

Kalium

10.1 Kalium im Boden

Der K-Gehalt von Böden liegt zwischen 0.2 und 3.3 %, im Mittel bei 1.2 %. Da sehr wenig K in der organischen Substanz gebunden vorkommt, haben organische Böden geringe K-Gehalte und die K-Verteilung im Profil steht nicht in Beziehung zum Gehalt an OS. Das im Boden vorhandene Kalium kann in vier Kategorien eingeteilt werden: (1) K in der Bodenlösung (K - Ion); (2) austauschbares K; (3) 'fixiertes' K; (4) mineralisches K. Die Aufnahme von Kalium durch Pflanzen ist mengenmäßig groß, meist verbleibt jedoch ein großer Teil in Form von Ernterückständen auf dem Feld, (z.B. 250 kg K₂O in 500 dt Zuckerrübenblatt) bzw. wird über Hofdünger (Gülle) zurückgeführt.

	Ertrag (dt/ha)	Entzug (kg K ₂ O/ha)
Weizen	60	175
Zuckerrüben	450	300
Kartoffeln	400	310
Blumenkohl	350	350

Kalium in der Bodenlösung: als Ion (K⁺); Konzentration im Bereich von 1 - 100 mg/l, meist 2 - 5 mg/l; Pflanzenwurzeln können durch Aufnahme die Konzentration an der Wurzel bis auf 1 - 2 pmol/l absenken.

austauschbares K: als austauschbares K wird die Menge an Kalium bezeichnet, die durch wiederholte Extraktion mit einer 1 M Ammoniumacetat-Lösung innerhalb einiger Stunden vom Boden freigesetzt wird. Die Gehalte an austauschbarem Kalium liegen bei 40 - 500 mg/kg, 150 mg/kg gelten als ausreichend.

fixiertes Kalium: Tonhaltige Böden können wasserlösliches und austauschbares Kalium in einer nichtaustauschbaren Form festlegen, was auf ihrem Gehalt an Vermiculiten und aufgeweiteten Illiten beruht. Die Intensität der K-Fixierung ist von der K-Selektivität der Minerale abhängig. Bei K-Zugabe werden immer erst die Plätze hoher Selektivität besetzt und dann zunehmend Plätze geringerer Selektivität. Bei Austrocknen des Bodens wird verstärkt Kalium fixiert (Zusammenklappen von Tonschichten).

mineralisches (natives Kalium): Die Freisetzung von K durch Verwitterung erfolgt sehr langsam, bei gleicher Partikelgröße kann folgende Reihenfolge aufgestellt werden:

Biotit > Muskovit > Orthoklas > Mikroklin

Tabelle 10.1 Minerale mit hohem Kaliumgehalt.

Mineral	Formel	K-Gehalt (%)
Glimmer		
- Biotit	$K_2Al_2Si_6(Fe^{2+}, Mg)_6O_{20}(OH)_4$	8.7
- Muskovit	$K_2Al_2Si_6Al_4O_{20}(OH)_4$	9.8
Feldspäte		
- Orthoklas	$KAlSi_3O_8$	13.7
- Mikroklin	$KAlSi_3O_8$	13.8
Tone		
- Illit		~ 7

pflanzenverfügbares Kalium: Verfügbar für die Pflanze ist nur das K^+ in der Bodenlösung. Die Konzentration des Kaliums in der Bodenlösung wird primär durch das Gleichgewicht mit den austauschbar an der Festphase des Bodens sorbierten K^+ -Ionen dominiert (Abbildung 10.1).

