

## KALIUMERNÄHRUNG DER PFLANZEN UND KALIUMDYNAMIK AUF KALIUM- FIXIERENDEM BODEN

von A. AMBERGER, R. GUTSER und K. TEICHER

Aus dem Institut f. Pflanzenernährung der Techn. Universität München und der Bayer.  
Hauptversuchsanstalt für Landwirtschaft Weihenstephan, 805 Freising-Weihenstephan

### SUMMARY

#### *Potassium nutrition of plants and potassium dynamics on a potassium-fixing soil*

In pot experiments conducted over a period of three years the effect was examined of increasing additions of potassium (KCl, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) on yields, mineral uptake by plants [oats (*Avena sativa* L.), clover (*Trifolium resupinatum* L.), rape (*Brassica napus* L. *oleifera*), beans (*Vicia faba* L.)] and potassium dynamics of an extremely potassium-fixing gley soil (93 mg K/100 g soil).

1. This clay soil required very high amounts of potassium (10 to 15 g K<sub>2</sub>O/10 kg soil) for optimum yields. The recovery of fertilizer K by the crops was only 23 to 47 per cent.

2. Most of the added K was fixed already within a few weeks after application. The amount of exchangeable potassium did not rise markedly until the highest rate of 15 g K<sub>2</sub>O had been applied three times. It then rose significantly with a simultaneous decrease in K (wet)-fixation to 13 mg K/100 g soil.

3. Exchangeable K and K fixation were poorly correlated with yields. It is discussed to what extent the laboratory techniques indicate the actual amounts of plant-available potassium and the entire K fixation capacity, respectively.

### EINLEITUNG

Bestimmte Böden sind befähigt, Kalium sehr stark festzulegen. Dieser als Kaliumfixierung bezeichnete Prozeß ist in der internationalen Fachliteratur seit langem bekannt<sup>16 6 3 23 8 20 21 18</sup>; in Deutschland beschäftigt sich besonders Niederbudde in den letzten Jahren mit Fragen der Kaliumfixierung<sup>12 13 14 15</sup>.

In jüngster Zeit sind insbesondere im südbayerischen Raum immer mehr Standorte mit einer starken Kaliumfestlegung bekannt

geworden. Es handelt sich dabei vorwiegend um humose bis anmoorige Aueböden (in den Tälern von Isar, Donau, Lech, Laber, Amper usw.) mit einem hohen Tongehalt und einem pH-Wert meist um den Neutralpunkt. Entstehungsgeschichtlich spricht vieles für die Abtragung von kaliumfixierendem Ton- und Schluffmaterial von den Seitenhängen (Lößverwitterungsböden) in die Flußtäler.

Niederbudde<sup>13</sup> fand in Lößböden mit Tonverlagerung eine beträchtliche Anreicherung von K-fixierenden Illitverwitterungsprodukten im B-Horizont. Hinzu kommt, daß auf diesen Standorten günstige Bedingungen für Verwitterung, Kaliumverarmung und Tonneubildung (Feuchtigkeit) vorliegen. Häufige Überschwemmungsperioden mit Ca-reichem Flußwasser begünstigen die Kaliumverarmung der Illite (Welte u. Mitarb.<sup>22</sup>, Schachtschabel u. Köster<sup>17</sup>).

Die bisherige Nutzung dieser Standorte als Wiesen und Weiden beeinflusste entscheidend das Ausmaß der Kaliumfixierung; werden diese, wie in jüngster Zeit sehr häufig, im Zuge betriebswirtschaftlicher Umstellungen umgebrochen und als Ackerland genutzt, so tritt im Ap-Horizont durch Vermischen der Grasnarbe mit tiefer gelegenen, stark K-fixierenden Bodenschichten ein teilweise extremer Mangel an pflanzenverfügbarem Kalium auf.

Im Rahmen eines größeren Forschungsprogrammes wurde an unserem Institut ein dreijähriger Gefäßversuch durchgeführt auf einem stark kaliumfixierenden Boden mit folgender Fragestellung:

Wirkung steigender Kaliumgaben auf Ertragsbildung und Mineralstoffaufnahme verschiedener Kulturpflanzen sowie auf die Beweglichkeit bzw. Fixierung von Kalium im Boden.

#### VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND UNTERSUCHUNGSMETHODIK

Die Anlage erfolgte in Ahrgefäßen (10 kg Bodengewicht).

