

Statens Planteavlslaboratorium (Aage Henriksen)
Afdelingen for Jordbundskemi (Jens Jensen)

Kvantitets-intensitets relationer for kalium

Quantity-intensity relations for potassium

J. Dissing Nielsen

Resumé

Kvantitets-intensitets relationen for kalium blev bestemt i 24 jorde med varierende tekstur og gødningstilstand. Jorden, der var udtaget i pløjelaget, undersøgtes såvel før som efter udpining for kalium ved dyrkning af italiensk rajgræs i pottetorsøg.

Før udpining varierede jordenes kaliumintensitet stærkt, og ved samme Kt fandtes højere intensitet i sandjordene end i lerjordene.

Ved undersøgelse af jordene efter udpining fandtes, at de alle var blevet udpint til omtrent samme minimumsintensitet ($\Delta G_{K,Ca,Mg} = -4000$ kal/ækv.), hvilket også fandtes i den ikke-kaliumgødede jord fra det gamle gødningsforsøg ved Askov.

PBC^K, der var større i lerjorde end i sandjorde, blev ikke ændret på grund af udpiningen.

Indledning

For at vurdere en jords evne til at forsyne planterne med et næringsstof er det nødvendigt at kende såvel dets intensitet i jorden som dens evne til at vedligeholde intensiteten, når planterne optager næringsstoffet fra jorden. Dette er analogt med, at man i elektricitetslæren karakteriserer en strøm ved såvel dens spænding (volt) som ved dens mængde (amp.).

De hidtil anvendte metoder til karakterisering af jordens næringstilstand har overvejende været baseret på forskellige ekstraktionsanalyser, hvis værdi er bedømt ud fra korrelationen med gødningsvirkningen. Det er klart, at sådanne empi-

riske kvantitative analysemetoder kun giver et usikkert grundlag for vurdering af jordens gødningstilstand, idet frigørelshastigheden af næringsstofferne i høj grad er bestemmende for, om planterne kan ernæres tilfredsstillende.

Planternes optagelse af et næringsstof er altid bestemt af den momentane intensitet for det pågældende plantenæringsstof, men det er kun ved dyrkning i vandkulturer, at det er muligt at holde intensiteten af næringsstoffer konstant. I jorden er der altid i forbindelse med planternes optagelse af næringsstof en intensitetsnedsættelse, hvis størrelse er bestemt af jordtypen.

Intensiteten af en ion i en opløsning kan måles ved aktiviteten, der i fortyndede opløsninger svarer til koncentrationen. Denne fremgangsmåde har imidlertid den ulempe for opløsninger i ligevægt med jord, at deres elektrolytkoncentration i ligevægt med de ladede jordpartikler påvirker koncentrationen og dermed aktiviteten af de enkelte ioner. Aktivitetsforholdet er imidlertid for visse ioner uafhængigt af elektrolytkoncentrationen.

Det gælder således kaliumintensiteten = $aK/\sqrt{aCa + aMg}$ (Schofield, 1947), calciumpotentialet = $pH - 1/2 pCa$ og fosfatpotentialet = $1/2 pCa + pH_2PO_4$ (Aslyng, 1954). Tilgængeligheden eller intensiteten af kalium i en opløsning i ligevægt med jord kan således måles ved aktivitetsforholdet $AR^K = aK/\sqrt{aCa + aMg}$.

Ved dyrkning af planter i jord optager de kalium fra jordvædsken, hvis intensitet delvis opretholdes ved at ombytteligt kalium udveksles

