Gartenbauwissenschaft, **67** (6). S. 255–264, 2002, ISSN 0016–478X. © Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart

Die Variabilität der Cu-, Zn- und Cd-Gehalte bei Spinatsorten in Abhängigkeit von der P-Ernährung

Variability of Cu, Zn and Cd content of spinach cultivars depending on P nutrition

W. Römer und H. Keller
(Institut für Agrikulturchemie der Universität Göttingen)

Zusammenfassung

In einem Screening von 11 deutschen und niederländischen Spinatsorten in einem Lößboden bei 2 Phosphatniveaus wurde die Variabilität der Sorten in Bezug auf ihre Sprossgehalte an den Schwermetallen (SM) Cu, Zn und Cd getestet. Die Abweichungen vom Mittelwert im Sprossgehalt betrugen bei ausreichender P-Ernährung für Cu +17/–28 %, für Zn +29/–28 % und für Cd +12/–22 %. Bei P-Mangel waren die Werte ähnlich aber bei Cd auf +40/–24 % erweitert. Die Korrelationskoeffizienten (r) für die Beziehung der Schwermetallgehalte zwischen P-reichen und P-armen Pflanzen betrugen für Cu 0,89**, Zn 0,91*** und Cd 0,72**. Das ist ein Hinweis auf hohe Sortenabhängigkeit der SM-Gehalte. Das Wurzellängen/Sprossmasse-Verhältnis (WSV) hatte nur eine geringe (+P-Pflanzen) bis keine Bedeutung (–P-Pflanzen) für die SM-Sprossgehalte. Detaillierte Experimente mit Sorte 'Tabu' (SM-reich) und Sorte 'Monnopa' (SM-arm) bei einem mäßigen P-Angebot im Boden zeigten, dass die höheren Cu-, Zn- und Cd-Gehalte der Sorte 'Tabu' im Vergleich zu den geringeren Gehalten der Sorte 'Monnopa' auf höhere Wurzelnettoaufnahmeraten und z.T. eine höhere Verlagerungsrate in die Sprosse zurückzuführen waren und nicht auf das WSV. Höhere Nettoaufnahmeraten von 'Tabu' korrespondierten mit höheren Cu-, Zn- und Cd-Konzentrationen in den Rhizosphärenbodenlösungen. Diese wiederum korrespondierten mit höheren Wurzelexsudationsraten von Oxalat, Citrat und Malat durch Sorte 'Tabu' verglichen mit 'Monnopa'. Auch bei ausreichender P-Versorgung schied 'Tabu' mehr organische Säuren aus als Sorte 'Monnopa', wenn auch weniger als bei P-Mangel. Das SM-Aneignungsvermögen der Sorten ist offenbar mit ihrem Säurestoffwechsel und der Säureexsudation verknüpft.

Summary

The variability of the concentration of Cu, Zn and Cd of 11 spinach cultivars from Germany and the Netherlands was screened in pot experiments (loess soil) at two phosphorus levels. At sufficient P supply, the positive and negative deviations from the means were +17/–28 % for Cu, +29/–28 % for Zn and +12/–22 % for Cd. At P deficiency, the values were similar for Cu and Zn but larger for Cd (+40/–24 %). The correlation coefficients between the heavy metal concentrations (HMC) of the well supplied P and P deficient plants were 0.89**, 0.91*** and 0.72** for Cu, Zn and Cd, respectively. This indicates a strong influence of the cultivars on HMC. The root length/shoot weight ratio (RSR) had a low (+P plants) or no meaning (–P plants) for the HMC of plants.

Further experiments with the cultivar 'Monnopa' (low in HMC) and cultivar 'Tabu' (high in HMC) grown in soil at a moderate P supply confirmed the higher Cu, Zn and Cd uptake of 'Tabu'. This was due to a higher uptake rate per unit root length and partly to a higher translocation rate of HM to the shoots but not for differences in RSR. The higher uptake rates of 'Tabu' corresponded with increased Cu, Zn and Cd concentrations in the rhizosphere soil solution. These concentrations were related to the root exudation rates of oxalate, citrate and malate which were higher for 'Tabu' compared to 'Monnopa'. Even at a sufficient P supply, 'Tabu' exuded more organic acids than 'Monnopa', although less than at P deficiency. The heavy metal acquisition of cultivars is obviously connected with their organic acid metabolism and exudation.

Einleitung

Spinat gehört zu den Kulturpflanzen, die absolut hohe Cd-, aber auch Zn-Mengen in der oberirdischen Masse anreichern (LÜBBEN 1993; PADEKEN 1998). Das ist aus der Sicht der menschlichen Ernährung bedeutsam, weil Spinatblätter direkt verzehrt werden. Aus diesem Grund und der in Zukunft eher zunehmenden Schwermetallgehalte der Böden (BERGS 1998), in älteren Hausgärten sind sie heute schon hoch (BECKER 2000) schlagen KLOKE (1994) und KLOKE und METZ (1999) vor, Kulturpflanzensorten mit geringer Schwermetallakkumulation zu selektieren, zumal die Variabilität dieser Eigenschaft zwischen den Pflanzenarten und -sorten relativ groß ist (ISERMANN et al. 1984; FISAHN et al. 1995; RÖMER et al. 1998).

Um eine effektive Selektion von Pflanzensorten durchführen zu können, ist es notwendig, die Parameter des Aneignungsvermögens für Nährstoffe und Schadstoffe (JUNGK und CLAASSEN 1989; CLAASSEN 1990) wie das Wurzellängen-Sprossmasse-Verhältnis (WSV) oder die Nettoaufnahmeraten der Wurzeln zu untersuchen. Neben diesen Eigenschaften des Wurzelsystems kann das Aufnahmeorgan Wurzel aber auch Speicherorgan sein (RIETZ und KÜCKE 1992; GUO et al.

1995), was eine einfache Selektion erschwert. Weiterhin ist der P-Ernährungsstatus der Pflanzen von Bedeutung, da in der Literatur wiederholt über Phosphor-/Schwermetall-Wechselwirkungen berichtet wird. Verschiedene Autoren finden so bei Mais, Bohnen und anderen Pflanzenarten einen P-induzierten Fe- bzw. Zn-Mangel (TRIER und BERGMANN 1974; LONERAGAN et al. 1979; MURPHY et al. 1981), wobei BERGMANN (1993) die Ursache für den P-induzierten Zn-Mangel in einer erhöhten Zn-Festlegung in der Wurzel sieht. JOHN (1976) und STREET et al. (1978) finden bei Hafer und Salat bzw. Mais eine Reduzierung der Cd-Gehalte bei Steigerung der P-Düngung. Umgekehrt bedeutet das, dass bei P-Mangel die Pflanzen höhere Cd-Gehalte aufweisen. Die Ursachen, außer dem fehlenden Verdünnungseffekt der SM über eine größere Biomasse, blieben offen. Auch sind die Ursachen für Sortenunterschiede weitgehend unklar.

Untersuchungen zur Wurzelexsudation und von Bodenlösungen im wurzelnahen Bereich haben in den vergangenen 15 Jahren deutlich gemacht, dass manche Pflanzenarten insbesondere bei P-Mangel zu beachtlichen Exsudationsleistungen an organischen Säuren befähigt sind (DINKELAKER et al. 1989; HOFFLAND et al. 1989; OWAKI und HIRATA 1990; GERKE 1995; BEIßNER 1997; NEUMANN et al. 1999; EGLE et al. 1999) und nicht nur Phosphat sondern auch Kationen wie Fe und Al (GERKE et al. 1994) aber auch Cu, Zn und Cd verstärkt in Lösung bringen (NEUMANN et al. 1998; RÖMER und KELLER 2001). Diese höhere Löslichkeit infolge von Komplexierung (MARTELL und SMITH 1989) wird mit der höheren Aufnahme von Schwermetallen z.B. Cd in Beziehung gebracht (MENCH und MARTIN 1991; MEYER et al. 1994).

