (Makro-/Mikronährstoffe und Schwermetalle) erstellt, die einen unmittelbaren Vergleich verschiedener Gewebetypen und Idioblasten erlaubt. Der Vorteil eines kombinierten Systems (REM + LINK) liegt einerseits in der Bildinformation ganzer Stückproben, andererseits können Daten über die chemische Zusammensetzung (Elementanalyse) der Probe und das Verteilungsmuster (dot mapping-) chemischer Elemente in einem Messgang gewonnen werden. Eine genaue Beschreibung dieses Messprinzips findet sich bei MLADEK (1998).

Ergebnisse

Wurzelmorphologie und -anatomie

Das Wurzelsystem von *Silene vulgaris* ist sehr gut an die Steilheit des Geländes angepasst. Der anatomische Bau wird den mechanischen Anforderungen, denen das Wurzelsystem im steilen Gelände ausgesetzt ist, in hohem Maße gerecht und zu deren Bewältigung die spezielle Wurzelarchitektur von *Silene* beiträgt: Eine in größere Tiefen (70–100 cm) reichende Pfahlwurzel (= Hauptwurzel) und mehrere Seiten- und Feinwurzelsysteme in verschiedenen Etagen entlang der Pfahlwurzel ermöglichen es, sich im z. T. noch rutschendem Substrat zu verankern und gleichzeitig mit den Feinwurzeln nährstoffreichere Mikrohabitate des Rohbodens zu besiedeln (SIEGHARDT 1985a und 1987). Der Wurzelquerschnitt zeigt einen breiten, sehr kompakten Xylemmantel, der auch der mechanischen Festigkeit dient. Seine Zellelemente sind stark verholzt und durch zahlreiche ein- bis mehrreihige Xylemstrahlen durchsetzt. Auffallend ist die relativ hohe Dichte an Ca-Oxalat-Drusen in verschiedenen Formen, die in parenchymatischen Idioblasten der Xylemstrahlen liegen (Abb. 1). Der Zentralzylinder wird außen von einem mehrreihigen Rindengewebe und daran anschließend von einem Korkmantel (Periderm) abgeschlossen.

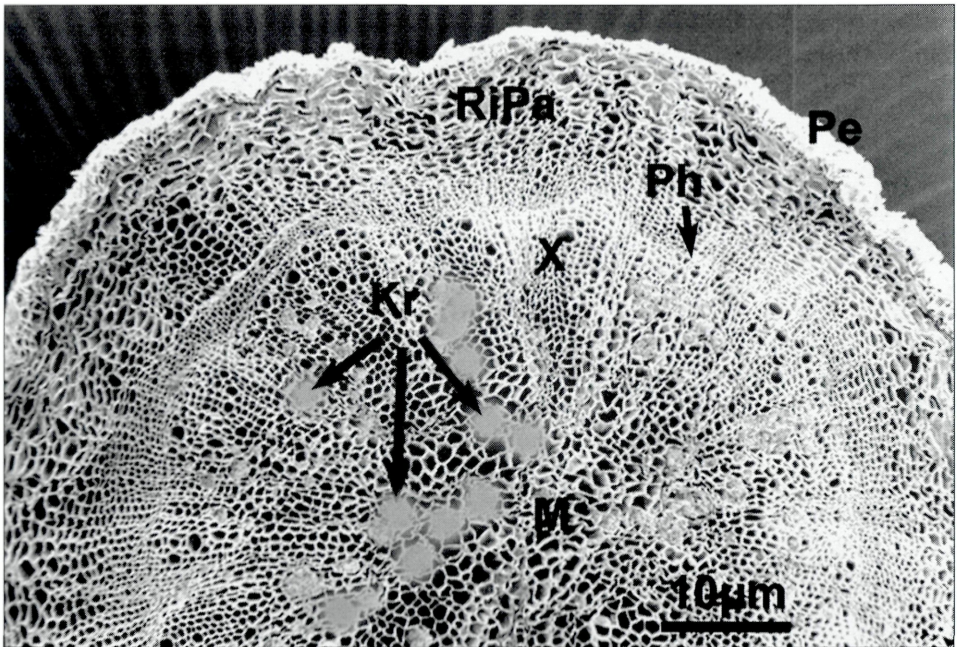


Abb. 1: Querschnitt einer Seitenwurzel von *Silene*; X – Xylem (Wassertransport-System), Ph – Phloem (Assimilattransport-System), RiPa – Rindenparenchym, Pe – Periderm (Kork), M – Markgewebe, Kr – Ca-Oxalat-Kristall, REM-Aufnahme (MLADEK 1998). – Lateral root cross section of *Silene*; X – xylem (water transporting tissue), Ph – phloem (assimilate transporting tissue), RiPa – cortex, Pe – periderm (cork tissue), M – pith, Kr – calcium-oxalate crystal, SEM-micrograph (MLADEK 1998).