##### *Boden*

Humoser Flußbaueboden (Koislhof, Isartal bei Landshut)

Schlämmanalyse: Ton (< 2 $\mu$ )	48%	Feinsand (20–200 $\mu$ )	21%
Schluff (2–20 $\mu$ )	30%	Grobsand (> 200 $\mu$ )	1%

Bodenart: Ton

Org. Substanz: 8%

DL-Werte: $\left. \begin{array}{l} 3 \text{ mg } K_2O \\ 13 \text{ mg } P_2O_5 \end{array} \right\} 100 \text{ g Boden}$	pH(KCl): 5.6
	Austauschb. K: 5 mg/100 g Boden Ges. K: 1.15%



K-Fixierung (LUFA-Verbandsmethode <sup>20 18</sup>):

Naßfixierung:

Einwaage 20 g

1 h schütteln (Maschine) mit 50 ml *N*/100 KCl; Zugabe von 50 ml *N* CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>, nochmals 1 h schütteln; im Filtrat nach Verdünnen 1:10 flammenphotometrische K-Bestimmung;

Trockenfixierung:

Eintrocknen der 50 ml *N*/100 KCl-Lösung in 20 g Boden im Trockenschrank (80°C); anschließend Zugabe von 50 ml H<sub>2</sub>O und weitere Behandlung wie bei Naßfixierung;

T- und S-Wert (nach Mehlich): eine gesonderte Bestimmung der austauschbaren H-Ionen erfolgte nicht.

Wasserlösliche Kationen und Anionen (Ca, Mg, Na, Cl, SO<sub>4</sub>) (H<sub>2</sub>O/Boden = 10:1).

Leitfähigkeit ( $\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ): Konduktometrische Bestimmung.

K-Konzentration im Sättigungsextrakt (Németh <sup>10</sup>).

K-Diffusionsfluß (Kauffmann <sup>7</sup>, Grimme <sup>4</sup>).

K-Beweglichkeit, bestimmt nach der EUF-Methode (Németh <sup>11</sup>).

## ERGEBNISSE

### *Wirkung steigender Kaliumgaben auf Ertragsbildung und Mineralstoffaufnahme*

In den ersten beiden Versuchsjahren verlief die Keimung und Anfangsentwicklung der Versuchspflanzen gleichmäßig. Selbst sehr hohe Kaliumgaben führten in der Erstfrucht zu keinerlei Konzentrationsschäden, bedingt teils durch rasche Fixierung des Kaliums im Boden, teils durch versuchstechnische Vorbeugemaßnahmen (Zumischen des Düngers zu den unteren 4/5 des Gefäßinhaltes); auf diese Weise entwickelten sich die Pflanzen zunächst in einer salzarmen Bodenzone.

Im 2. Versuchsjahr führte die hohe Kaliumgabe (15 g K<sub>2</sub>O) zu einer merklichen Wachstumshemmung von Grünhafer und Persischem Klee, die offensichtlich auf die hohe Cl<sup>-</sup>-Konzentration (KCl-Düngung) zurückzuführen sein dürfte. Hingegen war die K-Konzentration der Bodenlösung, gemessen am Gehalt an austauschbarem Kalium (siehe später) nur geringfügig angestiegen.

Im 3. Versuchsjahr wurde aus obenstehenden Gründen K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gewählt; diese Maßnahme konnte jedoch den sehr unregelmäßigen Auflauf sämtlicher 3 Früchte (insbesondere Grünraps) in den beiden hohen K-Stufen nicht verhindern.



Abb. 1. Kaliumsteigerung zu Hafer (Versuchsjahr 1969).

TABELLE 1

Trockensubstanzproduktion (g/Gefäß)

Düngung/Gefäß (jedes Versuchsjahr) g K <sub>2</sub> O	1969	1970	1971	Gesamtertrag 1969-1971
	Hafer + Pers.Klee	Grünhafer + Pers.Klee	Grünhafer + Grünrap + Ackerbohnen	
0	54.3	25.8	40.7	120.8
1	71.4	41.1	77.7	190.2
2	100.3	56.2	106.0	262.5
5	141.4	84.6	156.0	382.0
10	186.1	87.1	170.0	443.2
15	218.8	44.1	114.2	377.1
GD 5%	19.3	6.4	15.0	45.7

Die Steigerung der Kaliumdüngung bis auf 15 g K<sub>2</sub>O/Gefäß bewirkte 1969 einen mit wenigen Ausnahmen signifikanten Anstieg der Trockensubstanzproduktion aller Versuchsfrüchte (Abb. 1, Tab. 1). Die beobachtete Wachstumshemmung (15 g K<sub>2</sub>O) im 2. und 3. Versuchsjahr äußerte sich in einem starken Ertragsabfall gegenüber

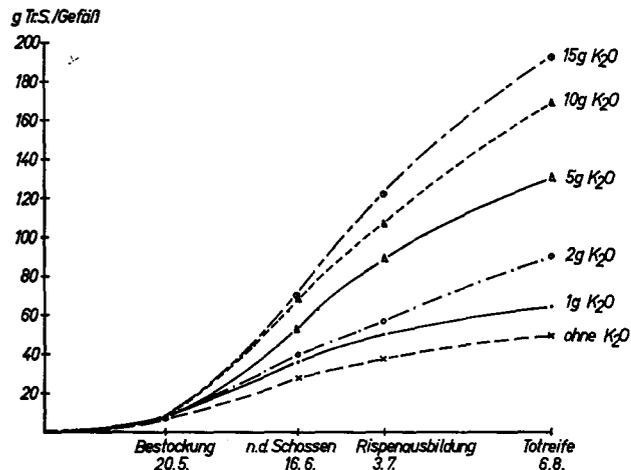


Abb. 2. Substanzbildung von Hafer im Verlaufe des Wachstums (1969).