Das Wissen über diese Zusammenhänge bei Spinat ist jedoch sehr begrenzt. Mit einem ersten Versuch sollte zunächst die Sortenvarianz eines Spektrums von 11 Spinatsorten aus Deutschland und den Niederlanden bezüglich der Schwermetallgehalte in Sprossen und Wurzeln sowie einiger wichtiger Pflanzenparameter (Wurzellänge, WSV) bei Anzucht auf einem mit Schwermetallen angereicherten Lößlehmboden bei gestaffeltem P-Angebot bestimmt werden. Aus diesem Spektrum wurden dann zwei sich deutlich in ihren Cu-, Zn- und Cd-Gehalten unterscheidende Spinatsorten auf einem mäßig mit P versorgten Boden näher untersucht (SM-Gehalte, Wurzellängen/Sprossmasseverhältnis (WSV), Nettoaufnahmeraten, SM-Gehalte der Rhizosphärebodenlösungen, etc.). In einem 3. Experiment wurde die Exsudation dieser zwei Sorten an organischen Säuren in Abhängigkeit vom P-Angebot geprüft, um mögliche Beziehungen zwischen Wurzelexsudation, SM-Löslichkeit in der Rhizosphäre und Aufnahme in die Pflanzen auffinden zu können.

Material und Methoden

Experiment Nr. 1: 11 Sorten

Die Anzucht der 11 Spinatsorten (Tab. 1) erfolgte im April/Mai 1998 für 48 Tage in Mitscherlich-Gefäßen unter freilandähnlichen Bedingungen in einer Vegetationshalle. Als Bodensubstrat wurde eine Mischung aus 3 kg P-armen Lößlehmboden (C-Horizont einer Lössparabraunerde: 16 % Ton, 75 % Schluff, 9 % Sand, 8 % $CaCO_3$, 0,3 % C_{org}, pH: 7,7, CAL-P: 6 mg kg^{-1}) und 3,5 kg Quarzsand verwendet.

Das Bodensubstrat war durch P-Zugabe auf 2 P-Stufen (10 bzw. 51 mg CAL-P je100 g Boden) eingestellt. Jede Sorte und P-Stufe war 3fach wiederholt. Als Grunddüngung wurden dem Substrat in allen Gefäßen 350 mg kg^{-1} N als Ammoniumnitrat, 500 mg kg^{-1} K als Kaliumsulfat und 30 mg kg^{-1} Mg als Magnesiumsulfat zugesetzt. Allen Gefäßen wurden die Schwermetalle Kupfer (als $CuSO_4$-Lösung), Zink (als $ZnSO_4$-Lösung) und Cadmium (als $Cd(NO_3)_2$-Lösung) in Höhe der halben in der AbfKlärV (ANONYM 1992) vorgeschriebenen Grenzwerte für Böden zugesetzt, angefeuchtet und abgedeckt für 7 Wochen in der Vegetationshalle aufbewahrt. Eine Analyse des Bodensubstrates bei Versuchsende (14. Woche) ergab im Königswasseraufschluss die Gehalte in ppm bei Cu 34, Zn 112, Cd 0,7 und im NH_4NO_3-Extrakt bei Cu 1,4, Zn 14 und Cd 0,12 ppm.

Zur Aussaat wurden pro Gefäß 12 Samen ausgebracht. Nach dem Aufgang verblieben 4 Pflanzen pro Gefäß. Alle Gefäße erhielten täglich entmineralisiertes Wasser (70 % der maximalen Wasserkapazität). Die Ernte erfolgte 48 Tage nach der Aussaat.

Die Sprosse wurden getrocknet (105 °C), gewogen, gemahlen und nass verascht (0,2 g TS, 4 ml 65 %ige HNO_3, 175 °C, 12 Stunden, Druckaufschlussgefäße aus Teflon). Die Lösung wurde in 10 ml aufgenommen, die Elemente Cu, Zn und Cd mit der Flammen- bzw. GF-AAS gemessen.

Die Wurzeln wurden ausgewaschen, die Gesamtfrischmasse bestimmt und von je 2 Unterproben und die Wurzellänge nach der Linien-Schnittpunkt-Methode von NEWMAN (1966) ermittelt und die Gesamtwurzellänge errechnet. In der Trockenmasse sind die SM wie in der Sprossmasse bestimmt worden. Das Wurzellängen/Sprossmasse-Verhältnis (WSV) ergibt sich aus dem Bezug der Wurzellänge (m) auf eine Einheit Sprossmasse (g). Es gibt an, wie viele m Wurzeln zur Aufnahme von Wasser- und Nährstoffen- (Schadstoffen-) je Sprosseinheit zur Verfügung stehen.

In den Restwurzeln sind wie in den Sprossmassen die Elemente Cu, Zn und Cd bestimmt worden. Aus dem Verhältnis der Wurzel-/Sprossgehalte sind Rückschlüsse auf die Verlagerung der Elemente in der Pflanze zu ziehen (vgl. PADEKEN 1998).

Experiment Nr. 2: 2 Sorten ('Monnopa', 'Tabu')

Die Anzucht der Spinatsorten 'Monnopa' und 'Tabu' erfolgte in 3-Liter-Plastikgefäßen unter den gleichen Bedingungen wie die 11 Sorten. Der Boden war ein Lößlehmboden (Ap-Horizont) aus Börry (Südniedersachsen): 20 % Ton, 75 % Schluff, 5 %Sand, 1,1 % C_{org}, pH: 6,4, CAL-P: 24 mg kg^{-1}. Laut VDLUFA-Bewertung entspricht dieser P-Gehalt der Gehaltsklasse B. Also ist der Boden P-düngebedürftig. Das war beabsichtigt, da das Verhalten der Pflanzen unter dieser Bedingung geprüft werden sollte. Wie im 1. Experiment wurden die Schwermetallgehalte des Bodens durch Zugabe von $CuSO_4$, $ZnSO_4$ bzw. $Cd(NO_3)_2$ auf die 1,5-fachen Grenzwerte der AbfKlärV (ANONYM 1992) angereichert (Königswasserextraktion Cu: 89, Zn: 297, Cd: 2,4 ppm; NH_4NO_3-Extraktion Cu: 1,6, Zn: 11, Cd: 0,25 ppm). Je

Gefäß wurden 2,5 kg Boden mit 800 g Quarzsand gemischt und mit 400 mg N (als NH_4NO_3) und 400 mg K (als K_2SO_4) gedüngt. P wurde nicht gedüngt. Gegossen wurde auf 70 % der max. Wasserkapazität. Es wuchsen 4 Pflanzen pro Gefäß. Geerntet und analysiert wurde am 26. und am 40. Tag der Anzucht, um neben der Trockenmassebildung und der Schwermetallgehalte der Sprosse und Wurzeln auch Elementnettoaufnahmeraten der Wurzeln ermitteln zu können. Gesamtnettoaufnahmeraten ergeben sich aus den Elementenzügen der Sprosse und Wurzeln (in mol) sowie den Wurzellängen (in m) zu den zwei Ernteterminen und der Zeit zwischen den 2 Ernteterminen in Sekunden (Formel vgl. KELLER 2000, S. 18/19). Werden nur die Elementenzüge der Sprosse berücksichtigt, wie es bei den Makronährelementen (N, P, K) üblich ist, da sich von ihnen meist über 90 % im Spross befinden, so wird von Sprossnettoaufnahmerate gesprochen. Es handelt sich also dann nur um die Elementmenge, die je Einheit Wurzel (cm) und Zeit (s) von der Wurzel aufgenommen und in den Spross verlagert wird. Die Berechnungen gehen auf WILLIAMS (1948) zurück (vgl. CLAASSEN 1990). Alle Wurzeln wurden ausgewaschen und ihre Länge über gemessene Unterproben nach NEWMAN (1966) bestimmt. Vorher wurde die Bodenlösung vom wurzelnahen Boden (Rhizosphärenbodenlösung) gewonnen. Hierzu wurden die Gefäße ausgeschüttet und die Wurzeln mit dem anhaftenden Boden in 250 ml Plastikmesszylinder überführt und durch leichtes Stauchen so gelagert, dass nur geringe Hohlräume sichtbar blieben. Anschließend ist solange Wasser oben aufgetropft worden, bis aus einer Öffnung am unteren Ende des Zylinders maximal 15 ml Bodenlösung aus dem Boden herausgedrängt waren. Diese Prozedur geht auf ADAMS (1974) zurück. In dieser Verdrängungsbodenlösung wurden der pH-Wert direkt und Cu, Zn und Cd mit dem AAS gemessen. Die Bestimmung der Elementgehalte in der Pflanzenmasse erfolgte wie im 1. Experiment (11 Sorten) beschrieben (Einzelheiten vgl. KELLER 2000).