med andre kationer. For systemet vandopløseligt-ombytteligt kalium udgør det vandopløselige kun en lille fraktion, mindre end 5 pct. af den ombyttelige. For at kunne angive tilgængeligheden af jordens kalium er det derfor nødvendigt at kende intensiteten af det ombyttelige kalium. Ved måling af denne udnyttes det, at forholdet mellem aktiviteterne af 2 kationer i en opløsning i ligevægt med en ionbytter er det samme som forholdet mellem aktiviteten af de 2 ioner på ombyttelig form (The Ratio Law, *Schofield*, 1947). Dette gælder kun, når der er ligevægt for de 2 kationer. Under naturlige forhold er jorden sjældent i ligevægt, og der opstår i umiddelbar nærhed af rødderne et potentialfald, som udlignes ved diffusion fra steder med et højere potential. Det er således et gennemsnitspotential, man måler i en jordprøve. Ved måling af jordens kaliumintensitet bestemmer man koncentrationen af kalium, calcium og magnesium i en opløsning i ligevægt med jorden, hvorefter aktiviteterne og $aK/\sqrt{aCa + aMg}$ kan beregnes.

Calcium og magnesium udgør størstedelen af jordens ombyttelige kationer, som kan ombyttes med kaliumioner. Det er derfor bekvemt at behandle calcium og magnesium som én ion og benytte det sammensatte forhold $aK/\sqrt{aCa + aMg}$ (*Beckett*, 1964 a).

Kaliumintensiteten udtrykkes hyppigt ved logaritmen til aktiviteten af kalium, calcium og magnesium: $\ln aK/\sqrt{aCa + aMg}$ eller $G = K \log aK/\sqrt{aCa + aMg}$, hvor G måles i kal. pr. ækv. Kaliumintensiteten for en jord i ligevægt med en opløsning kan således angives med en fysisk energistørrelse, der i fortyndede opløsninger er uafhængig af sammensætningen og koncentrationen (*Woodruff*, 1955).

For en opløsning af en elektrolyt i ligevægt med jord er den frie energi af en ion, der frit kan diffundere, den samme i alle dele af systemet. Den frie energi af en ion i jordkomplekset kan derfor bestemmes ved at analysere jordvædsken.

Potentialet af en ion defineres som forskellen mellem den frie energi i den aktuelle tilstand og en hypotetisk standardtilstand. Den molære frie energi af en ion M ved aktiviteten a er $G = G^0_M + RT \ln a_M$,

hvor G^0 er kal. pr. ækv. i standardtilstanden, R gaskonstanten og T den absolutte temperatur. Ændringen i fri energi ved overførsel fra standardtilstand til en opløsning med aktiviteten a er givet ved $\Delta G = RT \ln a_M$ og for en divalent ion f.eks. Ca ved $\Delta G_{Ca} = \frac{1}{2} RT \ln a_{Ca}$.

Man får da ved overførsel af K fra standardtilstanden til opløsningen og Ca i den modsatte retning $\Delta G_{K,Ca} = RT \ln aK/\sqrt{aCa}$ og for overførsel af Ca fra standardtilstanden og K i den modsatte retning $\Delta G_{Ca,K} = RT \ln \sqrt{aCa}/aK$.

Energiændringen angives i kal. pr. ækv., og negative værdier betyder, at reaktionen fra standardtilstanden til opløsningen (jorden) forløber spontant. Positive værdier angiver, at reaktionen forløber i den modsatte retning. Ved at anvende den negative logaritme til K - og Ca -aktiviteten fås $\Delta G_{K,Ca} = 2,303 RT(\frac{1}{2} pCa - pK)$, der svarer til calciumpotentialet og fosfatpotentialet (*Aslyng*, 1954).

Intensiteten for et næringsstof er således et udtryk for jordens øjeblikkelige tilstand, men derudover behøves der en kvantitets (kapacitets) faktor for at kunne vurdere jordens evne til at vedligeholde intensiteten gennem en vækstsæson. Jorde med samme intensitet har oftest forskellig evne til at vedligeholde intensiteten, når planterne i løbet af vækstsæsonen optager næringsstoffer fra jordvæksten.

Beckett (1964 b) anvendte ved kaliummålinger kvantitets-intensitets relationen Q/I som udtryk for kvantitetsfaktoren. Q er kaliummængden, og I er $aK/\sqrt{aCa + aMg}$. Q/I angiver forholdet mellem kvantitet og intensitet ved tilsætning af stigende mængder kalium.

