

# 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 betragen 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 betragen 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, Kulturpflanzenarten 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 Pflanzenarten 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, bleiben 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; BEISNER 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 Lößlehm Boden 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 Rhizosphärenbodenlösungen, 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 Lößlehm Boden (C-Horizont einer Löss-

parabraunerde: 16% Ton, 75% Schluff, 9% Sand, 8%  $\text{CaCO}_3$ , 0,3%  $\text{C}_{\text{org}}$ , pH: 7,7, CAL-P:  $6 \text{ mg kg}^{-1}$ ) und 3,5 kg Quarzsand verwendet.

Das Bodensubstrat war durch P-Zugabe auf 2 P-Stufen (10 bzw. 51 mg CAL-P je 100 g Boden) eingestellt. Jede Sorte und P-Stufe war 3fach wiederholt. Als Grunddüngung wurden dem Substrat in allen Gefäßen  $350 \text{ mg kg}^{-1}$  N als Ammoniumnitrat,  $500 \text{ mg kg}^{-1}$  K als Kaliumsulfat und  $30 \text{ mg kg}^{-1}$  Mg als Magnesiumsulfat zugesetzt. Allen Gefäßen wurden die Schwermetalle Kupfer (als  $\text{CuSO}_4$ -Lösung), Zink (als  $\text{ZnSO}_4$ -Lösung) und Cadmium (als  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ -Lösung) in Höhe der halben in der AbflärV (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  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -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 Sprossen wurden getrocknet ( $105^\circ\text{C}$ ), gewogen, gemahlen und nass verascht (0,2 g TS, 4 ml 65%ige  $\text{HNO}_3$ ,  $175^\circ\text{C}$ , 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 Lößlehm Boden (Ap-Horizont) aus Börry (Südniedersachsen): 20% Ton, 75% Schluff, 5% Sand, 1,1%  $\text{C}_{\text{org}}$ , pH: 6,4, CAL-P:  $24 \text{ mg kg}^{-1}$ . 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  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4$  bzw.  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$  auf die 1,5-fachen Grenzwerte der AbflärV (ANONYM 1992) angereichert (Königswasserextraktion Cu: 89, Zn: 297, Cd: 2,4 ppm;  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -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  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) und 400 mg K (als  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) 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 Elemententzüge 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:  $240 \text{ mE m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Die Nährstoffe – außer P – wurden mittels einer Nährlösung nach HOAGLAND und SNYDER (SCHILLING 2000) zugesetzt. Es gab 2 P-Stufen: 6 mg  $\text{P kg}^{-1}$  und 12 mg  $\text{P kg}^{-1}$ . 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 <sup>-1</sup> ]	TM [g]	P [%]	WL [m]	WSV [m g <sup>-1</sup> ]
'Sombbrero'	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 <sub>0,05</sub> (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 'Sombbrero' 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', 'Sombbrero' 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<sup>-1</sup>, wobei die maximalen Sortenabweichungen +17/–28% betragen, 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<sup>-1</sup> (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 gruppieren 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<sup>-1</sup> 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 ('Monno-

pa', '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<sup>-1</sup>. Eine Überschreitung des Toxizitätsgrenzbereiches, der für Zn bei 150–200 mg kg<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup> 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 bestätigten 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 'Sombbrero', '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<sup>-1</sup> TM bei einer maximalen Sortenabweichung von +12/–22% noch unterhalb des Toxizitätsgrenzbereiches von 5–10 mg kg<sup>-1</sup> (SAUERBECK 1982). Die Sorte 'Monnopa' wies mit 3,1 mg Cd kg<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup>, und war damit 75% höher als in der +P-Variante. Die Abweichungen der Sorten vom Mittelwert betragen +40/–24%. Es ließen sich signifikante Unterschiede zwischen den Sorten erkennen, wobei sich die niedrigsten Cd-Gehalte in den Sorten 'Monnopa' und 'Sombbrero' 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