Experiment Nr. 3: Gewinnung von Wurzelexsudaten

Die Anzucht der Pflanzen (Sorten 'Monnopa' und 'Tabu') erfolgte in Quarzsand mit 2,5-Liter-Plastikgefäßen in der Klimakammer (Tag/Nacht-Rhythmus: 14/10 Std., 20/15 °C, 70 % rel. Luftfeuchtigkeit, photosynthetisch aktive Strahlung am Tag: 240 mE m^{-2} s^{-1}. Die Nährstoffe – außer P – wurden mittels einer Nährlösung nach HOAGLAND und SNYDER (SCHILLING 2000) zugesetzt. Es gab 2 P-Stufen: 6 mg P kg^{-1} und 12 mg P kg^{-1}. Je Gefäß wurden 6 Pflanzen in 4 Wiederholungen für 35 Tage bei 70 % der max. Wasserkapazität angezogen.

Zur Gewinnung der Wurzelexsudate wurden die Wurzeln vorsichtig aus dem Quarzsand ausgewaschen und für 1 Stunde in Erlenmeyerkolben mit entmineralisiertem Wasser überführt. Diese erste Waschlösung wurde verworfen. Die in den folgenden 2 Stunden in erneuertes Wasser abgegebenen organischen Substanzen werden als Exsudate betrachtet. Die Aufkonzentrierung der Lösungen und die Trennung der organischen Säuren mittels HPLC erfolgte in Anlehnung an GERKE (1995). Mit der verwendeten Prozedur können 14 organische Säuren getrennt werden. Die Bestimmung der Wurzellängen erfolgte wie im Experiment 2. Zu Einzelheiten vgl. KELLER 2000.

Ergebnisse

Experiment Nr. 1 mit 11 Sorten

Durch die Staffelung der P-Düngung zeigten sich deutliche Unterschiede im Wachstum der Spinatsorten (Tab. 1). Bei ausreichender P-Versorgung (+P) erreichten die Trockenmasseerträge im Mittel aller Sorten 16 g pro Gefäß, wobei sich die einzelnen Sorten in ihren Erträgen stark voneinander unterschieden (11 bis 21 g). Die Senkung des P-Angebotes reduzierte die P-Gehalte der Sprosse im Mittel von 0,43 auf 0,32 %.

Alle Spinatsorten reagierten auf die P-Absenkung (–P) mit starken Ertragseinbußen. Im Sortenmittel erreich-

Tab. 1. Sprosstrockenmassen (TM) je Gefäß, Spross-P-Gehalte und Wurzellängen (WL) je Gefäß, sowie die Wurzellängen/Sprossmasse-Verhältnisse (WSV) von 11 Spinatsorten bei zwei P-Niveaus (+P=hoch; –P=niedrig) 48 Tage nach der Aussaat.
Shoot dry matter (TM) per pot, shoot P content, root length (WL) per pot and the root length/shoot weight ratios (WSV) of 11 cultivars of spinach at 2 P levels (+P high; –P low), 48 days after sowing.

Sorten	Herkunft	+P				–P			
		TM [g]	P [%]	WL [m]	WSV [m g^{-1}]	TM [g]	P [%]	WL [m]	WSV [m g^{-1}]
'Sombrero'	NL	11	0,50	581	53	3,1	0,37	275	89
'Tabu'	D	14	0,51	664	48	3,0	0,38	256	86
'Spartacus'	D	15	0,43	906	60	2,2	0,30	205	95
'Kerdion'	NL	15	0,44	810	53	4,3	0,30	446	102
'Avanti'	NL	15	0,43	736	48	3,9	0,35	368	96
'Monnopa'	D	16	0,41	582	36	5,1	0,28	474	93
'Subito'	NL	16	0,45	550	34	3,4	0,31	252	74
'Spicer'	D	17	0,37	874	52	2,1	0,28	224	107
'Capro'	D	18	0,36	841	48	2,9	0,31	302	105
'San Carlos'	NL	18	0,38	955	52	2,6	0,32	234	96
'San Diego'	NL	21	0,39	1211	58	2,6	0,30	223	89
Sortenmittel		16	0,43	792	49	3,2	0,32	296	94
$GD_{0,05}$ (Tukey)		2,8	0,08	331	23	1,1	0,09	174	49
relativ		100	100	100	100	20	74	37	192

ten sie mit 3,2 g (von 2,2 bis 5,1 g) nur 20 % des bei ausreichender P-Versorgung erzielten TM-Ertrages. Dabei waren deutliche Sortendifferenzen bei der Reaktion auf P-Mangel zu erkennen. Während sich bei der Sorte 'Monnopa' die Trockenmassen der P-Varianten nur um den Faktor 3,1 unterschieden, waren die Erträge der Sorten 'Spicer' und 'San Diego' bei P-Mangel ca. 8 mal niedriger als die der +P-Variante. Phosphor war somit – wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß – der begrenzende Faktor für das Pflanzenwachstum in der –P-Variante. Die Sorten 'Monnopa' und 'Spicer' hatten die geringsten Spross-P-Gehalte (0,28 %), die Sorten 'Tabu' und 'Sombrero' die höchsten.

Die Wurzellängen gingen im Sortenmittel von 792 m (+P) auf 296 m (–P) zurück. Durch den P-Mangel wurde das Sprosswachstum also stärker reduziert (um 80 % der Trockenmasse von +P-Pflanzen) als das Wurzelwachstum (um 63 %). Bei niedriger P-Versorgung bewirkten diese Unterschiede somit eine Verdopplung des Wurzellängen/Sprossmassen-Verhältnisses (WSV). D.h., bei P-Mangel stand je Sprosseinheit eine doppelt so große Wurzellänge (94 m im Vergleich zu 49 m) zur Aufnahme von Nährstoffen bzw. Schadstoffen zur Verfügung. Auch waren sortentypische Differenzen zu erkennen. Bei 'Monnopa' war bei P-Mangel das WSV 2,6 mal größer als in der +P-Variante, während es bei den Sorten 'San Diego', 'Spartacus', 'Sombrero' und 'Tabu' nur um den Faktor $<1{,}8$ größer war.

Schwermetallgehalte in den Spinatsprossen

Die Darstellung der Schwermetallgehalte der Spinatsprosse in Abb. 1 zeigt, dass die Sorten bei geringem P-Angebot (–P) deutlich höhere Cu-, Zn- und Cd-Gehalte in den Sprossen aufwiesen als bei hohem P-Angebot (+P). Diese Unterschiede waren für alle Sorten und Elemente signifikant. Zwischen den Sorten ließen sich, je nach Element und P-Versorgung, ebenfalls signifikante Unterschiede erkennen:

Kupfer

In der ausreichend mit P versorgten Variante (+P) lag der mittlere Cu-Gehalt der Sprosse bei 11 mg kg^{-1}, wobei die maximalen Sortenabweichungen +17/–28 % betrugen, d.h., Sorte 'San Diego' lag 17 % über, die Sorte 'Subito' 28 % unter dem Mittelwert der Sorten. Keine der Sorten gelangte in den Toxizitätsgrenzbereich für Pflanzen von 15–20 mg kg^{-1} (SAUERBECK 1982). Die relativ hohe Spannweite resultierte aus dem großen Unterschied zwischen den Sorten 'Spicer' (niedrigster Gehalt) und 'San Diego' (höchster Cu-Gehalt), die sich als einzige signifikant voneinander unterschieden. Die anderen Sorten gruppierten sich sehr dicht um den Mittelwert und zeigten keine großen Unterschiede.