Düngungsart 5. Eine jährliche Kaliumgabe von 10 g  $K_2O$  erzielte demnach den höchsten Gesamtertrag.

Verfolgt man die Substanzproduktion von Hafer (1969) im Verlaufe des Wachstums (Abb. 2), so wurde die Ertragsbildung durch höhere Kaliumgaben von der Bestockung ab zunehmend größer.

Die Steigerung der KCl-Gaben führte erwartungsgemäß zu einem starken Anstieg der K- und Cl-Gehalte in den vegetativen Pflanzenteilen; in den Körnern blieben dagegen die K-Werte nahezu unverändert (Tab. 2). Erst durch sehr hohe Kaliumgaben wurden auf diesem Boden K-Gehalte von 4–5% in der Pflanzentrockensubstanz erreicht, die für das Stadium der Bestockung als optimal angesehen werden (Mengel <sup>9</sup>).

Interessant ist auch die Tatsache, daß die Kalium- u. Magnesium-

TABELLE 2

Mineralstoffgehalte in Abhängigkeit von der Kaliumdüngung (Hafer, 1969), % in Trockensubstanz

Entwicklung der Pflanzen	K		Cl		Ca		Mg	
	2 g $K_2O$	15 g $K_2O$						
Bestockung	1.99	5.11	0.38	1.60	0.12	0.16	0.46	0.33
Schossen	0.70	4.58	0.85	2.91	0.13	0.09	0.31	0.21
Rispenausbildung	0.46	2.80	0.88	2.07	1.05	0.52	0.26	0.15
Totreife Korn	0.57	0.59	0.47	0.25	0.16	0.11	0.15	0.14
Stroh	0.25	3.90	1.19	3.09	1.45	0.90	0.34	0.16

gehalte im Verlaufe der vegetativen Entwicklung (von der Bestockung bis zur Totreife des Strohes) im ganzen gesehen abnahmen, während die Cl- u. Ca-Gehalte anstiegen. Je höher das KCl-Angebot ist, umso mehr K und Cl finden sich in den vegetativen Pflanzenteilen vertreten (Tab. 3).

TABELLE 3  
K- und Cl-Aufnahme (Hafer 1969)

Düngung/Gefäß und Versuchsjahr g K <sub>2</sub> O	Gesamtaufnahme mg/Gefäß		Prozentualer Anteil im Stroh (Gesamtaufnahme = 100)	
	K	Cl	K	Cl
0	155	208	30	63
1	220	489	31	76
2	359	768	33	74
5	874	1452	57	78
10	2137	2469	78	88
15	4181	3095	86	92

Chlor ist im Gegensatz zu Kalium überwiegend im Stroh enthalten. Die starke Anreicherung von K und Cl in vegetativen Organen der höchsten Kaliumstufe weist bereits auf eine gewisse Luxusaufnahme hin.

TABELLE 4  
Kaliumaufnahme und Ausnutzung

Düngung je Gefäß u. Jahr g K <sub>2</sub> O	mg K/Gefäß				K-Ausnutzung %	Düngerrest im Boden mg K/Gefäß
	1969	1970	1971	Gesamt- aufnahme		
0	188	163	247	598	—	—
1	271	312	589	1172	23.1	1916
2	428	525	999	1952	27.2	3626
5	977	1519	2825	5321	37.9	7727
10	2370	3511	6455	12336	47.1	13162
15	4634	1454	5660	11748	29.9	26200

Die Kaliumaufnahme (Tab. 4) stieg im Jahre 1969 bis zur höchsten Düngergabe an, 1970 und 1971 brachten 15 g K<sub>2</sub>O/Gefäß als Folge geringerer Ertragsbildung einen Rückgang der K-Aufnahme. Die gesamte Ausnutzung des Düngerkaliums erreichte allgemein nur

geringe Werte (23–47%) der größte Teil (53–77%) blieb im Boden zurück und war für die Pflanzen nicht verfügbar. Während auf normalen Böden eine durchschnittliche K-Ausnutzung von 60–80% erreicht wird, ist unter den Bedingungen eines stark kaliumfixierenden Bodens für eine optimale Pflanzenentwicklung die 5–10fache K-Düngung nötig.

#### *Wirkung steigender Kaliumgaben auf den Boden*

Die pH- sowie  $P_2O_5$ -Laktatwerte wurden durch die Kaliumsteigerung kaum beeinflusst, so daß auf deren Wiedergabe verzichtet werden kann. Da zwischen dem laktatlöslichen Kalium (Egnér-Riehm) und dem austauschbaren Kalium nur geringfügige Unterschiede bestehen, wird nur letzteres besprochen (Tab. 5).