Kvantitets-intensitets relationer for kalium fremstilles ofte i diagrammer med $AR^K = aK/\sqrt{aCa + aMg}/\sqrt{M/I}$ som abscisse og frigørelsen eller optagelsen ΔK mækv./100 g jord som ordinat. Q/I får da enheden $\frac{\text{mækv./100 g jord}}{\sqrt{M/I}}$.

I fig. 1 er vist Q/I relationen for 2 jorde fra gødningsforsøgene på Askov lermark henholdsvis med og uden kalium. Formen af kurverne er karakteristisk for alle jorde. Den består af en retlinjet øverste del og en nedre del, som asymptotisk nærmer sig ordinataksen. Ved $\Delta K = 0$ er jorden i ligevægt, således at der hverken o_p tages

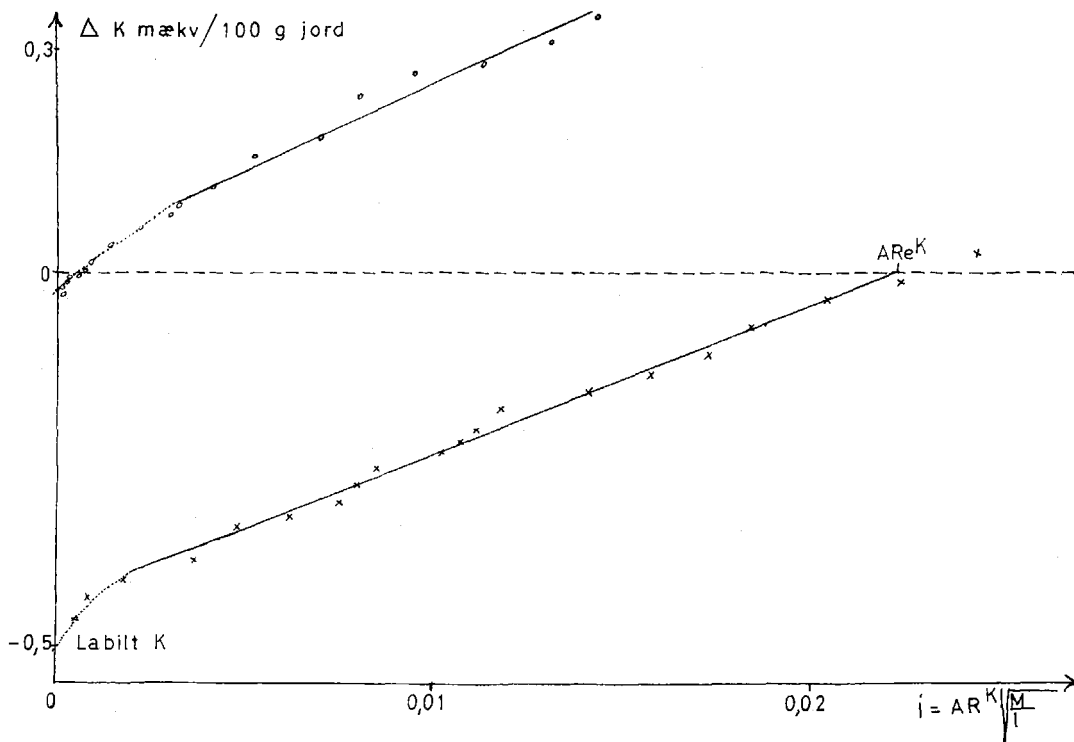


Fig. 1. Kvantitets-intensitets målinger for kalium i 2 jorde fra Askov lermark.
(Quantity-intensity relations of potassium in two soils from Askov).