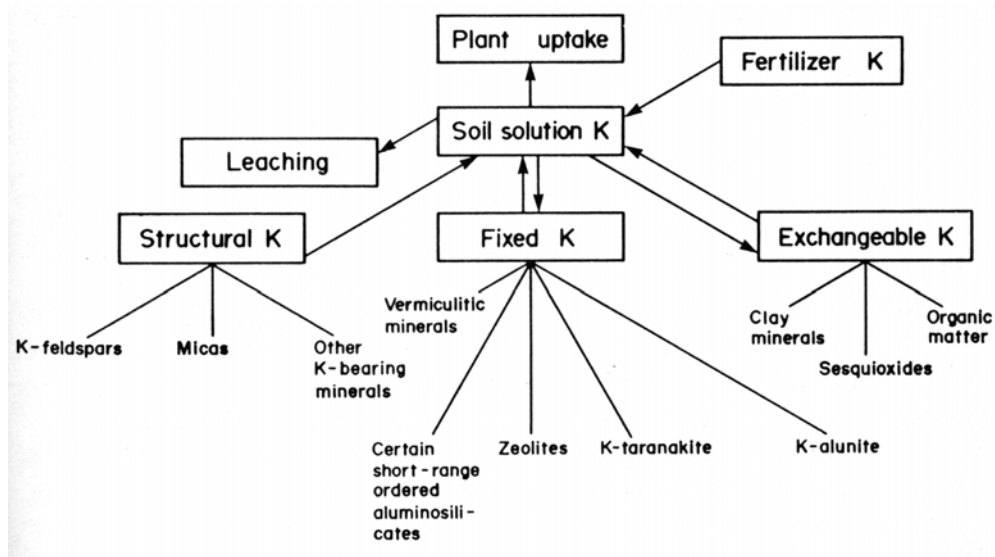


Abbildung 10.1 Kalium-Dynamik im Boden (Sparks, 1986).

Durch die starke Absenkung der Konzentration in der Bodenlösung in der Wurzelumgebung kommt es aber auch zu einem Übertritt des nicht austauschbaren Kaliums aus den Zwischenschichten der Tonminerale in die Bodenlösung, so dass die Pflanzen bedeutende Mengen an „fixiertem“ Kalium aufnehmen können (Abbildung 10.2).

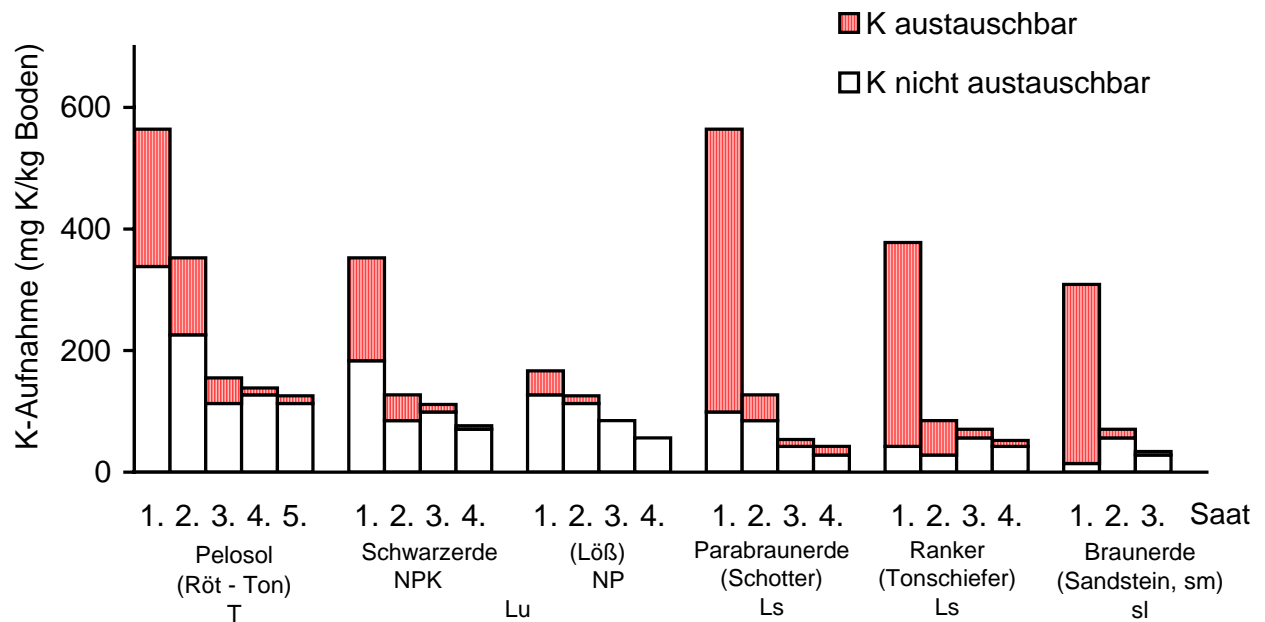


Abbildung 10.2 Aufnahme von austauschbarem und nichtaustauschbarem Kalium durch Roggenpflanzen (Methode Neubauer) aus Böden bei 3- bis 5-mal wiederholter Saat. NP-Parzelle der Schwarzerde blieb seit 25 Jahren ohne K-Düngung (Scheffer und Schachtschabel 1992).