Blattanatomie

Das bifazial-dorsiventrale Blatt von *Silene vulgaris* besitzt an der Ober- und Unterseite Spaltöffnungen, die teilweise in die Epidermis eingesenkt sind. Morphologisch lassen sich die Stomata aufgrund von Anordnung und Struktur der Schließ- und Nebenzellen dem Caryophyllaceen-Typ (VESQUE 1889) bzw. nach einer neueren Klassifikation dem diacytischen Typ (METCALFE and CHALK 1950) zuordnen. Die Zellwände der oberen und unteren Epidermis sind zur Verbesserung der mechanischen Festigkeit des Blattes verdickt und z. T. getüpfelt. Das Assimilationsgewebe besteht aus Palisaden – und Schwammparenchym und ist von zahlreichen kollateral gebauten Gefäßbündeln durchzogen. Auffallend sind die vielen an der Grenze Palisaden-Schwammparenchym gelegenen Kristallidioblasten mit z. T. großen Ca-Oxalat-Drusen (Abb. 2).

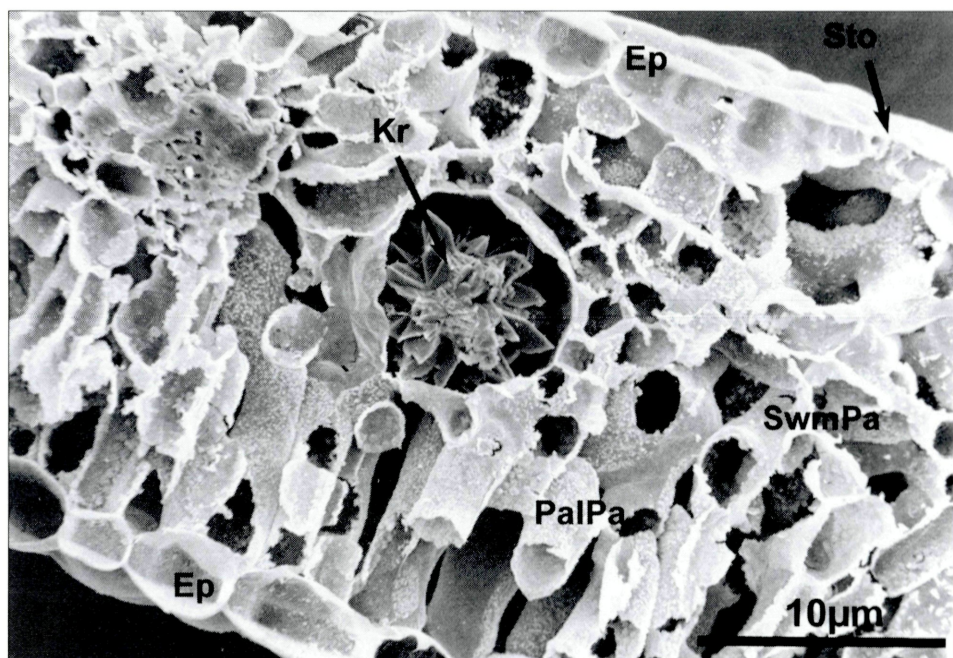


Abb. 2: Blattquerschnitt von *Silene*; PalPa – Palisadenparenchym, SwmPa – Schwammparenchym, Ep – Epidermis, Sto – Stoma (Spaltöffnung), Kr – Ca-Oxalat-Kristall, REM-Aufnahme (MLADEK, 1998). – Leaf cross section of *Silene*; PalPa – leaf mesophyll parenchyma, SwmPa – spongy parenchyma, Ep – epidermis, Sto – stoma, Kr – calcium-oxalate crystal, SEM-micrograph (MLADEK 1998).

Elementverteilung in Fein- und Seitenwurzeln

Tabelle 1 und 2 zeigt die für die entsprechenden Organe typische Elementverteilung. Vergleicht man das Rindengewebe (Cortex) der Feinwurzel mit dem der Seitenwurzel, so zeigt sich, dass die Elemente Aluminium und Silizium in der Feinwurzel, Calcium dagegen in der Seitenwurzel in höheren Konzentrationen nachzuweisen sind. Bemerkenswert ist der Nachweis dieser Elemente in Biokristallen der entsprechenden Wurzelsysteme. Eine Aluminium-Toxizität des Cytosols könnte dadurch verhindert werden.

Tab. 1 und 2: Ergebnisse der Mikroelementanalyse schwermetallhaltiger Wurzeln (Mittelwerte der Einzelmessungen in Atom-%). – Results of the X-ray microanalysis on heavy-metal containing roots (mean values of the individual measurements in atom-%).