TABELLE 5  
Austauschbares Kalium und K-Naßfixierung im Boden

Düngung je Gefäß u. Jahr	Probenahmezeitpunkt						1970 19.9	1971 20.10
	1969							
	18.4	20.5	16.6	3.7	6.8	31.10		
<i>Austauschb. mg K/100 g Boden</i>								
0	6	4	5	5	6	3	2	4
1	6	4	4	5	6	4	2	4
2	6	5	4	5	6	4	2	5
5	6	5	4	6	7	5	2	5
10	7	5	5	7	7	6	3	8
15	9	6	6	9	7	7	7	36
<i>Naßfixierung mg K/100 g Boden</i>								
0	95	93	93	92	95	93	92	89
1	93	92	91	92	94	92	91	—
2	92	92	90	90	93	90	91	88
5	85	90	84	85	90	85	77	83
10	79	88	83	73	83	74	61	49
15	80	82	77	69	79	63	42	13

Das austauschbare Kalium nahm erst durch höhere KCl-Gaben (ab 10 g  $K_2O$ ) leicht zu. Während aber eine zweimalige Verabreichung von 15 g  $K_2O$  am Ende des Versuchsjahres 1970 nur einen geringen Anstieg bedeutete, führte die dreimalige Abdüngung (insgesamt 45 g  $K_2O$ /Gefäß) zu einer deutlichen Erhöhung dieser Fraktion. Der größte Teil des von den Pflanzen nicht entzogenen Dünger-

kaliums befindet sich also in einer nicht austauschbaren Form und ist in den Tonmineralen bereits zum Zeitpunkt der ersten Probenahme, das ist ca. 3 Wochen nach Zumischen des Düngers zum Boden, weitgehend fixiert worden. Die durch die hohen Kaliumgaben (1970 und 71) ausgelöste Wachstumsdepression kann demnach keinesfalls auf eine zu hohe  $K^+$ -Konzentration in der Bodenlösung, sondern ausschließlich auf die starke  $Cl^-$ -Anreicherung zurückzuführen sein.

Die *Naßfixierung* (Tab. 5) ging mit steigenden Kaliumgaben erwartungsgemäß zurück und zwar am Ende des 1. Versuchsjahres (6. Probenahme) um ca. 30% gegenüber der Kontrolle. Aber erst nach dem 3. Jahr war die Fixierungskapazität dieses Bodens nahezu völlig abgesättigt; als Folge davon stieg das austauschbare Kalium dann auch deutlich an. Eine dreimalige Gabe von 10 g  $K_2O$  (1969–1971) verringerte die Fixierung etwa in gleichem Maße wie zwei Gaben von je 15 g  $K_2O$  (1969–1970).

Mit dem Rückgang der Naßfixierung und dem Anstieg des austauschbaren K ist eine Abnahme des Sorptionsvermögens festzu-

TABELLE 6  
K-Fixierung und Sorption

Bestimmungen	Kaliumdüngung, g $K_2O$					
	0		10		15	
	1970	1971	1970	1971	1970	1971
<b>Naßfixierung,</b>						
mg K/100 g Boden	92	89	61	49	42	13
<b>Austauschbares K*</b>	2	4	3	8	7	36
<b>T-Wert</b>	46.2	45.9	45.3	42.6	44.0	39.6
<b>Kationensorption*</b>						
Na	—	0.07	0.03	0.05	0.21	0.10
K	0.03	0.09	0.12	0.12	0.39	0.42
Ca	40.70	39.90	39.60	38.10	37.10	34.00
Mg	5.50	5.80	5.50	4.30	6.30	5.10
<b>Kationensättigung (%)</b>						
Na	—	(0.15)	(0.07)	(0.12)	(0.48)	(0.25)
K	(0.06)**	(0.20)	(0.26)	(0.28)	(0.89)	1.06
Ca	88	87	87	89	84	86
Mg	12	13	12	10	14	13

\*\* rechnerische Größen, basierend auf extrem niedrigen Sorptionswerten

\* mval/100 g Boden

stellen (Tab. 6). Die Verdrängung des Calciums aus den Zwischenschichten der Tonminerale durch Kalium bewirkte eine Verringerung des Basisabstandes und folglich der Sorptionsoberfläche der aufgeweiteten Tonminerale. Die Ca-Sättigung blieb jedoch gleich, bedingt durch den Rückgang des T-Wertes (siehe auch Gutser u. Teicher <sup>5</sup>). Das nach Mehlich austauschbare Kalium stieg von 0.03 auf 0.42 mval/100 g Boden an (15 g K<sub>2</sub>O), die Kaliumsättigung lag zu Versuchsende bei 1%.