Unter P-Mangelbedingungen (–P-Variante) zeigte sich ein ganz anderes Bild. Der mittlere Cu-Gehalt in den Sprossen von Spinat lag hier bei 20 mg kg^{-1} und damit annähernd doppelt so hoch (182 %) wie bei der +P-Variante. Die maximalen Abweichungen vom Sortenmittel lagen bei +25/–23 %, wobei sich das Sortiment jedoch uneinheitlicher zeigte als in der +P-Variante. Sorten mit niedrigen Cu-Gehalten im Spross ('Monnopa', 'Subito', 'Spicer') standen Sorten mit signifikant höheren Cu-Gehalten gegenüber ('Tabu', 'Spartacus', 'Avanti', 'San Carlos', 'San Diego').

Zink

Bei hohem P-Angebot lagen die mittleren Zn-Konzentrationen im Spross bei 304 mg kg^{-1}. Eine Überschreitung des Toxizitätsgrenzbereiches, der für Zn bei 150–200 mg kg^{-1} liegt (SAUERBECK 1982), kann somit nicht ausgeschlossen werden. Die Zn-Gehalte in den Spinatgenotypen wiesen aber im Gegensatz zu den Cu-Gehalten deutliche Unterschiede auf. Die maximalen Abweichungen vom Sortenmittel lagen bei +29 / –28 %. Niedrige Zn-Gehalte in den Sprossen wiesen die Sorten 'Monnopa', 'Subito' und 'Kerdion' auf. Signifikant höhere Gehalte konnte man in den Sorten 'Tabu', 'Spartacus', 'San Carlos' und 'San Diego' finden.

In der –P-Variante lag das Sortenmittel bei 489 mg Zn kg^{-1} TM, d.h. um 60 % höher als bei +P. Die maximale Schwankungsbreite betrug +31/–32 % vom Mittelwert. Die bei der +P-Variante gefundenen Tendenzen bezüglich der Sprossgehalte bestätigen sich auch in der –P-Variante, jedoch zeigten sich deutlichere Unterschiede zwischen den Sorten. 'Monnopa', 'Subito' und 'Kerdion', aber auch 'Spicer' wiesen die niedrigsten Zn-Gehalte auf, die deutlich unter dem Sortenmittel lagen. Die höchsten Gehalte konnte man wieder in den Sorten 'Tabu', 'Spartacus', 'San Carlos' und 'San Diego' finden, aber auch in 'Sombrero', 'Avanti' und 'Capro' lagen die Zn-Gehalte über dem Sortenmittel. Damit zeigen die Spinatsorten, besonders in der –P-Variante, deutliche sortentypische Übereinstimmungen in den Cu- und Zn-Gehalten.

Cadmium

Auch für Cd lag in der +P-Variante das Sortenmittel mit 4 mg Cd kg^{-1} TM bei einer maximalen Sortenabweichung von +12/–22 % noch unterhalb des Toxizitätsgrenzbereiches von 5–10 mg kg^{-1} (SAUERBECK 1982). Die Sorte 'Monnopa' wies mit 3,1 mg Cd kg^{-1} die niedrigsten Cd-Gehalte im Spross auf. Die höchsten Cd-Gehalte befanden sich in den Sprossen der Sorten 'San Carlos' und 'San Diego', aber auch in der Sorte 'Spicer', die sich durch geringe Cu- und Zn-Gehalte auszeichnete.

Das Sortenmittel der Cd-Gehalte in der –P-Variante lag bei 7 mg kg^{-1}, und war damit 75 % höher als in der +P-Variante. Die Abweichungen der Sorten vom Mittelwert betrugen +40/–24 %. Es ließen sich signifikante Unterschiede zwischen den Sorten erkennen, wobei sich die niedrigsten Cd-Gehalte in den Sorten 'Monnopa' und 'Sombrero' und die höchsten Gehalte in den Sorten 'Spicer' und 'San Diego' wiederfanden.

Insgesamt ergibt sich also für alle drei Elemente eine beträchtliche Variabilität in den Sprossgehalten. Bei P-Mangel war die Differenzierung der Sorten stärker als bei guter P-Versorgung. Dabei erreichten die Abweichungen vom Sortenmittel bei Cu +25/–23 %, bei Zn +31/–32 % und bei Cd +40/–24 %. 'Monnopa' war die einzige Sorte, die unabhängig von der P-Versorgung stets die niedrigsten SM-Gehalte aufwies, wenn man von der Variante +P absieht, wo die Sorte 'Spicer' bei

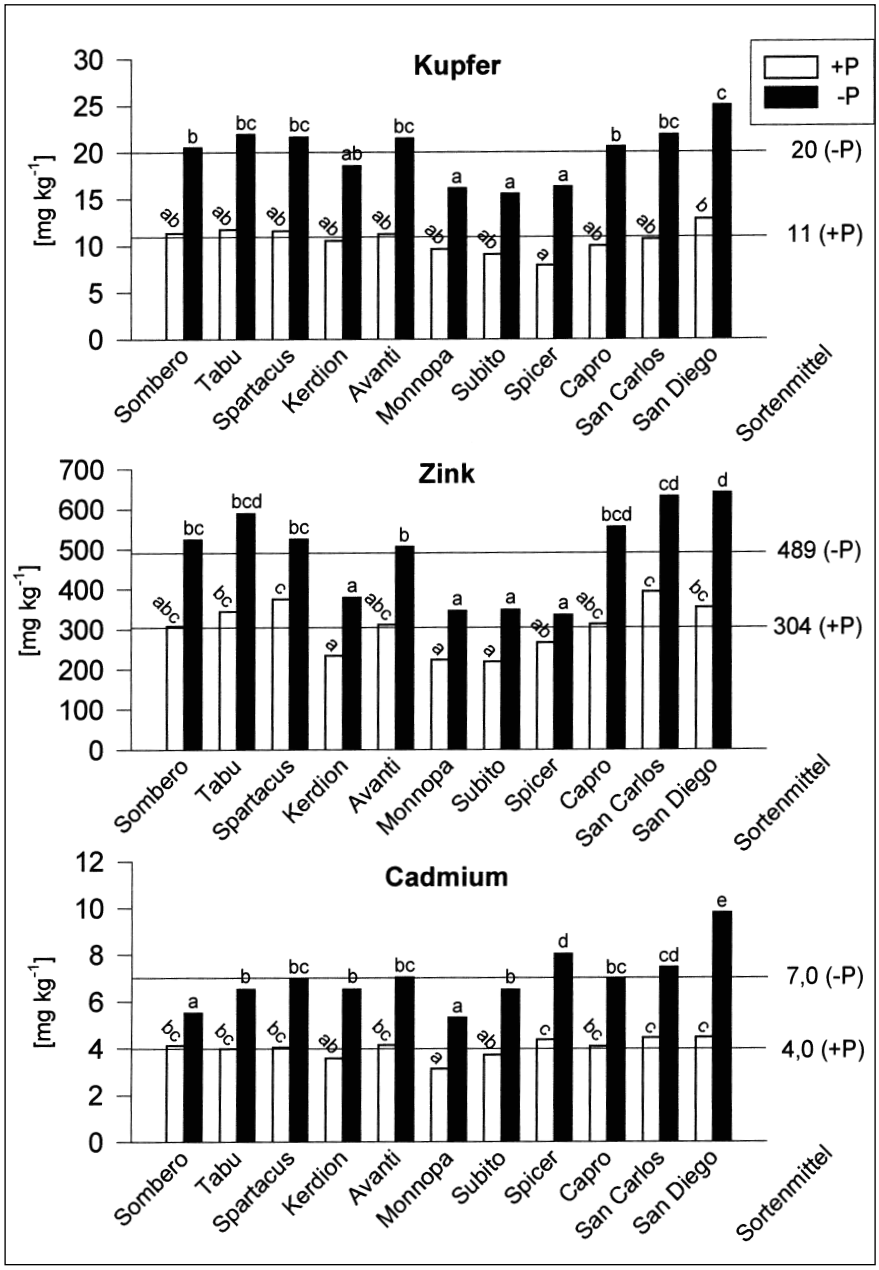


Abb. 1. Cu-, Zn- und Cd-Gehalte der Sprosstrockenmassen von 11 Spinatsorten bei variierter P-Ernährung sowie das Sortenmittel für die +P- bzw. –P-Stufe. (Werte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der P-Stufe unterscheiden sich signifikant, $Tukey_{0,05}$). *Cu, Zn and Cd contents of shoot dm and mean values of 11 cv. of spinach at 2 P levels. Different letters show significant differences after Tukey test at p ≤ 5 %.*