<i>Silene vulgaris</i> subsp. <i>glareosa</i>		
Feinwurzel		
Elemente	Cortex	Biokristall
Al	19,25	17,33
Si	30,07	37,62
K	17,09	5,76
Ca	13,22	22,84
Fe	2,26	3,73
Cu	1,43	2,18
Zn	1,43	1,12
Pb	1,11	0,97
Cd	0,00	0,00
Ba	0,41	1,18
Mn	0,00	0,02
Cl	0,60	0,50
Mg	9,52	3,18
P	2,39	1,31
S	0,56	1,85

<i>Silene vulgaris</i> subsp. <i>glareosa</i>		
Seitenwurzel		
Elemente	Cortex	Biokristall
Al	0,00	0,17
Si	2,41	0,92
K	15,53	0,78
Ca	52,11	92,13
Fe	0,85	0,70
Cu	2,11	2,59
Zn	0,47	0,61
Pb	1,39	0,00
Cd	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00
Mn	0,00	0,00
Cl	1,37	0,09
Mg	12,47	1,30
P	4,48	0,71
S	6,63	0,00

Tab. 3 und 4: Ergebnisse der Mikroelementanalyse schwermetallhaltiger Blätter (Mittelwerte der Einzelmessungen in Atom-%). – Results of the X-ray microanalysis on heavy-metal containing leaves (mean values of the individual measurements in atom-%).

<i>Silene vulgaris</i> subsp. <i>glareosa</i>		
Juveniles Blatt		
Elemente	Biokristall	Mesophyll
Al	0,63	0,24
Si	16,00	9,90
K	3,47	23,78
Ca	74,95	31,89
Fe	0,42	0,25
Cu	0,86	0,69
Zn	0,21	0,25
Pb	0,00	0,00
Cd	0,00	0,08
Ba	0,00	0,14
Mn	0,00	0,00
Cl	0,24	1,99
Mg	2,79	25,86
P	0,43	3,14
S	0,00	1,80

<i>Silene vulgaris</i> subsp. <i>glareosa</i>		
Adultes Blatt		
Elemente	Biokristall	Mesophyll
Al	0,51	2,35
Si	12,04	3,75
K	13,16	46,60
Ca	62,32	10,54
Fe	0,39	0,85
Cu	1,04	2,53
Zn	0,27	0,52
Pb	0,00	0,00
Cd	0,00	0,08
Ba	0,00	0,00
Mn	0,00	0,00
Cl	2,76	9,89
Mg	6,70	18,01
P	0,55	1,85
S	0,25	3,03

Die im Substrat dominierenden Schwermetalle Blei und Zink werden ebenfalls in diese Kristallstrukturen eingebaut. Darüber hinaus lassen sich die Makronährstoffe Magnesium, Phosphor und Schwefel in den Biokristallen der Wurzelsysteme von *Silene* nachweisen.

Elementverteilung in Blättern

Calcium und Magnesium sind im Mesophyll des juvenilen Blattes von *Silene vulgaris* prozentuell in höheren Konzentrationen als im adulten Blatt vorhanden (Tab. 3 und 4). Magnesium selbst ist in der Pflanze gut beweglich (hohe Phloemtransportrate) und wird bei Unterversorgung bzw. Stresssituationen (Schwermetalle!) rasch in die jüngeren Blätter transportiert (MENGEL 1991). Kalium wiederum ist in älteren Blättern in höherer Konzentration nachzuweisen. Die essentiellen Mikronährstoffe Eisen, Kupfer und Zink