10.2 Kalium in der Pflanze

Der Transport erfolgt in der ganzen Pflanze als K^+ , wobei Beweglichkeit im Phloem und Xylem vorliegt. Auf Grund der guten Verlagerbarkeit wird Kalium bei Mangel aus alten in junge Organe überführt, so dass die Mangelsymptome an den älteren Teilen beginnen. Die Funktionen des Kaliums sind offenbar ausschließlich an seine Ionenform gebunden. Es durchdringt Membranen sehr leicht, wobei es teilweise den Gegenstrom zu H^+ bildet, die von einer membrangebundenen H^+ -Efflux-Pumpe hinausgeschleust werden. Letztere wird durch ATPasen angetrieben. In der Zelle wirkt K^+ als wichtiges Osmotikum, welches über den Wassereinstrom den Turgor reguliert. Es bildet daher häufig das Gegenion zu Anionen organischer Säuren und wirkt bei der pH-Stabilisierung mit. Darüber hinaus sind > 50 Enzyme entweder völlig von der K^+ -Anwesenheit abhängig, oder sie werden durch K^+ stimuliert. Dazu gehören die Stärkesynthese, membrangebundene ATPasen (damit Beeinflussung der Phloembeladung) und Enzyme der Proteinsynthese. So ist K^+ offenbar für einige Schritte des Translationsprozesses notwendig, unter ihnen auch für die Bindung von tRNS an die Ribosomen. Über die Steuerung der Bildung von Ribulose1,5-bisphosphat-Carboxylase/Oxygenase sowie über die Rolle bei der Photophosphorylierung beeinflusst es die CO_2 -Assimilation indirekt und auch direkt. Darüber hinaus steigert K-Mangel die Aktivität kohlenhydratabbauender Enzyme. Die Anreicherung niedermolekularer Verbindungen bei K-

Mangel wird damit verständlich (z. B. Putrescin). K-Mangel beginnt – abgesehen von Wachstumsverzögerungen an den älteren Blättern. Diese zeigen zunächst Chlorose (= Mangel an Blattgrün), dann werden sie von den Spitzen her und an den Rändern gelb mit nachfolgender Bildung von Blattrandnekrosen. Oft tritt auch bronzartige Verfärbung auf. Die letztgenannten Symptome sollen durch die Putrescin-Anreicherung bedingt sein. Die Pflanzen zeigen außerdem Welketracht durch ihren gestörten Wasserhaushalt sowie mangelhafte Verholzung der Zellwände. Sie sind daher lagergefährdet und anfällig gegen Pilzinfektionen. K-Überschuss äußert sich in Form wenig spezifischer Salzsäden mit Blattrandnekrosen.

10.3 Kaliumdüngung

10.3.1 K-Versorgung der Böden

Die K-Versorgung der Böden wird in Deutschland nach einer Lactat-Methode bestimmt, früher nach der DL-Methode, seit etwa 1970 auch nach der CAL-Methode. Deren Werte liegen um ca. 10 % niedriger als die entsprechenden DL-Werte. Der Anteil der Lactat-Werte am gesamten austauschbaren Kalium sinkt mit steigendem Tongehalt. Da in den Feldversuchen der K-Gehalt teils nach der DL-Methode, teils nach der CAL-Methode ermittelt wurde, die K-Werte beider Methoden eng korrelieren und sich nur wenig unterscheiden, werden sie im folgenden teilweise als K (DL,CAL) zusammengefasst und in mg K/kg Ackerkrume ausgedrückt.