TABELLE 7

Gehalte (mg/100 g Boden) an Kationen (Ca, Mg, Na) und Anionen (Cl, SO<sub>4</sub>) im Wasserextrakt sowie Leitfähigkeit, bestimmt an verschiedenen Zeitpunkten:

I = Versuchsbeginn      III = Ende 1970  
II = Ende 1969          IV = Ende 1971

Düngung g K <sub>2</sub> O je Gefäß	Zeitpunkt				Zeitpunkt			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	<i>Ca</i>				<i>Mg</i>			
2	28	26	61	55	4	4	8	7
10	28	58	143	169	4	8	20	20
15	28	69	247	390	4	9	34	52
	<i>Na</i>				<i>Cl</i>			
2	2.3	0.6	0.4	0.7	7	16	65	1
10	2.3	0.7	1.3	2.0	7	116	294	128
15	2.3	1.5	3.7	8.4	7	127	503	500
	<i>SO<sub>4</sub></i>				<i>Leitfähigkeit (10<sup>-6</sup> Ω<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>)</i>			
2	77	90	54	106	178	144	355	352
10	77	61	51	253	178	392	962	931
15	77	42	38	355	178	459	1693	2304

Mit dem Rückgang des K-Fixierungsvermögens war ein Anstieg von Ca, Mg und Na (15 g K<sub>2</sub>O!) im Wasserauszug verbunden (Tab. 7). Die Erhöhung der Ca- und Mg-Gehalte um das 6fache (10 g K<sub>2</sub>O) bzw. 13–14fache (15 g K<sub>2</sub>O) gegenüber Versuchsbeginn ist auf einen Austausch dieser Ionen aus den Zwischenschichten der Tonminerale durch K-Ionen zurückzuführen. Die von den Pflanzen nicht aufgenommenen Anionen aus der Düngung führten zu einem erheblichen Anstieg von Cl<sup>-</sup> und SO<sub>4</sub><sup>-</sup> in der Bodenlösung. Die Leitfähigkeit stieg bis auf 2304 · 10<sup>-6</sup> Ω<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> (15 g K<sub>2</sub>O, 1971) an.

Von der Landwirtschaftlichen Forschungsanstalt Bünthehof in

TABELLE 8

K-Konzentration im Sättigungsextrakt, Diffusionsflußmenge, K-Beweglichkeit nach der EUF-Methode\* im Boden (Ende 1. Versuchsjahr) ohne (I) oder mit (II) Bepflanzung

Düngung g K <sub>2</sub> O je Gefäß	K-Konzentration im Sättigungsextrakt mval/l		Diffusionsfluß bei pF 2.0 mval K/15 cm <sup>2</sup> u. Woche		EUF-Fractionen (mg K/100 g Boden)					
	I	II	I	II	nach 10 Min.		nach 15 Min.		nach 35 Min.	
					I	II	I	II	I	II
0	0.10	0.03	5	7	1.1	—	1.8	—	5.2	4.0
1	0.13	0.03	7	10	1.3	—	2.5	—	5.8	4.9
2	0.14	0.04	7.5	8	1.6	—	2.9	—	6.5	4.5
5	0.18	0.05	9.6	13	2.0	—	4.0	—	8.0	5.6
10	0.22	0.05	19.8	18	3.0	—	6.4	—	13.3	7.4
15	0.35	0.05	40.6	23	6.0	—	11.0	—	19.7	11.4

I = ohne Bepflanzung

II = mit Bepflanzung

\* von Landwirtschaftlicher Forschungsanstalt Bünthehof durchgeführt

dankenswerter Weise durchgeführte Untersuchungen (Tab. 8) bezüglich

1. K-Konzentration im Sättigungsextrakt

2. Diffusionsflußmenge bei pF 2.0

3. Bewertung der K-Beweglichkeit nach der EUF-Methode in den unterschiedlich gedüngten Gefäßen ergaben mit und ohne Pflanzenbesatz übereinstimmend, daß durch Steigerung der Düngung bis zu 15 g K<sub>2</sub>O/Gefäß die für ein optimales Pflanzenwachstum im Gefäßversuch geforderten Richtwerte am Ende des ersten Versuchsjahres nicht erreicht wurden. Als solche gelten nach v. Braunschweig<sup>2</sup>:

K-Konzentration im Sättigungsextrakt: 0.5 mval K/l

Diffusionsfluß bei pF = 2.0: 50–80 mval/15 cm<sup>2</sup> u. Woche

EUF-Methode: 0–10 min: 10 mg K/100 g Boden

0–15 min: 15 mg K/100 g Boden

Die Meßwerte der Reihe II lagen als Folge des K-Entzuges durch die Pflanzen erheblich unter denen der Reihe I.

Der Versuch einer Bilanzierung des verabreichten Düngerkaliums (Tab. 9) zeigt, daß der größte Teil im Boden zurückgeblieben ist und zwar zwischen 19 und 262 mg K/100 g Boden. Die Naßfixierung nahm dagegen um 5 bis 80 mg K/100 g Boden ab; das austauschbare

TABELLE 9  
Kaliumbilanz im Boden nach dem 3. Versuchsjahr (1971)

Versuchs- glied	mg K/Gefäß			mg K/100 g Boden			
	Düngung	Mehraufnahme durch Pflanzen gegenüber 0 K <sub>2</sub> O	Düngerrest im Boden	Rückgang der K-Naß- fixierung	Anstieg des austausch- baren Kaliums	1-(2+3)	
			1	2	3		
1 g K <sub>2</sub> O	2490	574	1916	19	—	—	+ 19
2 g K <sub>2</sub> O	4980	1354	3626	36	10	—	+ 26
5 g K <sub>2</sub> O	12450	4723	7727	77	5	—	+ 72
10 g K <sub>2</sub> O	24900	11738	13162	132	44	3	+ 85
15 g K <sub>2</sub> O	37350	11150	26200	262	80	31	+ 151

Kalium wurde aber lediglich durch dreimalige Düngung mit 15 g K<sub>2</sub>O merklich erhöht.