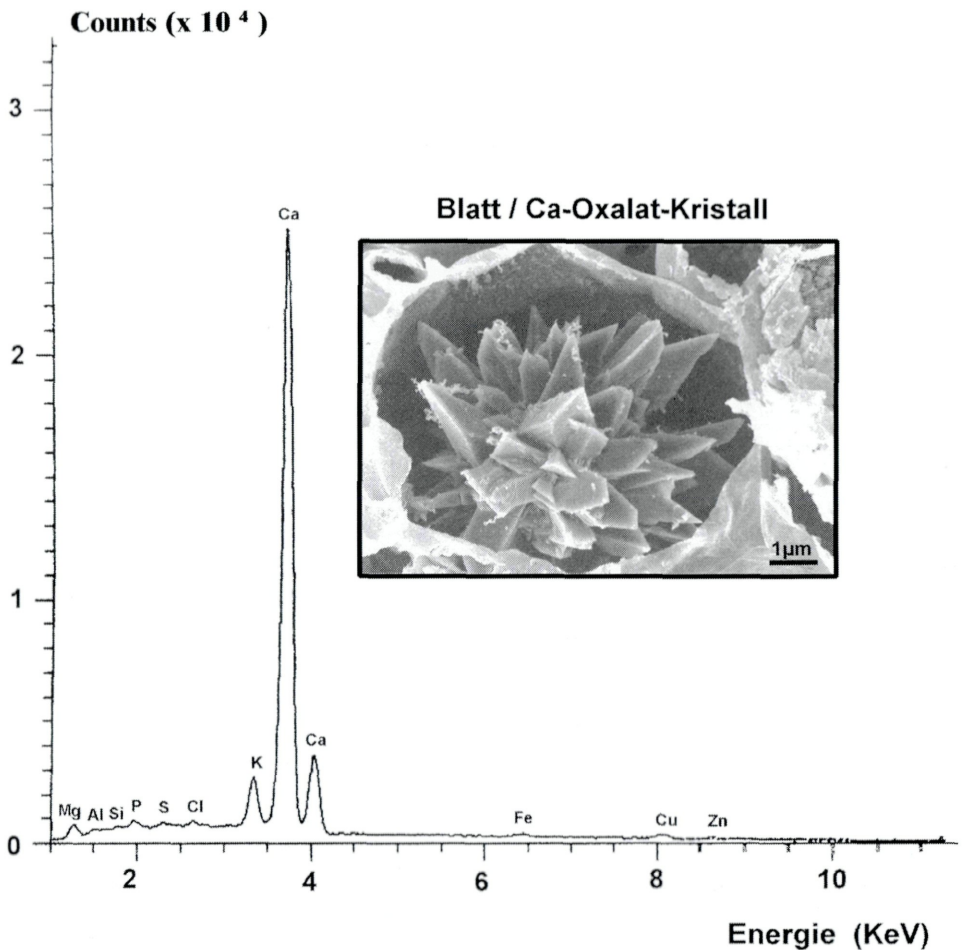


Abb. 3: EDS-Spektrum – Ca-Oxalat-Kristall im Blatt von *Silene*; x-Achse – Elementverteilung in der Probe, y-Achse – Häufigkeit und Intensität der Element-Peaks. – X-ray-spectrum – calcium-oxalate crystal in a leave of *Silene*; x-ordinate – distribution of elements in the specimen, y-ordinate – frequency and intensity of the element-peaks.

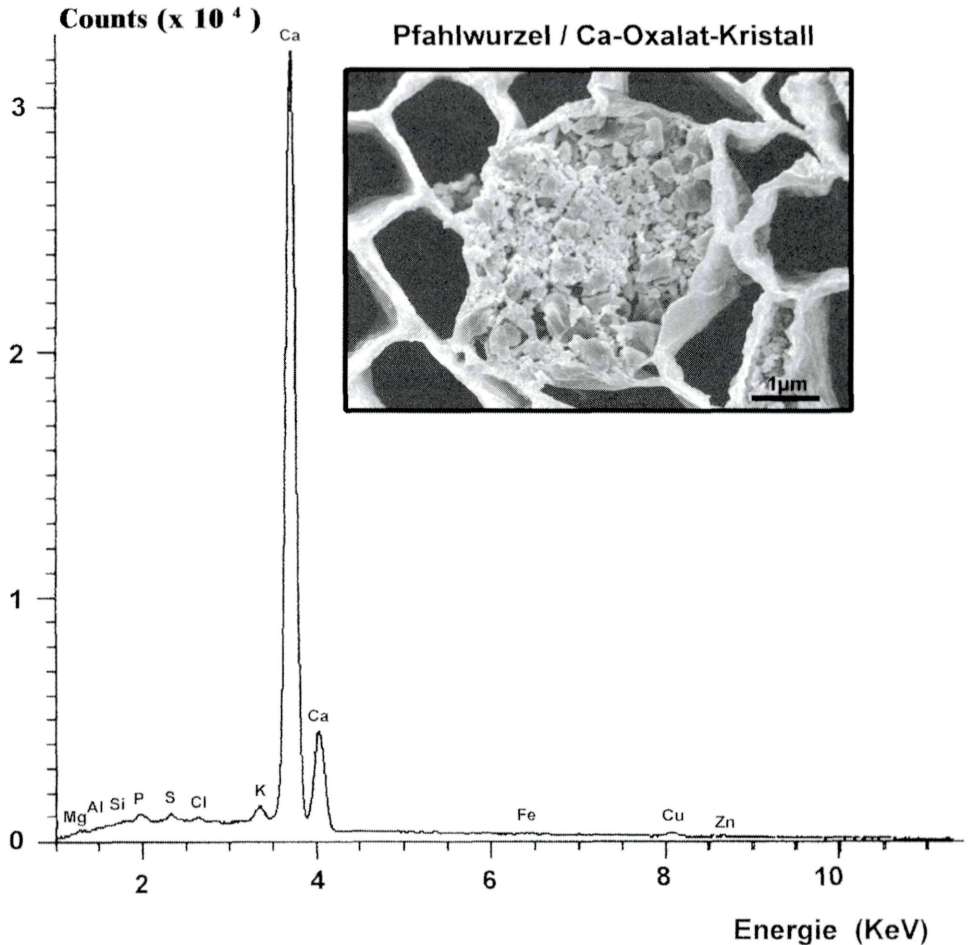


Abb. 5: EDS-Spektrum – Ca-Oxalat-Druse in der Wurzel von *Silene*; man beachte die Mikromorphologie (vgl. Abb. 3). – X-ray-spectrum – calcium-oxalate druse in a root of *Silene*; see the micromorphology (fig. 3).