○—○ Ingen kalium siden 1894
(Without potassium since 1894)

x—x Gødet med kalium
(Fertilized with potassium)

eller frigøres kalium. Intensiteten, I , ved $\Delta K = 0$ kaldes ARe^K (The activity ratio equilibrium). Hældningen for den retlinjede del af Q/I relationen kaldes PBC^K (Potential buffering capacity), der angiver mængden af kalium, som frigøres eller fikseres ved ændringer af intensiteten. Den retlinjede del af Q/I relationen gælder for kalium, som let ombyttes med calcium og magnesium. Ved lave værdier for I frigøres der kalium fra pladser på jordpartiklerne, hvor det ikke normalt er ombytteligt med andre kationer, og derfor bliver Q/I relationen asymptotisk til ordinataksen.

Ved bedømmelse af jordens kaliumdynamik indenfor en vækstsæson er det især den ombyttelige fraktion og dens intensitet, som er afgørende, medens frigørelsen af ikke-ombytteligt kalium foregår langsomt og især har betydning for jordens kaliumtilstand over en længere årrække.

Målinger af Q/I relationen for kalium i en jord giver således flere oplysninger om dens kaliumtilstand end en ekstraktionsanalyse. Det er derfor betydningsfuldt at få et kendskab til disse relationer for de mest almindeligt forekommende jordtyper i Danmark. Med henblik herpå udvalgte 21 prøver fra jordarkivet til undersøgelsen, alle udtaget i 0-20 cm dybde.

Ved potteforsøg undersøgte sammenhængen mellem resultaterne af jordanalyser og planternes optagelse ved udpining af jorden for kalium ved dyrkning af ital. rajgræs (Lind, 1971). Disse kaliumudpinte jorde indgik i undersøgelsen, og der blev foretaget en sammenligning af kalium- Q/I relationen før og efter udpiningen. Derved var det muligt at vurdere sammenhængen mellem forskellige indekser for Q/I relationen og planternes optagelse af kalium.

Frengangsmåde

Før analysering blev alle prøverne lufttørret, knust, sigtet gennem 2 mm sigte og blandet.

Der afvejes 1-5 g jord i 250 ml flasker, som tilsættes 50 ml af opløsninger af KCl ($0 \cdot 10^{-3} M$) i $CaCl_2$ ($2/0^{-3} M$). Flaskerne stilles i vandbad ved $25^\circ C$, og der rystes 2 til 3 gange under ækvilibreringstiden. Efter ækvilibreringen mellem jord og opløsning, som var opnået inden for 16 timer, filtreres den ovenstående opløsning, og filtratet analyseres for K ved flammefotometri og for Ca og Mg ved atomabsorption.

$AR^K = aK / \sqrt{aCa + aMg} / \sqrt{M/l}$ beregnes for hver ligevægt mellem jord og opløsning ud fra $cK / \sqrt{cCa + cMg}$ i filtratet ved multiplikation med en aktivitetskoefficient, $F = fK / \sqrt{fCa + fMg}$, for opløsninger af KCl, $CaCl_2$ og $MgCl_2$ (Beckett, 1965).

ΔK mækv./100 g jord beregnes ud fra forskellen mellem tilsat K og K i opløsningen efter ækvilibreringen med jorden.

$PBC^K \frac{\text{mækv./100 g jord}}{\sqrt{M/l}}$ bestemmes ved hældningen af den retlinjede del af relationen mellem AR^K og ΔK .

Labilt K mækv./100 g jord bestemmes ved ekstrapolation af $\Delta K / AR^K$ relationen til $AR^K = 0$.

ARe^K bestemmes ved ekstrapolation og angiver, at jorden hverken har optaget eller frigjort K ($\Delta K = 0$).

$\Delta G_{K,Ca,Mg}$ kal/ækv. beregnes som $4,5765 \times T \times \log. ARe^K$, hvor T er temperaturen målt i Kelvin grader.

Relationen mellem $aK / \sqrt{aCa + aMg}$ og ΔK er for hver jord fastlagt ved 14 til 20 punkter; og et eks. er vist i fig. 1.