Subtrahiert man vom Düngerrest im Boden (1) den Rückgang der K-Naßfixierung (2) und den Anstieg des austauschbaren Kaliums (3), so müßte sich eigentlich 0 ergeben; tatsächlich errechnet sich aber z.B. für Versuchsglied 6 ein Wert von + 151 mg K/100 g Boden. Das Fixierungsvermögen dieses Bodens liegt also um ca. 150 mg K höher, nämlich bei 240 mg K/100 g Boden, als durch die angewandte Bestimmungsmethode (Vorlage 100 mg K/100 g Boden) ermittelt worden ist. Die zur Bestimmung der K-Fixierung benutzte Verbandsmethode liefert folglich insbesondere bei hohen Festlegungseigenschaften des Bodens nur ungefähre Orientierungswerte, die über das gesamte Fixierungsvermögen wenig aussagen und eine rechnerische Ermittlung des theoretischen Bedarfs an Kalium zur Absättigung der Fixierungskapazität nicht zulassen.

#### DISKUSSION

In Abbildung 3 soll eine Zusammenschau der wichtigsten Ergebnisse gegeben werden.

Auf diesem Tonboden aus den Flußauen der Isar waren extrem hohe Kaliumgaben (10–15 g K<sub>2</sub>O/10 kg Boden) 3 Jahre lang notwendig, um eine optimale Ernährung der Pflanzen mit Kalium sicherzustellen. Der begrenzende Ertragsfaktor in der hohen Düngungsstufe ist das Begleit-ion Cl<sup>-</sup> (1969, 1970), das sich bereits in

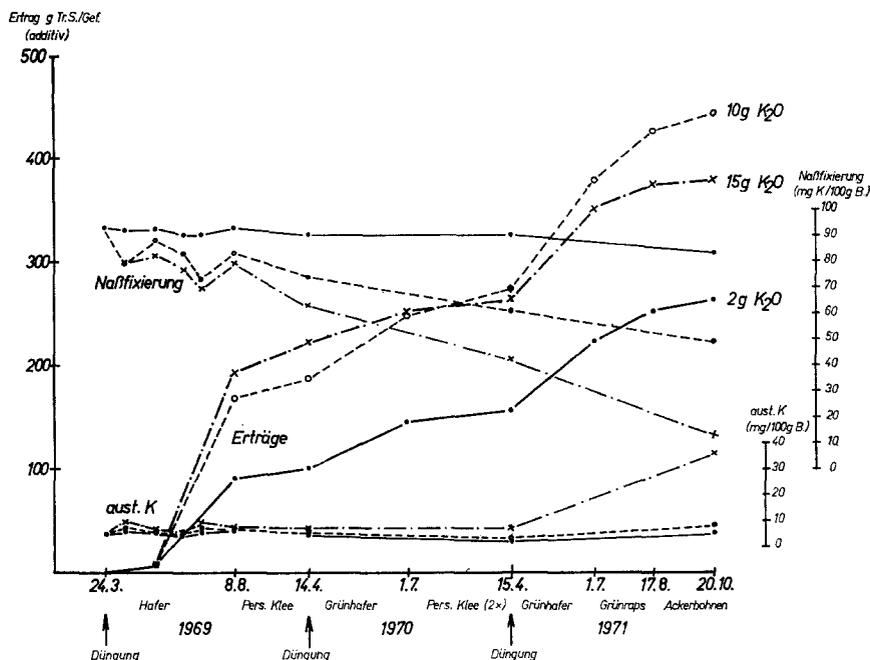


Abb. 3. Wirkung einer Kaliumsteigerung auf Ertragsbildung, K-Naßfixierung und austauschbares Kalium auf K-fixierendem Boden.

großen Mengen im Boden angereichert hat, da eine Auswaschung unter den Bedingungen dieses Versuches (unten geschlossene Gefäße) ausscheidet. Im trockenen Pflanzenmaterial (Ackerbohnen 1971) wurden Chloridgehalte bis zu 4% festgestellt. Die Gefahr einer Überkonzentration an  $K^+$  in der Bodenlösung ist in diesem Boden kaum gegeben, da die K-Festlegung mit hoher Geschwindigkeit abläuft und das austauschbare Kalium nur wenig ansteigt. Erst am

TABELLE 10

Korrelationskoeffizienten  
(n = 36)

	r	B (%)
Ertrag × Naßfixierung	- 0.52*	27
Ertrag × austauschb. Kalium	+ 0.23	5
Austauschb. Kalium × Naßfixierung	- 0.62*	38

\* gesichert bei P = 5%

Ende des 3. Jahres nahm diese Fraktion in der hohen K-Stufe bis auf 36 mg K/100 g Boden zu; aber selbst unter diesen Bedingungen ist nicht mit Konzentrationsschäden durch Kalium zu rechnen.