Cu den niedrigsten Wert besaß. Dagegen zeigte die Sorte 'San Diego' fast ebenfalls durchgängig die höchsten Elementgehalte in den Sprossen.

Die deutlich differierenden Schwermetallgehalte in den Sprossen provozieren die Frage nach möglichen Ursachen. Theoretisch hängt der Gehalt eines Elementes in der Sprossmasse vom Wurzellängen/ Sprossmasse-Verhältnis (WSV), der Nettoaufnahmerate je Einheit Wurzel und der Verlagerungsrate in den Spross ab. Die Prüfung der Abhängigkeit der Cu-, Zn- und Cd-Gehalte der Sprosse von der Wurzellänge (WL) bzw. vom WSV ergab nur schwache Beziehungen (Tab. 2). Die Korrelationskoeffizienten sind zwar in den ausreichend mit P ernährten Pflanzen sogar signifikant, aber insgesamt sind die r-Werte niedrig, d.h. ganz allgemein, aber insbesondere bei niedrigem P-Angebot hat das WSV keine große Bedeutung für die Sprossgehalte an Cu, Zn und Cd.

Elementnettoaufnahmeraten je Einheit Wurzel wurden in diesem Experiment nicht ermittelt, da nur eine Ernte erfolgte und das exponentielle Wachstum der jungen Pflanzen nicht hätte berücksichtigt werden können. Bleibt die Frage nach der Verlagerung der Elemente in die Sprosse. Tab. 3 zeigt für die +P- und –P-Pflanzen die Quotienten aus Wurzelgehalt zu Sprossgehalt für die 3 Elemente. Je höher die Quotienten sind, um so höher sind die Schwermetallgehalte der Wurzel, d.h. um so geringer ist die Verlagerung in den Spross. Diesbezüglich ergibt sich aus den Mittelwerten die Reihenfolge Cu>Cd>Zn. Das verringerte P-Angebot (–P-Pflanzen) bewirkt tendenziell kleinere Quotienten, also zumindest im Trend bei allen 3 Schwermetallen eine gesteigerte Verlagerung in den Spross. Bei Cu sind bei 5 Sorten, bei Zn 3 und bei Cd bei einer Sorte die Differenzen signifikant. Bemerkenswert gering sind aber die Differenzen für die einzelnen Elemente in den zwei P-Stufen.

Tab. 2. Korrelationskoeffizienten für die linearen Beziehungen zwischen den Schwermetallgehalten in den Sprossen (y-Werte) und den Wurzellängen (WL) bzw. den Wurzellängen/Sprossmasse-Verhältnissen (WSV) (x-Werte) bei zwei P-Niveaus.
Correlation coefficients of the linear relationships between the content of heavy metal in the shoots (y values) and the root length (WL) and the root length/shoot weight ratios (WSV) respectively (x values) at 2 P levels.

		+P	–P		+P	–P
y	x	r	r	x	r	r
Cu-Gehalt	WL	0,34	0,26	WSV	0,45**	0,17
Zn-Gehalt	WL	0,53***	0,35*	WSV	0,55**	0,16
Cd-Gehalt	WL	0,58***	0,46**	WSV	0,52**	0,14

* signifikant bei p=5 %
** signifikant bei p=1 %
*** signifikant bei p=0,1 %

Tab. 3. Verteilung der Schwermetallgehalte in 11 Spinatsorten, dargestellt als Verhältnis von Wurzel- zu Sprossgehalt (signifikante Unterschiede der Mittelwerte durch die variierte P-Ernährung sind durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet).
The ratios of heavy metal contents of roots to shoots for 11 cv.cultivars of spinach. Letters are for the comparisons of cultivars between the two P levels.

Sorte	Cu		Zn		Cd	
	+P	–P	+P	–P	+P	–P
'Sombrero'	20 a	11 b	1,1 a	0,7 b	2,5 a	2,5 a
'Tabu'	15 a	11 a	0,8 a	0,7 a	2,3 a	2,4 a
'Spartacus'	14 a	10 a	0,8 a	1,0 a	2,6 a	2,4 a
'Kerdion'	15 a	14 a	1,2 a	0,8 a	2,1 a	2,3 a
'Avanti'	16 a	11 b	1,2 a	0,8 b	2,5 a	2,4 a
'Monnopa'	23 a	12 b	1,5 a	0,9 b	2,4 a	2,2 a
'Subito'	19 a	18 a	1,3 a	1,0 a	2,5 a	2,5 a
'Spicer'	16 a	13 a	0,9 a	1,1 a	2,3 a	2,0 a
'Capro'	14 a	11 a	1,2 a	0,8 a	2,9 a	2,6 a
'San Carlos'	18 a	13 b	0,9 a	0,7 a	3,0 a	2,4 a
'San Diego'	14 a	10 b	1,0 a	0,8 a	3,1 a	2,1 b
Sortenmittel	17	12	1,1	0,8	2,6	2,3
$GD_{0,05}$ (Tukey)	10	7	0,6	0,3	1,4	0,7
Mittel rel.	100 A	71 B	100 A	73 B	100 A	88 A

Tab. 4. Sprosstrockenmasse (TM), Gehalte der Sprosse an P, Cu, Zn und Cd und Wurzellängen/Sprossmasse-Verhältnis (WSV); 40 Tage alte Pflanzen.
Shoot dry matter (TM), shoot content of P, Cu, Zn, and Cd and root length/shoot weight ratio (WSV); 40 days old plants.

Sorte	TM	WSV	Gehalte der Sprosse an			
			P	Cu	Zn	Cd
	[g]	[m g^{-1}]	%	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	m g kg^{-1}
'Monnopa'	3,46 a	77 b	0,48 a	21 a	435 a	5,5 a
'Tabu'	3,78 a	63 a	0,52 a	22 ab	580 b	6,3 b

Die Grenzdifferenzen weisen aus, dass offenbar bezüglich der Verlagerung der 3 Elemente in die Sprosse keine größeren Sortendifferenzen bestehen, die die relativ hohen Unterschiede der Sprossgehalte erklären könnten.