Ved kaliumudpinningsforsøget var jorderne fortyndet med rent sand. The ratio law (Schofield, 1947) angiver, at kaliumintensiteten er uafhængig af forholdet jord: vand eller jord:sand. Det sidste blev efterprøvet ved at bestemme relationen mellem ARe^K og ΔK i jordprøver henholdsvis med og uden tilsætning af sand. Kaliumindeksene var de samme, når de blev beregnet pr. 100 g jord, uanset mængden af iblandet sand.

Resultater

Fig. 1 viser relationerne mellem AR^K og ΔK for 2 jorde fra de gamle gødningsforsøg på Askov lermark. Den kaliumgødede jord er tilført $1\frac{1}{2}$ kunstgødning, medens det ikke-kaliumgødede forsøgsled er tilført 1 kvælstof og 1 fosfor (Iversen og Dorph-Petersen, 1954), og forsøgsbehandlingen er startet i 1894. ARe^K er for den kaliumgødede jord (tabel 1) $0,0230 \sqrt{M/l}$ eller $\Delta G_{K,Ca,Mg} = -2200$ kal/ækv. og $0,0008 \sqrt{M/l}$ eller -4200 kal/ækv. for jorden, der ikke er tilført kalium. Woodruff, 1955, angiver, at $\Delta G_{K,Ca,Mg}$ fra -4000 til -3500 kal/ækv. er forbundet med kaliummangel hos de fleste planter. Kaliumintensiteten er optimal ved potentialer fra -3000 til -2000 kal/ækv., og mere end -2000 kal/ækv. angiver overmål af kalium overfor calcium. Barrow, 1967, finder, at kaliumpotentialet i jorden efter fuldstændig udpining ved planteekstraktion er omkring -4000 kal/ækv. for jorde med PBC^K fra 5 til 10 og fra -4000 til -5000 i jorde med PBC^K fra 10 til 50.

Kaliumoptagelsen fra opløsninger med konstant koncentration ophører for de fleste plantearter ved -6000 kal/ækv. og stiger proportionalt med $\Delta G_{K,Ca,Mg}$ (Barrow, 1967).

Jorden fra det kaliumgødede forsøgsled på Askov lermark må således antages at have et kaliumpotential i optimalområdet, medens potentialet for jorden uden kalium ligger i minimalområdet, hvor afgrøderne kun fjerner en mængde, der svarer til frigørelsen af ikke-ombytteligt kalium.

PBC^K er den samme for de 2 forsøgsled, og det større høstudbytte og indhold af humus i det kaliumgødede forsøgsled har ikke påvirket jordens PBC^K .

Udpiningen har reduceret jordens indhold af labilt kalium (tabel 1) fra 0,50 til 0,05 mækv./100 g jord, dvs. 17 Kt enheder ($25 \times 17 = 425$ kg/ha).

I fig. 2 er vist et eksempel med 3 jorde, som har omtrent det samme Kt men forskellige indeks for ARe^K . Sammenlignet med den svære lermark fra Abed har sandjorden fra Lundgaard en langt højere kaliumintensitet, og den er derfor en bedre kaliumforsyner for afgrøderne, især i den første del af vækstperioden. Sandjorden har en ringe