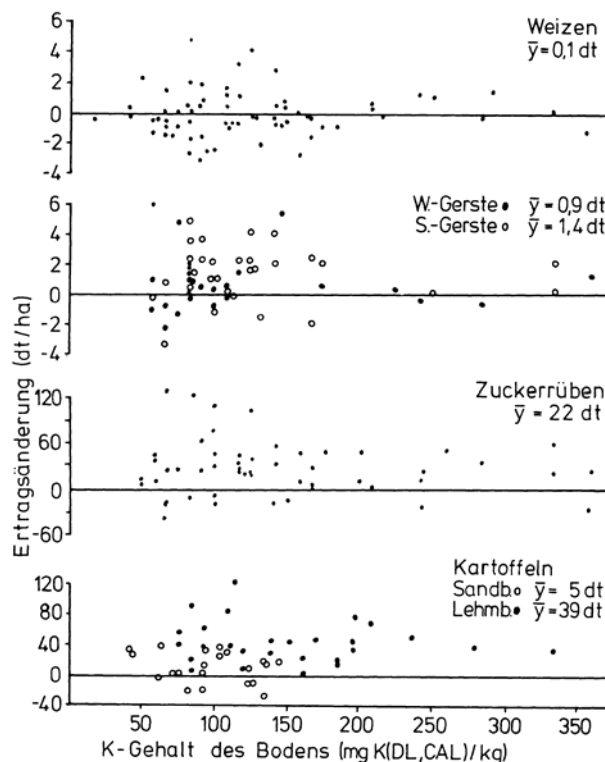


Abbildung 10.3 Beziehung zwischen K-Gehalt im Boden und Ertrag.

In der Abbildung 10.3 sind die Beziehungen zwischen den Ertragsänderungen (Mehr- und Mindererträge) einiger Kulturpflanzen durch K-Düngung in Abhängigkeit vom K(DL,CAL)-Gehalt der Böden dargestellt. Die Böden waren bei Getreide und Zuckerrüben vorwiegend Lößböden, teilweise auch Lehm- und Tonböden, bei Kartoffeln tonarme Sandböden und Lehmböden. Wie aus Abbildung 10.3 ersichtlich ist, schwanken die Ertragsänderungen bei ähnlichem K-Gehalt der Böden erheblich. Sie sind aber nicht allein auf eine K-Wirkung zurückzuführen, sondern sind weitgehend in der Natur der Feldversuche begründet, vor allem der Inhomogenität der Felder im Ober- und Unterboden auf engem Raum und der Witterung. Nur wenige Ertragsänderungen sind statistisch gesichert, so dass Einzelwerte im Gegensatz zu Mittelwerten im allgemeinen keine Aussagekraft haben. Zwischen dem K(DL,CAL)-Gehalt der Böden und den Mehrerträgen durch K-Düngung besteht in dem untersuchten K-Bereich bei allen Kulturen keine Beziehung.

Bei Weizen wurden durch K-Düngung im Mittel nur Mehrerträge von 0.1 dt/ha erzielt. Bei Gerste waren zwar die mittleren Mehrerträge mit 0.9 dt/ha (Wintergerste) und 1,4 dt/ha (Sommergerste) höher, aber bei einer Düngung von 80 kg K/ha nicht ökonomisch. Ökonomische Mehrerträge wurden manchmal in Jahren starker Austrocknung der Böden während der Periode des K-Hauptbedarfs der Pflanzen erzielt. Bei Zuckerrüben wurden durch K-Düngung im Mittel Mehrerträge von 22 dt/ha erzielt. Die zur Erzielung des Höchstertrags optimale K-Düngung betrug im Mittel 120 kg K/ha. Die auch noch bei relativ hohem K(DL,CAL)-Gehalt der Böden festgestellten Mehrerträge sind wahrscheinlich auf eine Na-Wirkung der Na-haltigen Kalisalze zurückzuführen. Daher wird z. B. in den Niederlanden generell eine Na-Düngung zu Zuckerrüben empfohlen, bei Löß- und Marschböden von 75 kg Na/ha, bei Sandböden von 150 kg Na/ha. Die im Vergleich zu den Lehmböden geringere K-Wirkung bei Kartoffeln auf den tonarmen Sandböden (Tongehalt und organische Substanz < 5 Vol. %) trotz niedrigem K(DL,CAL)-Gehalt erklärt sich aus der schwachen Bindung des austauschbaren Kaliums. Dies ergibt sich auch aus der geringen K-Düngung von nur 80 kg K/ha zur Erzielung des Höchstertrags, die bei den Lehmböden das 2- bis 3fache betrug.