Experiment mit 2 Sorten ('Monnopa', 'Tabu')

Die Anzucht der Sorte 'Monnopa' mit vergleichsweise niedrigen Cu-, Zn- und Cd-Gehalten (Abb. 1) und der Sorte 'Tabu' mit vergleichsweise hohen Cu-, Zn- und Cd-Gehalten (Abb. 1) auf dem mäßig mit P versorgten Boden Börry erbrachte folgende Resultate. Laut Tab. 4 bildeten beide Sorten die nahezu gleiche Sprossmasse bei sehr ähnlichen P-Gehalten. Offensichtlich wuchsen aber die Pflanzen beider Sorten bei 24 mg P kg^{-1} deutlich besser als bei nur 10 mg P kg^{-1} wie im Experiment 1, in dem es noch größere Unterschiede gab. Bemerkenswert sind die tendenziell erhöhten P- und Cu-Gehalte, aber besonders die signifikant erhöhten Zn- und Cd-Gehalte der Sprosse von Sorte 'Tabu'. Diese stehen offenbar nicht in Zusammenhang mit den WSV der Sorten, denn 'Monnopa' besitzt bei größerem WSV die geringeren Elementgehalte der Sprosse. Tab. 5 zeigt für die Sorte 'Tabu' im Vergleich zur Sorte 'Monnopa' deutlich erhöhte Werte der Gesamtnettoaufnahmeraten bzw. der Sprossnettoaufnahmeraten (für Zn und Cd signifikant). Für Cu und Cd ergab sich bei der Sorte 'Tabu' laut Tab. 6 eine leichte Überlegenheit bei der Verlagerung der Elemente in die Sprosse. Insgesamt gesehen sind die Nettoaufnahmeraten der drei Elemente und in gewissem Umfang deren Verlagerung für die Sprossgehalte verantwortlich.

Tab. 5. Cu-, Zn- und Cd-Gesamtnetto- bzw. Sprossnettoaufnahmerate der Wurzel zwischen dem 26. und dem 40. Tag.
Cu-, Zn- and Cd- total inflow and "shoot inflow" of roots between day 26 and 40.

Sorte		Gesamtnettoaufnahmerate 10^{-19} mol m^{-1} s^{-1}			Sprossnettoaufnahmerate 10^{-19} mol m^{-1} s^{-1}		
		Cu	Zn	Cd	Cu	Zn	Cd
'Monnopa'	abs.	18,5	145	1,1	6,0	122	0,8
	rel.	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a
'Tabu'	rel.	114 ab	165 b	136 ab	125 ab	168 b	150 b

Tab. 6. Relative Anteile der Schwermetalle, die zwischen dem 26. und dem 40. Tag aufgenommen (100 %) und in den Spross verlagert wurden.
Relative parts of heavy metal amount which was taken up (100 %) and translocated into shoots between day 26 and 40.

Sorte	Cu %	Zn %	Cd %
'Monnopa'	31	86	73
'Tabu'	35	86	79

Tab. 7. Cu-, Zn- und Cd-Konzentrationen und pH-Werte in den Rhizosphärebodenlösungen und in Lösungen des Bodens ohne Pflanzen (Kontrolle) am 40. Tag der Pflanzenanzucht.
Cu-, Zn- and Cd concentration and pH-value of the rhizosphere soil solution and solutions of soil without plants (control) at the 40th day after sowing.

	Cu µg l^{-1}	Zn µg l^{-1}	Cd µg l^{-1}	pH
Kontrolle	35 a	400 a	74 a	7,3
'Monnopa'	62 b	385 a	73 a	7,7
'Tabu'	149 c	650 b	135 b	7,5

Tab. 8. Ausscheidungsraten von Oxalat, Citrat und Malat von Spinatwurzeln bei differenzierter P-Ernährung (P-Gehalte der Sprosse beider Sorten bei +P: 0,4 %, bei –P: 0,15 %).
Exudationrate of oxalate, citrate and malate of spinach roots at different phosphate status (P content of shoots of both cultivars at +P: 0,4 %, at –P: 0,15 %).

	'Monnopa'		'Tabu'	
	+P nmol m^{-1} h^{-1}	–P nmol m^{-1} h^{-1}	+P nmol cm^{-1} h^{-1}	–P nmol m^{-1} h^{-1}
Oxalat	108 a	170 b	276 c	391 d
Citrat	22 a	31 b	69 c	95 d
Malat	31 a	36 a	63 b	68 b

In dem Zusammenhang sind die Konzentrationen der drei Elemente in den Rhizosphärebodenlösungen interessant. Tab. 7 zeigt, dass am 40. Tag der Kultivierung der Pflanzen die Cu-Konzentration sowohl bei 'Monnopa' und 'Tabu' signifikant im Vergleich zur Kontrolle angestiegen sind, bei Zn und Cd aber nur in der Rhizosphäre von Sorte 'Tabu'.

Experiment zur Gewinnung der Wurzelexsudate

Tab. 8 zeigt die Exsudationsraten der 2 Spinatsorten bei variierter P-Ernährung. Oxalat ist bei beiden Sorten das dominierende Anion gefolgt von Citrat und Malat. Interessant erscheint, dass Sorte 'Tabu' bei gleichem P-Angebot stets eine höhere Exsudationsrate besitzt als 'Monnopa' und dass die P-Mangelpflanzen stets höhere Exsudationsraten zeigen als P-reich ernährte Pflanzen.

Diskussion

Schwermetallgehalte der Spinatsprosse in Abhängigkeit von der P-Ernährung

Die bei der ausreichend mit P versorgten Variante gefundenen maximalen Sortenabweichungen (Abb. 1) für Cu (+17/–28 % vom Sortenmittel) bestätigen die Ergebnisse von RÖMER et al. (1998), die bei einem ähnlichen Spinatsortiment auf einem hoch mit P versorgten, schwermetallbelasteten Lößlehmboden Abweichungen von +24/–33 % vom Sortenmittel fanden. Eine vergleichbare Sortenvarianz für Cu fanden auch FISAHN et al. (1995) in den Sprossen von 59 Spinatsorten (+22/–22 %), während LÜBBEN (1991) wesentlich größere Unterschiede bei den Cu-Gehalten in den Sprossen von Spinat gefunden hatte (+42/–50 % vom Sortenmittel).

Bei den Zinkgehalten liegen die gefundenen maximalen Abweichungen vom Sortenmittel (+29/–28 %) höher als die von HELAL et al. (1990) und RÖMER et al. (1998) gefundenen maximalen sortentypischen Spannweiten bei Spinat (+15/–26 % bzw. +17/–21 %), aber niedriger als die Spannweiten, die LÜBBEN (1991) angibt (+39/–52 %).

Für das toxikologisch bedenkliche Cd werden im Versuchsansatz Sortenabweichungen vom Mittelwert von +12/–22 % gefunden. ISERMANN et al. (1984) und RÖMER et al. (1998) fanden ähnlich hohe Sortenabweichungen (+13/–22 % bzw. +16/–18 %) für Cd, während LÜBBEN (1991) und FISAHN et al. (1995) wesentlich höhere Spannweiten bei Spinat feststellten (+49/–23 % bzw. +32/–49 %).

Die gefundene große Sortenvarianz von Cu, Zn und Cd in den Sprossen von Spinat bei ausreichender P-Düngung untermauern so die Ansicht von ISERMANN et al. (1984), CREWS und DAVIES (1985), YURAN und HARRISON (1986) und KLOKE und METZ (1999), dass die Sortenwahl bei Nahrungspflanzen zur Verminderung der Cd-Belastung der Verbraucher beitragen kann. Neben dieser die Praxis direkt interessierenden Schlussfolgerungen bleibt aus physiologischer Sicht die Frage nach den Ursachen der beträchtlichen Sortenvarianzen. Zunächst ist aber zu fragen, ob die gefundenen Sortenunterschiede tatsächlich genetisch bedingt sind und/oder z.B. durch die P-Ernährung hervorgerufen werden. Korreliert man die Sprossgehalte an Cu, Zn bzw. Cd der P-reich und der P-arm ernährten Pflanzen miteinander, so ergaben sich folgende Bestimmtheitsmaße: Cu: 0,80, Zn: 0,82 und Cd: 0,52 und damit hoch signifikante r-Werte von: 0,89**, 0,91*** und 0,72**. D.h., die Sortenunterschiede sind tatsächlich bei Cu und Zn in sehr hohem Maße, bei Cd etwas weniger genetisch bestimmt und nur ihre absolute Höhe wird durch die P-Versorgung modifiziert.