Die relativ niedrigen Korrelationskoeffizienten (Tab. 10) zwischen Ertrag und austauschbarem Kalium bzw. Ertrag und Kaliumfixierung sind vorwiegend auf folgende Gründe zurückzuführen:

1. Die Höhe der Erträge ist nicht nur durch die Verfügbarkeit des Kaliums im Boden begrenzt (Höhe der Naßfixierung und des austauschbaren Kaliums), sondern insbesondere auch durch die sehr hohen Mengen an Cl.

2. Nach der üblichen LUFA-Methode wird nicht die gesamte K-Fixierungskapazität dieses Bodens erfaßt. Je größer nämlich diese ist, umso weniger wird die Wirkung der K-Düngung auf die Höhe der Naßfixierung angezeigt (siehe Tab. 11).

TABELLE 11

Gegenüberstellung der K-Naßfixierung nach LUFA-Methode bzw. errechneter K-Bilanz (siehe Tabelle 9)

Düngung	K-Naßfixierung				Abnahme der Fixierung (%)	
	zu Versuchsbeginn		zum Versuchsende		LUFA-Methode	errechnet durch K-Bilanz
	LUFA-Methode	errechnet durch K-Bilanz	LUFA-Methode	errechnet durch K-Bilanz		
2 g K <sub>2</sub> O	93	240	88	205	5.3	14.6
5 g K <sub>2</sub> O	93	240	83	160	10.8	33.3
10 g K <sub>2</sub> O	93	240	49	116	47.3	51.7
15 g K <sub>2</sub> O	93	240	13	18	86.0	92.5

3. Die K-Düngung bewirkte mit Ausnahme der dreimaligen hohen Gabe 1971 kaum einen Anstieg des austauschbaren Kaliums, trotzdem waren beachtliche Ertragssteigerungen festzustellen. Fixiertes Düngerkalium ist zwar nicht mehr ammoniumaustauschbar – wird also durch diese Methode nicht angezeigt – ist aber sicherlich zum Teil noch pflanzenverfügbar. Nach Barshad<sup>1</sup> u. Niederbudde<sup>12</sup> ist frisch fixiertes Kalium leichter verfügbar als natives Kalium, ferner hängt die Möglichkeit der Desorption von fixierten K-Ionen auch stark von der Schichtladung eines Tonminerals ab (Scheffer-Schachtschabel<sup>19</sup>).

Hohe Kaliumgaben bewirkten einen starken Anstieg von Calcium,

Magnesium und Natrium im Wasserextrakt des Bodens (siehe auch Wiklander <sup>23</sup>); trotz einseitig hoher K-Zufuhr kam es deshalb zu keinem Rückgang der Ca-, Mg- und Na-Aufnahme durch die Pflanzen. Die geringeren Gehalte dieser Elemente in der Pflanze waren nicht so sehr eine Folge von Aufnahmeantagonismen (K/Mg, K/Ca-K/Na), als vielmehr eines Verdünnungseffektes (durch höhere Substanzproduktion). Der hohe Gehalt an Kationen und Anionen (vorwiegend Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>) in der Bodenlösung brachte einen starken Anstieg der Leitfähigkeit mit sich, deren hoher Wert bei 15 g K<sub>2</sub>O (insbesondere 1971) auch den starken Ertragsrückgang erklärt.

## ZUSAMMENFASSUNG

In einem dreijährigen Gefäßversuch auf stark kaliumfixierendem Aueboden (93 mg K/100 g Boden) wurde die Wirkung steigender Kaliumgaben (KCl, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) auf Ertragsbildung und K-Dynamik des Bodens geprüft.

1. Auf diesem Ton (78% Ton + Schluff) sind extrem hohe Kaliumgaben (10–15 g K<sub>2</sub>O/10 kg Boden und Jahr) notwendig, um eine optimale Ernährung der Pflanzen (Hafer (*Avena sativa* L.), Klee (*Trifolium resupinatum* L.), Grünraps (*Brassica napus* L. oleifera), Ackerbohnen (*Vicia faba* L.)) mit Kalium sicherzustellen. Die gesamte K-Ausnutzung betrug 23–47%.

2. Der größte Teil des Düngerkaliums wurde bereits in wenigen Wochen festgelegt. Die Werte an austauschbarem Kalium stiegen erst nach dreimaliger Abdüngung mit 15 g K<sub>2</sub>O merklich an, gleichzeitig ging die K-Naßfixierung auf 13 mg K/100 g Boden zurück.

3. Die Werte an austauschbarem Kalium sowie der K-Naßfixierung korrelierten mit dem erzielten Pflanzenertrag verhältnismäßig schlecht. Inwieweit durch diese Methoden das tatsächliche pflanzenverfügbare Kalium bzw. die volle Höhe der K-Fixierungskapazität dieses Bodens erfaßt wird, wird diskutiert.