weisen höhere Konzentrationen im Mesophyll des adulten Blattes auf. Silizium dagegen hat im juvenilen Blatt einen höheren prozentualen Anteil. Blei ist in den Blättern von *Silene vulgaris* nicht nachweisbar. Offenbar wird dieses Element bereits in den Wurzelsystemen fixiert (immobilisiert) und dadurch vom Transport in die oberirdischen Organe ausgeschlossen. Die Biokristalle juveniler und adulter Blätter haben einen relativ hohen Calcium-Gehalt (75 bzw. 62 Atom-%). Überschüssiges Calcium wird in unlöslicher Form als Calcium-Oxalat in den Vakuolen des Mesophylls (Kristallidioblasten) deponiert. Die Makronährstoffe Kalium (K) und Magnesium (Mg) sind im Vergleich zu den übrigen Elementen in relativ hohen Konzentrationen (13 bzw. 6,7 Atom-%) in den Biokristallen adulter Blätter vorhanden. Die Schwermetalle Kupfer (Cu) und Zink (Zn) sind in geringer Konzentration (1 bzw. 0,3 Atom-%) in den Kristallen adulter Blätter vorhanden. Blei, als weitgehend immobiles Schwermetall, konnte in den Biokristallen der Blätter von *Silene* nicht nachgewiesen werden.

EDS-Spektren-Auswertung

Die Abbildungen 3 und 5 zeigen EDS-Spektren von Kristalldrüsen im Blatt bzw. in der Wurzel von *Silene vulgaris*. Die Anzahl der Peaks lässt auf die qualitative Elementverteilung innerhalb der Probe schließen, die Höhe der Peaks liefert andererseits Informationen über die Intensität einzelner Elemente in der Probe. Bemerkenswert ist der hohe Calcium-Peak in beiden Kristalldrüsen. Die Form der Calcium-Oxalat-Drüsen ist offenbar in den Wurzeln (unregelmäßige prismatische Kristalle) und Blättern (3-seitige prismatische Kristallflächen) verschieden; Der „Einbau“ von Schwermetallen in die Kristallstruktur könnte u. a. als Toleranz-Mechanismus zur Immobilisierung von Schwermetallen gedeutet werden. Der Nachweis von Eisen, Magnesium und Phosphor in diesen Strukturen lässt vermuten, dass Kristallidioblasten auch als Depots für Nährionen dienen. Abbildung 4 zeigt ein sogenanntes Punktdichtebild (Dot-Mapping) von einem Biokristall aus dem Blatt von *Silene vulgaris*. Die Punktedichte zeigt die jewei-

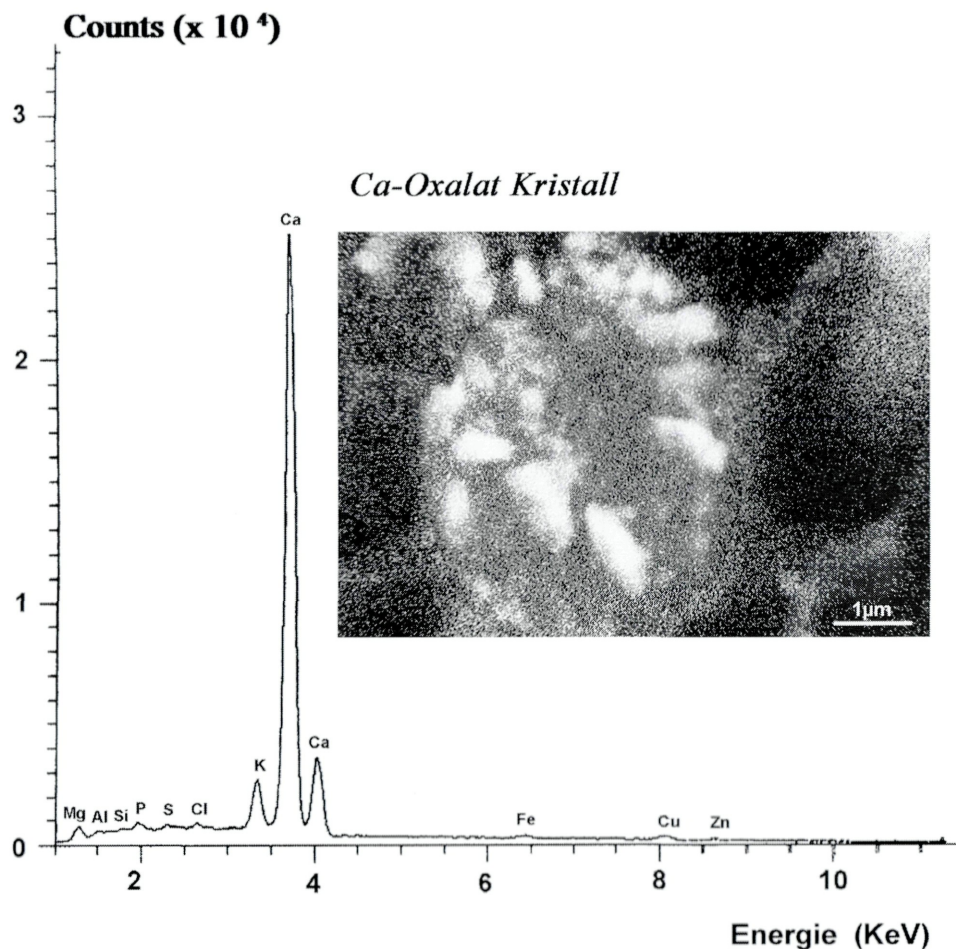


Abb. 4: Ca-Dot-Mapping (Punktdichte- Bild), Ca-Oxalat-Drüse von *Silene*; Abkürzungen
Abb. 3. – Ca-dot-mapping, calcium-oxalate crystal of *Silene*; abbreviations fig. 3.