10.3.2 Düngebedarfsermittlung

Der Düngebedarf für Phosphat und Kali richtet sich nach

- der Nährstoffversorgung des Bodens,
- der Nährstoffabfuhr der anzubauenden Fruchtarten,
- den Standortfaktoren.

Im Untersuchungsbefund werden die Phosphat- und Kaligehalte in mg je 100 g Boden (für Moorboden in mg/100 ml) angegeben. Die Untersuchung erfolgt nach der Calcium-Acetat-

Lactat-(CAL)-Methode. Der Bewertung der Nährstoffmengen im Boden (Gehaltsstufen sehr niedrig bis sehr hoch) liegen umfangreiche Feldversuche zugrunde (Tabelle 10.2).

Tabelle 10.2 Gehaltsstufen für Phosphat und Kali in Ackerböden
(Nährstoffgehalt in mg/100 g Boden, CAL).

Gehaltsstufe	Phosphat für alle		Kali	
	Bodenarten	leichte Böden (S, I'S)	mittlere Böden (IS-uL)	schwere Böden (tL-T)
A sehr niedrig	< 5	< 4	< 5	< 7
B niedrig	5-9	4-7	5-9	7-14
C anzustreben	10-20	8-15	10-20	15-25
D hoch	21-30	16-25	21-30	26-35
E sehr hoch	> 30	> 25	> 30	> 35

Sehr hoch mit Phosphat und mit Kali versorgte Böden sind im Sinne der Düngeverordnung (§ 3 Abs. 6) Böden, die pro 100 g Boden mehr als 50 mg P_2O_5 bzw. mehr als 45 mg K_2O auf leichten Böden, mehr als 55 mg K_2O auf mittleren Böden und mehr als 65 mg K_2O auf schweren Böden, gemessen nach der CAL-Methode, enthalten. Diese Werte stellen keinen pflanzenbaulichen Richtwert, sondern eine ordnungsrechtliche Obergrenze dar, deren Überschreitung zuverlässig auf eine sehr hohe Versorgung der jeweiligen Böden schließen lässt.

Für die einzelnen Gehaltsstufen gelten folgende Düngungsziele:

Tabelle 10.3 Düngungsziele einzelner Gehaltsstufen

A sehr niedrig und B niedrig	Der Nährstoffgehalt des Bodens soll zur Erzielung hoher und sicherer Ernten durch erhöhte Phosphat und Kaligaben angehoben werden. Die Düngung in den Gehaltsstufen A und B ist nicht mehr differenziert, so dass in Stufe A die Zuschläge, um in Gehaltsstufe C zu gelangen, längere Zeit beizubehalten sind.
C anzustreben	Das optimale Ertragspotential des Standortes soll gehalten werden. Dazu ist eine Düngung in Höhe der Nährstoffabfuhr im allgemeinen ausreichend. Die Gehaltsstufe C ist so bemessen, dass die Pflanzen auch bei ungünstigen Standortbedingungen noch ausreichend versorgt werden.
D hoch	Die Nährstoffzufuhr wird nur noch in Höhe der halben Abfuhr empfohlen. Die für eine Fruchtfolge ermittelte Düngemenge wird in erster Linie zu Blatt- bzw. Hackfrüchten verabreicht.
E sehr hoch	Es kann für mehrere Jahre auf eine Düngung ganz verzichtet werden. Die sehr hohe Nährstoffversorgung soll verringert werden.