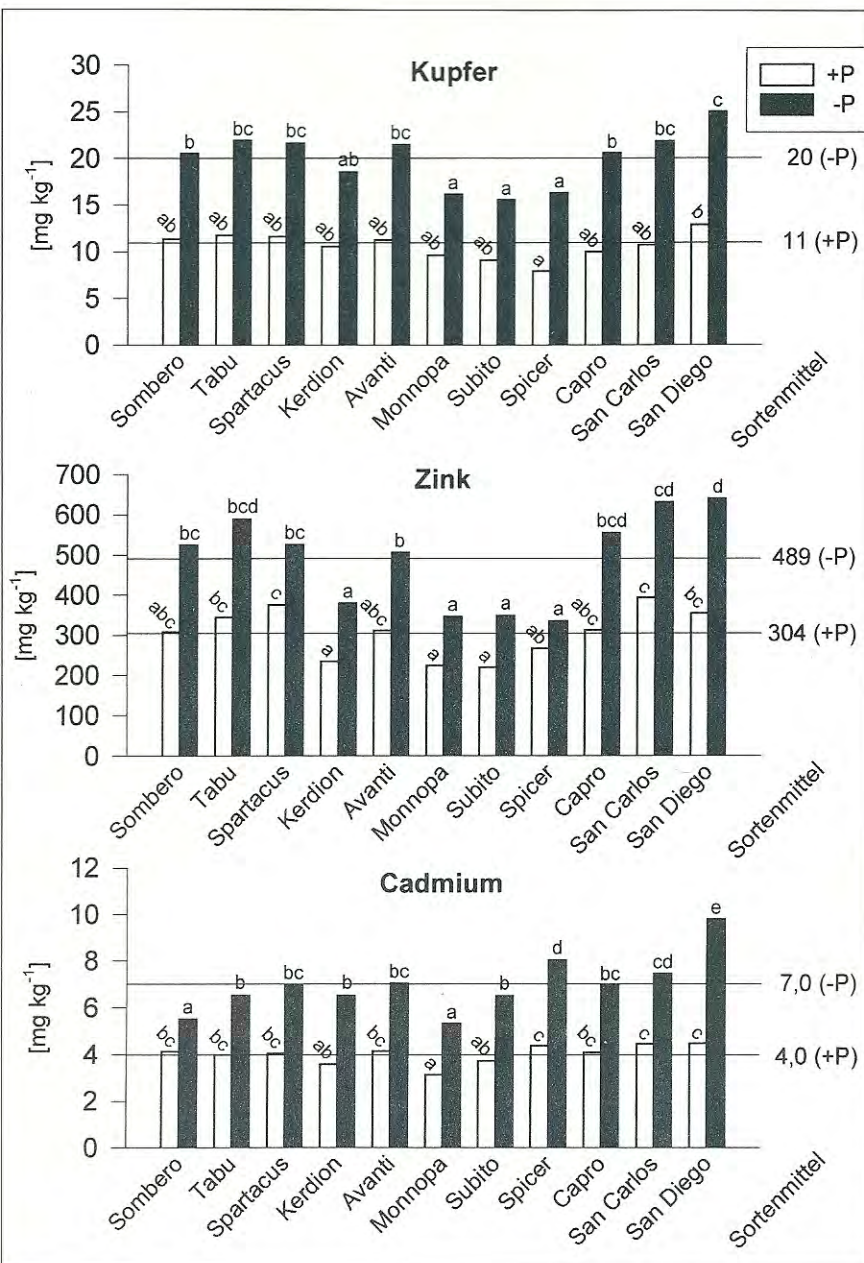


Abb. 1. Cu-, Zn- und Cd-Gehalte der Sprossstrockenmassen von 11 Spinatsorten bei variiertem P-Ernährung sowie das Sortenmittel für die +P- bzw. -P-Stufe. (Werte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der P-Stufe unterscheiden sich signifikant, Tukey<sub>0,05</sub>). Cu, Zn and Cd contents of shoot dm and mean values of 11 cv. of spinach at 2 P levels. Different letters show significant differences after Tukey test at  $p \leq 5\%$ .

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 Nettoaufnahme 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.*

y	x	+P	-P	x	+P	-P
		r	r		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
'Sombbrero'	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 <sub>0,05</sub> (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]	[mg <sup>-1</sup> ]	%	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>
'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<sup>-1</sup> deutlich besser als bei nur 10 mg P kg<sup>-1</sup> 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 $10^{-19} \text{ mol m}^{-1} \text{ s}^{-1}$			Sprossnettoaufnahmerate $10^{-19} \text{ mol m}^{-1} \text{ s}^{-1}$		
		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 $\mu\text{g l}^{-1}$	Zn $\mu\text{g l}^{-1}$	Cd $\mu\text{g l}^{-1}$	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. Ausscheidungsrate 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 $\text{nmol m}^{-1} \text{ h}^{-1}$	-P $\text{nmol m}^{-1} \text{ h}^{-1}$	+P $\text{nmol cm}^{-1} \text{ h}^{-1}$	-P $\text{nmol m}^{-1} \text{ h}^{-1}$
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 variiertem 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 Lößlehm Boden 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).