Eingegangen am 17. April 1973

## SCHRIFTTUM

- 1 Barshad, J., Cation exchange in micaceous minerals. II. Replaceability of ammonium and potassium from vermiculite, biotite and montmorillonite. *Soil Sci.* **78**, 57 (1954).
- 2 Braunschweig, L. C. von und Mengel, K. O., Der Einfluß verschiedener den Kaliumzustand des Bodens charakterisierender Parameter auf den Kornertrag von Hafer. *Landw. Forsch.* **26/I**, Sonderheft, 65–72 (1971).
- 3 Brind, W. D., Recent studies in potassium fixation. *Soil and Fertilizers* **12**, 1 (1942).
- 4 Grimme, H., Németh, K. und von Braunschweig, L. C., Some factors controlling potassium availability in soils. *Proc. Intern. Congress of Soil Fertilizer's Evaluation, New Delhi* **1**, 33–43 (1971).

- 5 Gutser, R. und Teicher, K., Wechselwirkungen zwischen Kalium und Natrium auf kaliumfixierendem Boden. *Landw. Forsch.* **28/I**, Sonderheft, 166–174 (1973).
- 6 Hauser, G. F., Die nichtaustauschbare Festlegung des Kalis im Boden. Thesis. Agr. Univ. Wageningen (1941).
- 7 Kauffmann, M. D. und Bouldin, D. R., Relationships of exchangeable and non-exchangeable potassium in soils adjacent to cation exchange resins and plant roots. *Soil Sci.* **104**, 145–150 (1967).
- 8 Marek, H. W. van der, Potassium fixation in Dutch soils: Mineralogical analysis. *Soil Sci.* **78**, 163 (1954).
- 9 Mengel, K., Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. Gustav Fischer Verlag, Jena (1968).
- 10 Németh, K., Mengel, K. und Grimme, H., The concentration of K, Ca and Mg in the saturation extract in relation to exchangeable K, Ca and Mg. *Soil Sci.* **109**, 179–185 (1970).
- 11 Németh, K., Möglichkeiten zur Bestimmung maßgeblicher Faktoren der Bodenfruchtbarkeit mittels Elektro-Ultra-Filtration (EUF). *Landw. Forsch.* **26/I**, Sonderheft, 192–198 (1971).
- 12 Niederbudde, E. A., Zur Kaliumdynamik illitreicher Auelehme bei intensiver Bepflanzung. *Z. Pflanzenernährung, Bodenkd.* **96**, 157–169 (1961).
- 13 Niederbudde, E. A., Röntgenographische Untersuchungen zur Deutung von K-Fixierungsunterschieden in Lößböden mit Tonverlagerung. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **4**, 253–261 (1965).
- 14 Niederbudde, E. A., Illitverwitterungsprodukte in Löß- und Aueböden Südwestdeutschlands unter Einwirkung von Kalidünger. I. Mitteilung: Mineralumwandlung in geköpften Parabraunerden und einer Pararendzina. *Landw. Forsch.* **19**, 205–214 (1966).
- 15 Niederbudde, E. A., Illitverwitterungsprodukte in Löß- und Aueböden Südwestdeutschlands unter Einwirkung von Kalidünger. II. Mitteilung: Mineralumwandlung und Verteilung des Kaliums in Aueböden. *Landw. Forsch.* **20**, 1–17 (1967).
- 16 Schachtschabel, P., Aufnahme von nicht-austauschbarem Kali durch die Pflanzen. *Z. Bodenk. Pflanzenernähr.*, **48**, 107–133 (1937).
- 17 Schachtschabel, P. und Köster, W. L., Chemische Untersuchungen an Marschen (II). *Z. Pflanzenernähr., Bodenkd.* **89**, 148–159 (1960).
- 18 Schachtschabel, P., Fixierung und Nachlieferung von Kalium- und Ammonium-Ionen – Beurteilung und Bestimmung des Kalium-Versorgungsgrades von Böden. *Landw. Forsch.* **14**, 15. Sonderheft, 29–47 (1961).
- 19 Scheffer, F. und Schachtschabel, P., Lehrbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart (1970).
- 20 Schroeder, D., Kaliumfestlegung und Kaliumnachlieferung von Lößböden. *Landw. Forsch.* **8**, 1–6 (1955).
- 21 Schuffelen, A. C., Marek, H. W. van der, Potassium fixation in soils. *Kalium Symposium, Rom*, 157–201 (1955).
- 22 Welte, E., Niederbudde, E. A. und Todorčić, B. L., Der K-Zustand und das Verhalten des Kaliums in typischen Böden Ostsloweniens und Baranjas. II. Mitteilung: Der K-Zustand und dessen Veränderung durch K-Zufuhr. *Die Bodenkultur* **18**, 99–112 (1967).
- 23 Wiklander, L., Fixation of potassium by clays saturated with different cations. *Soil Sci.* **69**, 260–268 (1950).