Tabelle 10.4 Empfohlene Zu- und Abschläge auf der Basis der ermittelten Gehaltsstufe des Bodens

Gehaltsstufe	P ₂ O ₅ -Düngung	K ₂ O-Düngung	
	für alle Bodenarten	leichte Böden (S-I'S)	mittlere und schwere Böden (IS-T)
A sehr niedrig	Abfuhr + 60 kg/ha	Abfuhr + 40 kg/ha	Abfuhr + 75 kg/ha
B niedrig	Abfuhr + 60 kg/ha	Abfuhr + 40 kg/ha	Abfuhr + 75 kg/ha
C anzustreben	Abfuhr	Abfuhr	Abfuhr
D hoch	1/2 Abfuhr	1/2 Abfuhr	1/2 Abfuhr
E sehr hoch	keine	keine	keine

Die Zuschläge für Kali in den Gehaltsstufen A und B sind abhängig von der Bodenart. Um Auswaschungsverluste zu minimieren, erhalten sorptionsschwache Böden gegenüber sorptionsstärkeren Böden einen verminderten Zuschlag.

Phosphat- und Kalidüngung in Höhe der Abfuhr heißt nicht, dass jeder Frucht die Düngemengen zuzumessen sind, die sie entzieht, sondern, dass die Nährstoffabfuhr über die Fruchtfolge zu ersetzen ist. Die beste Nährstoffwirkung erhält man unter Berücksichtigung einer fruchtartsspezifischen Aufteilung, d. h. Blattfrüchte mit hohem Nährstoffbedarf, aber z. T. schwächerem Nährstoffaneignungsvermögen erhalten höhere, Halmfrüchte geringere Düngemengen. Auch die Verabreichung des gesamten Nährstoffbedarfs einer Fruchtfolge in einer Gabe zur Blattfrucht ist möglich, insbesondere bei Phosphat.

Verbleiben Ernterückstände (Stroh, Blatt) auf dem Feld, bleiben die darin enthaltenen Nährstoffmengen bei der Berechnung der Düngemenge außer Betracht.

Die in den Ernteprodukten der wichtigsten landwirtschaftlichen Kulturen enthaltenen durchschnittlichen Phosphat-, Kali- und Magnesiummengen sind aus Tabelle 10.5 zu entnehmen. Sie können je nach Standort und Jahr schwanken. Die Zahlen entsprechen ca. 80 bis 90 % der tatsächlichen Nährstoffaufnahme, da während der Abreife Nährstoffabgänge über abfallende Blätter oder Verlagerung aus den Sprossorganen in die Wurzel auftreten.

Tabelle 10.5 a Durchschnittliche Phosphat-, Kali- und Magnesiummengen in Ernteprodukten.

Fruchtart	Menge dt	TS %	Nährstoffgehalt (kg/Einheit) ¹								
			P ₂ O ₅			K ₂ O			MgO		
			I	II	ges.	I	II	ges.	I	II	ges.
Weizen	10	86	8	3	11	6	14	20	2	2	4
Gerste	10	86	8	3	11	6	17	23	2	1	3
Roggen	10	86	8	3	11	6	20	26	1	2	3
Triticale	10	86	8	3	11	6	17	23	-	-	-
Hafer	10	86	8	3	11	6	20	26	2	2	4
Körnermais	10	86	8	2	10	5	20	25	2	4	6
Winterraps	10	91	18	6	24	10	40	50	5	7	12
Sonnenblumen	10	91	16	16	32	24	90	114	-	-	-
Ackerbohnen	10	86	12	3	15	14	26	40	2	3	5
Erbsen	10	86	11	3	14	14	26	40	-	-	-
Kartoffeln	100	23	14	3	17	60	10	70	4	8	12
Zuckerrüben	100	23	10	8	18	25	50	75	8	7	15
Futterrüben- Gehalt	100	15	9	3	12	50	25	75	5	5	10
Futterrüben- Massen	100	11	7	2	9	45	15	60	5	3	8
Silomais	100	28			16			45			9
Rotklee	100	21			13			60			10
Welsches Weidelgras	100	18			16			65			5
Klee gras (70 % Klee, 30 % Gras)	100	19			14			62			7

¹ I Körner, Rüben, Knollen
II zugehöriges Stroh, Blatt
ges. Gesamtpflanze

Tabelle 10.5 b Grundlagen zur Berechnung des Gesamt-Nährstoffbedarfs verschiedener Gemüsearten (nach Finck 1991).