lige Calcium-Konzentration und das Verteilungsmuster dieses Elementes innerhalb des Kristalles an. Die Konzentration vorhandener Schwermetalle (Kupfer, Zink) war aber zu gering, um sie in einem Dot-Mapping zu visualisieren. Das EDS-Spektrum zeigt die relativ hohe Calcium-Dichte in einem Biokristall.

Diskussion

Wie im Ergebnisteil erwähnt, ist das Wurzelsystem von *Silene vulgaris* sehr gut an die oft sehr steilen Halden bergbaulicher Herkunft angepasst. Eine, speziell an die Steilheit des Geländes adaptierte Wurzelarchitektur gewährleistet einerseits eine stabile Verankerung der Pflanze im lockeren (nicht verfestigten) Haldensubstrat, andererseits können die Feinwurzelsysteme nährstoffreichere Mikrohabitate in tieferen Bodenschichten erreichen. Die typische Wurzelanatomie von *Silene* wird in hohem Maße den mechanischen Anforderungen gerecht. Auch die Blätter zeigen in ihrem anatomischen Bau Anpassungen an diese Standorte. Zahlreiche Kristallidioblasten in den Blättern weisen *Silene vulgaris* als typischen Oxalat-Typ aus (vgl. KINZEL 1982). Ein wichtiger ökologischer Stressfaktor ist das auf anthropogenen Schwermetallstandorten häufig sehr niedrige Angebot an Stickstoff und Phosphat, das die Pflanze als Reaktion durch starkes Wurzelwachstum bzw. Ausbildung weiterer Feinwurzelsysteme zu kompensieren versucht (vgl. SIEGHARDT 1987). Die Entwicklung eines weit- und tiefausreichenden Wurzelsystems führt aber zwangsläufig dazu, dass die Kontaktoberfläche mit dem schwermetallreichen Substrat größer wird. Eine vermehrte (meist passive) Schwermetallaufnahme muss aber durch die Bildung neuer Blätter kompensiert werden, um die Schwermetallmengen (vor allem das Zink) in den Vakuolen des Blattmesophylls zu detoxifizieren. Je älter ein Blatt ist, desto höher ist die Konzentration derjenigen Schwermetalle, die im Boden im Übermaß pflanzenverfügbar sind (ERNST 1996). Vor allem Metallophyten mit hoher Schwermetallanreicherung in den oberirdischen Organen, wie z. B. *Thlaspi*, *Alyssum* oder *Cardaminopsis*, zeichnen sich durch Rosettenwuchsform aus. Eine Strategie, die oft sehr steilen und nicht verfestigten Schutthalden zu bewältigen. Im Laufe und am Ende der Vegetationsperiode werden mit den toten Blättern große Schwermetallmengen aus der Pflanze beseitigt. Abgestorbene Wurzeln und Blätter werden humifiziert; damit werden Schwermetalle in zunehmendem Maße an organische Stoffe gebunden, und die Schwermetallverfügbarkeit stark herabgesetzt. In der Folge können sich dann Arten mit einer geringeren Schwermetallresistenz ansiedeln. Das typische mosaikartige „Muster“ einer fortschreitenden Clusterbildung verschieden schwermetallresistenter, mehrjähriger Pflanzen auf Schwermetallhalden wird diesem Zyklus gerecht.

Vergleicht man die Mikroelementanalyse und Elementverteilung in juvenilen und adulten Blättern, so zeigen sich mit Ausnahme von Kalium höhere prozentuale Werte in den jungen Blättern von *Silene*. Zweifellos spielen P und Mg beim Aufbau von Biomembranen (z. B. Phospholipide) bzw. bei der Chlorophyll-Biosynthese in jungen Blättern eine große Rolle (vgl. MARSCHNER 1995). Kalium nimmt u. a. eine Schlüsselrolle bei der Osmoregulation von Zellen und beim Wassertransport in der Pflanze ein. Wie BÜCKING und HEYSER (2000) an Wurzeln von *Pinus sylvestris* zeigen konnten, ist die höchste K-Konzentration innerhalb des Zentralzylinders – im Cytosol der Xylemparenchymzellen nachzuweisen. Offenbar spielen diese Zellen beim „Beladen“ des Wassertransportes in die oberirdischen Organe (Blätter) die entscheidende Rolle. Die Zunahme des Cu- und Zn-Gehaltes in den adulten Blättern von *Silene* deutet auf einen Schwermetalltransport in chelatisierter Form in die oberirdischen Organe (vgl. MATHYS 1977, HARMENS et al.