Welche Pflanzenkenngrößen sind in welchem Maße für die unterschiedlichen SM-Gehalte der Sprosse verantwortlich und was bewirkt die modifizierte P-Ernährung? Die Korrelation der Sprossgehalte mit den Wurzellängen bzw. Wurzellängen/Sprossmasse-Verhältnis (WSV) ergab nur r-Werte von maximal 0,58 bei Cd (Tab. 2). Bei den P-Mangelpflanzen waren die Beziehungen noch lockerer. D.h., das WSV hat offenbar keine große Bedeutung für die Spross-SM-Gehalte, was die Aussage von HELAL et al. (1990) bestätigt. Das Experiment mit den zwei Sorten 'Monnopa' und 'Tabu' bei mäßigem P-Angebot bestätigt diese Aussage, denn Sorte 'Tabu' mit den höheren Cu-, Zn- und Cd-Gehalten in den Sprossen hatte sogar ein geringeres WSV (63 m g^{-1}, Tab. 4) als 'Monnopa'. Da im 11-Sorten-Versuch nur eine Ernte vorgenommen wurde, konnten keine SM-Nettoaufnahmeraten für die Wurzeln ermittelt werden. Dies geschah im 2-Sorten-Versuch. Tab. 5 zeigt, dass die Sorte 'Tabu' im Vergleich zur Sorte 'Monnopa' mit ihren deutlich höheren Zn- und Cd-Gehalten auch höhere Gesamtnettoaufnahmeraten und signifikant höhere Sprossnettoaufnahmeraten an Zn und Cd hatte. Für hohe Sprossgehalte sind also die Nettoaufnahmeraten der Wurzeln, aber auch die Verlagerung in den Spross bedeutsam. Letzteres gilt offenbar besonders für Cd (Tab. 6).

Die von der Sorte 'Tabu' realisierte höhere Nettoaufnahmerate löst die Frage nach deren Ursache aus. Tab. 7 liefert eine Antwort dahingehend, dass in den Bodenlösungen dicht an den Wurzeln (Rhizosphäre) bei der Sorte 'Tabu' signifikant höhere Cu-, Zn- und Cd-Konzentrationen im Vergleich zur Sorte 'Monnopa' gefunden wurden. Dieser Befund dürfte durch die Pflanzenwurzeln selbst verursacht worden sein. Die Untersuchung der Wurzelexsudation der zwei Sorten 'Monnopa' und 'Tabu' (Tab. 8) bei gestaffeltem P-Niveau zeigten eindeutig die intensivere Exsudation der Sorte 'Tabu' für Oxalat-, Citrat- und Malationen. Die hohe Exsudationsrate der Wurzeln der Sorte 'Tabu' ist letztlich für die hohe Cu-, Zn- und Cd-Konzentration in der Rhizosphärebodenlösung dieser Sorte verantwortlich (Tab. 7), denn die hohe Affinität insbesondere von Citrat für die SM, die zur Bildung gelöster Komplexe führt ist bekannt (siehe Stabilitätskonstanten bei MARTELL und SMITH 1989) und wurde im Experiment bestätigt (RÖMER und KELLER 2001). D.h., die Sorte 'Tabu' erzeugt die Voraussetzung für höhere Nettoaufnahmeraten, nämlich erhöhte Elementkonzentrationen in der Bodenlösung, selbst.

Aus Tab. 8 geht aber weiter hervor, dass beide Spinatsorten bei P-Mangel deutlich größere Mengen an organischen Säuren exsudieren. Zu den möglichen physiologischen Ursachen siehe NEUMANN et al. (1999). Die Konsequenzen dieser erhöhten Exsudation für die SM-Löslichkeit im Boden dürften sein, dass bei P-Mangel die SM-Konzentrationen in den Bodenlösungen aller Sorten – entsprechend ihrer Exsudationsraten – ansteigen und damit die Voraussetzung für erhöhte Nettoaufnahmeraten schaffen. Daraus leitet sich die praktische Konsequenz ab, die Pflanzen stets ausreichend mit Phosphat zu versorgen, weil damit zwei Prozesse beeinflusst werden: 1. werden geringere SM-Nettoaufnahmeraten erreicht und 2. werden infolge einer höheren Stoffbildung (Tab. 1) die aufgenommenen und in die Sprosse verlagerten SM auf eine größere Biomasse verteilt, so dass geringere Sprossgehalte entstehen. Für die Züchter könnte sich die Exsudationsrate für organische Säuren, vielleicht auch deren Gehalte in den Wurzeln als Selektionskriterium für das SM-Aneignungsvermögen ergeben. Dazu liegen aber bisher noch zu wenig Resultate vor.

Schlussfolgerungen

Bei den 11 geprüften Spinatgenotypen ist eine hohe genetisch bedingte Variabilität in den Cu-, Zn- und Cd-Gehalten der Sprosse gegeben. Für hohe Schwermetallgehalte der Sprosse sind die Nettoaufnahmeraten der Wurzel, bei Cd auch die Verlagerungsrate in den Spross, aber kaum das Wurzellängen/Sprossmasse-Verhältnis bedeutsam. Mangelnde P-Ernährung erhöht über gesteigerte Wurzelexsudation organischer Säuren die SM-Löslichkeit in der Rhizosphäre, die eine Voraussetzung für hohe SM-Nettoaufnahmeraten ist. Eine ausreichende P-Ernährung führt über verringerte SM-Nettoaufnahmeraten und eine höhere Biomassebildung zu niedrigeren SM-Gehalten der Sprosse. Die Exsudationsrate bzw. die Gehalte der Wurzel an organischen Säuren könnte ein Selektionskriterium für SM-arme Genotypen werden.

Wir danken der DFG für die Förderung im Rahmen des Graduierten Kollegs „Landwirtschaft und Umwelt".

Weiter gilt unser Dank folgenden Firmen, die uns Saatgut zur Verfügung stellten: Carl Sperling & Co., Enza Zaden B.V., Rijk Zwaan, Bejo Samen-Vertriebs GmbH, und S & G Seeds B.V.

Literatur

ADAMS, F. 1974: Soil solution. In: CARSON, E. W. (Ed.): The plant root and its environment. University Press of Virginia, Charlottesville, 441–481.

ANONYM 1992: Klärschlammverordnung (AbfKlärV) vom 15. April 1992. Bundesgesetzblatt Z 5702 A, Teil **1**, 1450–1490.

BECKER, K. und B. MEYER 2000: Der isolierte Staat, als geoökologisches Grundmodell für die Analyse des Naturpotentials der heutigen Kulturlandschaft. Berichte über Landwirtschaft. Sonderheft zur Thünen-Tagung 2000, im Druck.

BEIßNER, L. 1997: Mobilisierung von Phosphor aus organischen und anorganischen P-Verbindungen durch Zuckerrübenwurzeln, Cuvillier Verlag, Göttingen.

BERGMANN, W. 1993: Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. 3. Auflage, Gustav Fischer Verlag Jena.

BERGS, C. G. 1998: Rechtliche Regelungen für die Verwertung von Klärschlämmen und sonstigen Sekundärrohstoffdüngern. Vortrag zur 9. Klärschlammberatertagung der LK Hannover am 1.12.1998 in Nienburg.

CLAASSEN, N. 1990: Nährstoffaufnahme höherer Pflanzen aus dem Boden – Ergebnis von Verfügbarkeit und Aneignungsvermögen. Severin Verlag Göttingen.

CREWS, H. M. und B. E. DAVIES 1985: Heavy metal uptake from contaminated soils by six varieties of lettuce (*Lactuca sativa* L.). J. Agric. Sci. **105**, 591–595.

DINKELAKER, B., V. RÖMHELD und H. MARSCHNER 1989: Citric acid excretion and precipitation of calcium citrate in the rhizosphere of white lupine (*Lupinus albus* L.). Plant Cell Environment **12**, 285–292.

EGLE, K., W. RÖMER, J. GERKE, J und H. KELLER 1999: The influence of phosphor nutrition on the organic acids exudation of the roots of three lupin species. Proceedings of the 9th Intern. Lupin Conference, 20. to 24. June 1999, Klink/ Müritz, Germany, 249–251.