Kultur	Marktertrag (dt/ha)				Nährstoffbedarf: kg je dt Marktertrag			
	Durchschnitt	Gültigkeitsbereich für Berechnung			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
Blumenkohl	350	200	-	400	0.75	0.30	1.00	0.10
Buschbohne	140	120	-	140	0.75	0.25	0.90	0.17
Erbsen	100	100	-	140	1.20	0.50	1.20	0.20
Feldsalat	100	80	-	120	0.50	0.20	0.75	0.22
Gurke	300	200	-	500	0.30	0.20	0.45	0.10
Kohlrabi	400	200	-	600	0.40	0.15	0.60	0.05
Möhren	350	200	-	800	0.25	0.10	0.60	0.05
(Frischware)								
Petersilie	400	300	-	500	0.25	0.10	0.30	0.05
(Schnitt)								
Porree	350	200	-	600	0.33	0.18	0.55	0.08
Rettich	200	100	-	250	0.55	0.28	0.60	0.12
Rhabarber	700	300	-	800	0.30	0.20	0.62	0.10
Rosenkohl	200	100	-	300	2.00	0.70	2.50	0.15
Kopf-/ Eissalat	400	200	-	600	0.20	0.10	0.40	0.04
Spinat	200	100	-	300	0.40	0.15	0.60	0.10
Stangenbohnen	180	120	-	300	0.90	0.21	0.70	0.20
Tomaten	400	300	-	800	0.28	0.08	0.40	0.05
Weißkohl	500	300	-	1000	0.35	0.15	0.50	0.07
Zwiebeln	300	250	-	500	0.28	0.15	0.40	0.08

Rechenbeispiel

Blumenkohl: Marktertrag 300 dt/ha,

Nährstoffbedarf pro ha: 225 kg N, 90 kg P₂O₅, 300 kg K₂O, 30 kg MgO

10.3.3 Kaliumdünger

Wichtige Kaliumdünger sind in der Tabelle 10.6 angegeben. In der Tabelle 10.7 findet sich eine Übersicht der Nährstoffgehalte in Gülle und Jauche.

Tabelle 10.6 mineralische K-Dünger.

	% K ₂ O ca.	Kaliform	Bemerkungen
Magnesia-Kainit	11	Chlorid	mit 5 % MgO, 20 % Na, 4 % S
60er Kali, „gran“	60	Chlorid	—
Korn-Kali mit 6 % MgO	40	Chlorid	mit 6 % MgO, 3 % Na, 4 % S
Kalimagnesia, Patentkali	30	Sulfat	mit 10 % MgO, 18 % S
Kaliumsulfat, „gran“	50	Sulfat	mit 18 % S

Tabelle 10.7 Nährstoffgehalte in Gülle und Jauche in kg/m³ (LUFA Oldenburg, 1992).

Art	TS %	N ges.	NH ₄ -N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO ¹	MgO	Cu
Rindergülle	6	3.0	1.7	1.5	3.9	-	0.6	0.003
	8	4.0	2.2	2.0	5.5	-	0.8	0.005
	10	5.0	2.8	2.5	6.5	-	1.0	0.008
Schweinegülle	3	2.6	1.8	1.7	1.7	-	0.5	0.012
	6	5.1	3.6	3.3	3.3	-	1.0	0.023
	9	7.7	5.4	5.0	5.0	-	1.5	0.035
Hühnergülle	7	4.3	3.0	3.2	2.5	8	0.9	0.005
	14	8.7	6.0	7.3	5.1	16	1.7	0.009
	21	13.0	9.0	9.5	7.6	24	2.6	0.014
Kälbergülle	3	3.6	2.0	1.5	4.0	-	0.6	0.003
Sauengülle	5	4.1	2.9	3.0	3.0	-	1.0	0.008
Rinderjauche	2	4.0	3.5	0.2	8.0	bei stärkerem Wasserzulauf entsprechend niedrige Gehalte		
Schweinejauche	2	5.0	4.5	0.9	3.5			

¹ in etwa anrechenbare basisch wirksame Menge