1994, ERNST 1996). Blei konnte in den Blättern weder im Mesophyll, noch in den Bio-kristallen nachgewiesen werden. Dieses Schwermetall wird bereits in den Wurzelsystemen immobilisiert (fixiert) und damit einem Weitertransport in die oberirdischen Organe weitgehend entzogen (vgl. SIEGHARDT 1985a und 1987).

Die Aufnahme der gemessenen Schwermetalle Blei, Kupfer und Zink in den Apoplasten der Wurzel scheint bei *Silene* passiv und selektiv durch Träger (carrier) und Ionenkanäle zu erfolgen. (DE VOS et al. 1993, BARONI et al. 2000). In der Wurzelrinde wird das Element Blei vor allem an die Zellwände der Cortezellen gebunden (hohe Affinität des Bleis zu COOH-Gruppen der Galakturon- und Carbonsäuren in der Mittellamelle) und dadurch einem Weitertransport via Xylemelemente in die oberirdischen Organe weitgehend entzogen (SIEGHARDT 1985a, BÜCKING und HEYSER 2000). Die Elemente Kupfer und Zink werden einerseits in den Wurzelrindenzellen durch eine hohe Affinität zu Carboxyl- und Sulfhydryl-Gruppen im Cytosol komplexiert, andererseits als Metallchelate in die oberirdischen Organe transportiert und in den Zellen des Blattmesophylls vor allem in den Vakuolen deponiert (MATHYS 1977, ZHAO et al. 2000).

Wie bereits erwähnt, besitzt *Silene vulgaris* die Fähigkeit, überschüssiges Ca^{2+} in Form von Oxalat-Kristallen in verschiedenen Geweben (Wurzeln und Blätter) zu deponieren. Wie die Ergebnisse gezeigt haben (vgl. Tab. 1 u. 2), werden die Elemente Blei, Kupfer und Zink und darüber hinaus auch Pflanzennährstoffe in geringer Konzentration in die kristallinen Strukturen der Calcium-Oxalat-Drusen eingebaut. Ob und auf welche Art und Weise diese Elemente wieder in den Stoffwechsel eingeschleust werden, darüber gibt es noch sehr wenige Untersuchungen (vgl. VOLK et al. 2002). Aus der Literatur ist die Festlegung (Immobilisierung) von Schwermetallen in kristallinen Strukturen bei einem Überangebot an Schwermetallen im Substrat bekannt. So berichten VAN STEVENINCK et al. (1993) von Zinkablagerungen als Zinkphytat in kleinen Vakuolen der Wurzelrindenzellen bei Zn-toleranten Formen von *Deschampsia caespitosa*. Die Zink-Hyperakkumulatorpflanze *Thlaspi caerulescens* speichert große Mengen an Zink in globulären Kristallen der epidermalen und subepidermalen Zellen der Blätter (VAZQUEZ et al. 1994). Weitere Literaturzitate über verschiedene Depositionsorte von Schwermetallen in schwermetalltoleranten Pflanzen finden sich u. a. bei FRANCESCHI und SCHUEREN (1986), BARCELLO und POSCHENRIEDER (1999), BARONI et al. (2000).

Silene hat auf diesen anthropogenen Schwermetallstandorten offenbar mehrere auf unterschiedlichem Niveau (zelluläre Ebene bis Individualniveau) befindliche Adaptationsmechanismen entwickelt, um den internen Schwermetallgehalt möglichst niedrig zu halten, und andererseits durch anatomisch-morphologische Anpassungen diese Sonderstandorte zu bewältigen. Dadurch ist diese Art imstande, auf diesen Schwermetallhabitaten auch erfolgreich zu überleben.

Literatur

- ADLER W., OSWALD K. AND FISCHER R., 1994: Exkursionsflora von Österreich. Ulmer, Stuttgart und Wien.
- BAKER A. J. M., 1981: Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals. J. Plant Nutrition 3, 643–654.
- BARCELLO J. and POSCHENRIEDER CH., 1999: Structural and ultrastructural changes in heavy metal exposed plants. In: PRASAD M. N. V. AND HAGEMEYER J. (Eds.), Heavy metal stress in plants, p. 183–205. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