FISAHN, J., M. SIMONS und W. HÖFNER 1995: Schwermetallaufnahme von Spinat (*Spinacea oleracea* L.) in Abhängigkeit vom Genotyp. VDLUFA-Schriftenreihe, Kongreßband **40**, 537–540.

GEHRKE, J., W. RÖMER und A. JUNGK 1994: The excretion of citric and malic acid by proteoid roots of *Lupinus albus* L.; effects on soil solution concentrations of phosphate, iron and aluminum in the proteoid rhizosphere in samples on an oxisol and a luvisol. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. **157**, 289–294.

GERKE, J. 1995: Chemische Prozesse der Nährstoffmobilisierung in der Rhizosphäre und ihre Bedeutung für den Übergang vom Boden in die Pflanze. Habilitationsschrift, Universität Göttingen.

GUO, Y. L., R. SCHULZ und H. MARSCHNER 1995: Genotypic differences in uptake and distribution of cadmium and nickel in plants. Angew. Botanik **69**, 42–48.

HELAL, H. M., H. ARISHA und, E. RIETZ 1990: The uptake of trace elements by spinach and bean varieties of different root parameters. Plant and Soil **123**, 229–232.

HOFFLAND, E., G. R. FINDENEGG und J. A. NELEMANS 1989: Solubilization of rock phosphate by rape. II. Local root exudation of organic acids as a response to P-starvation. Plant and Soil **113**, 161–165.

ISERMANN, K., P. KARCH und J. A. SCHMIDT 1984: Cadmiumgehalt des Erntegutes verschiedener Sorten mehrerer Kulturpflanzen beim Anbau auf stark mit Cadmium belastetem, neutralen Lehmboden. Landw. Forschung **40**, 283–294.

JOHN, M. K. 1976: Interrelationships between plant cadmium and uptake of some other elements from culture solutions by oats and lettuce. Environ. Pollut. **11**, 85–95.

JUNGK, A. und N. CLAASSEN 1989: Availability in soil and acquisition by plants as the basis for phosphorus and potassium supply to plants. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. **152**, 151–157.

KELLER, H. 2000: Einfluss wurzelbürtiger organischer Säuren auf das Cu-, Zn- und Cd-Aneignungsvermögen von Spinatgenotypen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, Fachbereich Chemie (http://kluedo.ub.uni-kl.de/volltexte/2000/1146/index.html).

KLOKE, A. 1994: Schwermetalle und Pflanzensorten, ein möglicher Weg zur Minderung der Belastung unserer täglichen Nahrung mit Schwermetallen. VDLUFA-Mitteilungen, Heft **1–2**, 42–46.

KLOKE, A. und R. METZ 1999: Aufgaben einer Arbeitsgruppe zur Erfassung des Schwermetalltransfers Boden-Pflanze durch Sortenwahl. Pflanzenbelastung auf kontaminierten Standorten. Berichte/Umweltbundesamt 99 (1), 275–278.

LONERAGAN, J. F., T. S. GROVE, A. D. ROBSON und K. SNOWBALL 1979: Phosphorus toxicity as a factor in zinc-phosphorus interactions in plants. Soil Sci. Am. J. **43**, 966–972.

LÜBBEN, S. 1991: Sortenbedingte Unterschiede bei der Aufnahme von Schwermetallen durch verschiedene Gemüsepflanzen. VDLUFA-Schriftenreihe, Kongreßband **33**, 605–612.

LÜBBEN, S. 1993: Vergleichende Untersuchung zur Schwermetallaufnahme verschiedener Kulturpflanzen aus klärschlammgedüngten Böden und deren Prognose durch Bodenextraktion. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft **140**.

MARTELL, A. und R. SMITH 1998: Critical stability constants. Plenum Press, New York.

MENCH, M. und E. MARTIN 1991: Mobilization of cadmium and other metals from two soils by root exudates of *Zea mays* L., *Nicotiana tabacum* L. and *Nicotiana rustica* L.. Plant and Soil **132**, 187–196.

MEYER, U., J. GERKE und W. RÖMER 1994: Einfluß von Citrat auf die Mobilisierung und Aufnahme von Zn und Cu bei Weidelgras und Weißer Lupine. In: MERBACH, W. (Ed.): 5. Borkheider Seminar zur Ökophysiologie des Wurzelraumes, 137–143.

MURPHY, L. S., R. ELLIS Jr. und D. C. ADRIANO 1981: Phosphorus-micronutrient interaction effects on crop production. J. Plant Nutr. **3**, 593–613.

NEUMANN, G., G. GEORGE und V. RÖMHELD 1998: Zur Regulation der P-Mangel-induzierten Abgabe organischer Säuren aus Proteoidwurzeln der Weißlupine. In: MERBACH, W. (Ed.): 8. Borkheider Seminar zur

Ökophysiologie des Wurzelraumes, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 221–229.

NEUMANN, G., A. MASSONNEAU, E. MARTINOIA und V. RÖMHELD 1999: Physiological adaptations to phosphorus deficiency during proteoid root development in white lupine. Planta **208**, 373–382.

NEWMAN, E. 1966: A method of estimating the total length of root in a sample. J. Appl. Ecol. **3**, 133–145.

OHWAKI, Y. und H. HIRATA 1990: Phosphorus absorption by chickpea as affected by VA mycorrhiza and carboxylic acids in root exudates. In: VAN BEUSICHEN, M. L. (Hrsg.): Plant nutrition physiology and applications; Kluwer Academic Publishers, 171–177.

PADEKEN, K. 1998: Schwermetallaufnahme verschiedener Pflanzenarten unter besonderer Berücksichtigung der N- und P-Ernährung. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft **182**, Dissertation.

RIETZ, E. und M. KÜCKE 1992: Schwermetallgehalte in Wurzeln und Sproß unterschiedlicher Kulturpflanzen in Abhängigkeit vom pH-Wert und vom Schwermetallgehalt des Bodens. VDLUFA-Schriftenreihe, Kongreßband **35**, 693–696.

RÖMER, W., T. EMBAYE und H. KELLER 1998: Abhängigkeit der Cu-, Zn- und Cd-Konzentration in 10 Spinatgenotypen von der Wurzelmorphologie und der Aufnahmerate. VDLUFA-Schriftenreihe, Kongressband **49**, 159–162.

RÖMER, W. und H. KELLER 2001: Exudation of organic acids by spinach and the mobilization of Cu, Zn and Cd in soil. In: HORST, W. J. (Ed.): Plant nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems. Kluwer Academic Publishers, 556–557.

SAUERBECK, D. 1982: Welche Schwermetallgehalte in Pflanzen dürfen nicht überschritten werden, um Wachstumsbeeinträchtigungen zu vermeiden? Landw. Forschung, Kongressband 1982, Sonderheft **39**, 108–129.

SCHILLING, G. 2000: Pflanzenernährung und Düngung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

STREET, J. J., B. R. SABEY und W. L. LINDSAY 1978: Influence of pH, phosphorus, cadmium sewage sludge, and incubation time on the solubility and plant uptake of cadmium. J. Environ. Qual. **7**, 286–290.

TRIER, K. und W. BERGMANN 1974: Ergebnisse zur wechselseitigen Beeinflussung der Zink- und Phosphorernährung von Mais (*Zea mays* L.). Arch. Acker- u. Bodenkd. **18**, 65–75.

YURAN, G. T. und H. C. HARRISON 1986: Effects of genotype and sewage sludge on cadmium concentration in lettuce leaf tissue. J. Am. Soc. Hortiult. Sci. **111**, 491–494.

Eingereicht: 19.12.2002 / 31.01.2003

Anschrift der Verfasser: Prof. Dr. W. Römer und Dr. H. Keller, Institut für Agrikulturchemie, Carl-Sprengel-Weg 1, D-37075 Göttingen, e-mail: uaac@gwdg.de