- BARONI F., BOSCAGLI A., PROTANO G. and RICCOBONO F., 1981: Antimony accumulation in *Achillea ageratum*, *Plantago lanceolata* and *Silene vulgaris* growing in an old Sb-mining area. *Environmental Pollution* 109, 347–352.
- BÜCKING H. and HEYSER W., 2000: Subcellular compartmentation of elements in non-mycorrhizal roots of *Pinus sylvestris*: an X-ray microanalytical study. II. The distribution of calcium, potassium and sodium. *New Phytol.* 145, 321–331.
- DE VOS C. H. R., BOOKUM W. M. T., VOOIJS R., SCHAT H. and DE KOK L. J., 1993: Effect of copper on fatty acid composition and peroxidation of lipids in the roots of copper tolerant and sensitive *Silene cucubalus*. *Plant Physiol. Biochem.* 31, 151–158.
- ERNST W. H. O., 1996: Schwermetalle. In: BRUNOLD CH., RÜEGSEGG A. and BRÄNDLE R. (Eds.), *Stress bei Pflanzen*, p. 191–219. P. Haupt, Bern und Wien.
- FRANCESCHI V. R. and SCHUEREN A. M., 1986: Incorporation of strontium into plant calcium oxalate crystals. *Protoplasma* 130, 199–205.
- HAGEMEYER J. and BRECKLE S. W., 1996: Growth under trace element stress. In: WASEL Y., ESHEL A. and KAFKAFI U. (Eds.), *Plant roots: the hidden half*. 415–433. Dekker, New York.
- HARMENS H., KOEVOETS P. L., VERKLEIJ J. A. and ERNST W. H. O., 1994: The role of low molecular weight organic acids in the mechanism of increased zinc tolerance in *Silene vulgaris* (MOENCH) GÄRCKE. *New Phytol.* 126, 615–621.
- KINZEL H., 1982: *Pflanzenökologie und Mineralstoffwechsel*. Ulmer, Stuttgart.
- LEVITT J., 1980: *Response of plants to environmental stress*. Academic Press, New York.
- MAIER R., PUNZ W., SIEGHARDT H., DOMSCHITZ E., NAGL A., WIENER S., KULHANEK A. und MÜHL-IBNER W., 1981: Zur Ökologie einiger Pflanzen auf den schwermetallhaltigen Halden in Bleiberg/Kärnten. *Carinthia II. Klagenfurt* 171./91., 201–222.
- MARSCHNER H., 1995: *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press, London.
- MATHYS W., 1977: The role of malate, oxalate, and mustard oil glucosides in the evolution of zinc-resistance in herbaceous plants. *Physiol. Plant.* 40, 130–136.
- MENGEL K., 1991: *Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze*. Fischer, Jena.
- MEICALFE C. R. and CHALK L., 1950: *Anatomy of the Dicotyledons*. Clarendon Press, Oxford.
- MLADEK CH., 1998: Licht- und rasterelektronenmikroskopische Studien zur Anatomie und Elementverteilung schwermetallbelasteter Pflanzen. Diplomarbeit, Formal- und Naturwiss. Fakultät, Universität Wien.
- PUNZ W. und SIEGHARDT H., 1993: The response of roots of herbaceous plants species to heavy metals. *Environ. Exp. Bot.* 33, 85–98.
- SIEGHARDT H., 1985a: Zur Frage der Besiedelung schwermetallhaltiger Abraumhalden in Bleiberg/Kärnten. Teil I: *Silene vulgaris* ssp. *glareosa*. *Carinthia II.*, 171/91, 27–45.
- SIEGHARDT H., 1987: Schwermetall- und Nährelementgehalte von Pflanzen und Bodenproben schwermetallhaltiger Halden im Raum Bleiberg in Kärnten (Österreich), I. Krautige Pflanzen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 150, 129–134.
- VAN STEVENINCK R. F. M., BABARE A., FERNANDO R. and VAN STEVENINCK M. E., 1993: The binding of zinc in root cells of crop plants by phytic acid. *Plant and Soil* 155, 525–528.
- VAZQUEZ M. D., POSCHENRIEDER CH., BARCELO J., BAKER A. J. M., HATTON P. and COPE G. H., 1994: Compartmentation of zinc in roots and leaves of the zinc hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* J and Presl C.
- VESQUE I., 1889: De l'emploi des caracteres anatomiques dans la classification des vegetaux. *Bull. Bot. France* 36, 41–77.

- VOLK G. M., LYNCH-HOLM V. J., KOSTMANN T. A., GOSS L. J. and FRANCESCHI V. R., 2002: The role of druse and raphide calcium oxalate crystals in tissue calcium regulation in *Pistia stratiotes* leaves. *Plant Biol.* 4, 34–45.
- ZHAO F. J., LOMBI E., BREEDON T. and McGRATH S. P., 2000: Zinc hyperaccumulation and cellular distribution in *Arabidopsis halleri*. *Plant, Cell and Environment* 23, 507–514.

Manuskript eingelangt: 2002 04 25

Anschrift: Mag. Christina MLADEK und Univ. Prof. Dr. Helmuth SIEGHARDT, Institut für Ökologie und Naturschutz der Universität Wien, Abteilung Ökophysiologie der Pflanzen, Althanstraße 14, A-1090 Wien.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen der Zoologisch-Botanischen Gesellschaft in Wien. Früher: Verh. des Zoologisch-Botanischen Vereins in Wien. seit 2014 "Acta ZooBot Austria"](#)

Jahr/Year: 2002

Band/Volume: [139](#)

Autor(en)/Author(s): Sieghardt Helmut, Mladek Christina

Artikel/Article: [Pflanzenanatomische und röntgenspektroskopische Studien an *Silene vulgaris* subsp. *glareosa* - Besiedler schwermetalhaltiger Kalk-Schutthalden des Südostalpenraumes 109-121](#)