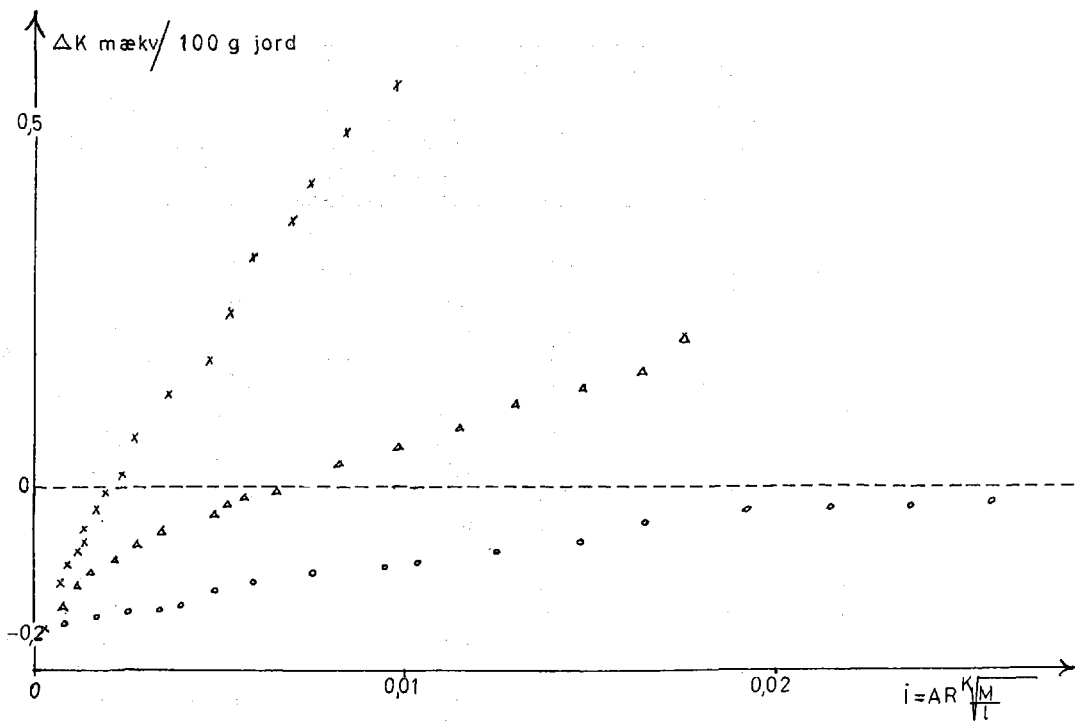


Fig. 2. Kvantitets-intensitets målinger for kalium i 3 jorde med samme Kt.
(Quantity-intensity relations of potassium in three soils with the same content of NH_4^+ -exchangeable K (Kt)).

x——x 5a, Abed (heavy clay) Kt = 8
 Δ——Δ 49a, Askov lermark (clay) Kt = 7
 o——o 52a, Lundgaard (sand) Kt = 9

PBC^K, og dens intensitet falder derfor ret hurtigt. Den er i sandjorden og i lerjorden fra Askov i optimalområdet, medens den for den svære lerjord er i det minimalområde, hvor der er risiko for kaliummangel (Woodruff, 1955), (Barrow, 1967). Det er intensiteten, som har betydning ved en vurdering af jordens kaliumtilstand over et kort tidsrum (f.eks. spiringen eller frugtsætningen), hvor der kun optages små mængder. Jordens evne til at vedligeholde kaliumintensiteten må tages med i betragtning ved vurdering af kaliumtilstanden for en hel vækstsæson.

Det fremgår af fig. 2, at intensitetsfaldet ved planternes kaliumoptagelse er lille i lerjorde (stor PBC^K) modsat sandjorde (lille PBC^K).

Den svære lerjord er bedre end sandjorden i stand til at afgive kalium til planterne under en

udpining, fordi lerjorden ofte har et stort indhold af ikke-ombytteligt syreopløseligt kalium (Dissing Nielsen, 1970), der ved negativ kaliumbalance kan frigøres og udnyttes af planterne. Jordens indhold af syreopløseligt men ikke-ombytteligt kalium har ingen betydning for kaliumintensiteten, der alene er et udtryk for tilgængeligheden af ombytteligt kalium. Under normale dyrkningsforhold, hvor jorden ikke udpines for kalium, vil sandjorde ved det samme Kt således være en bedre kaliumdonor end lerjorde.

Q/I relationen blev bestemt i muldlaget (0-20 cm) fra 24 jorde fra forskellige lokaliteter og med varierende tekstur og gødningstilstand. De fleste af lerjordene og en enkelt af sandjordene er tidligere undersøgt for deres fiksering og frigørelse af kalium (Dissing Nielsen, 1970).

Table 1. Kvantitet og intensitet af kalium i forskellige jorde
(Quantity and intensity of potassium in soils)

Lokalitet <i>Locality</i>	Nr. <i>No.</i>	Før udpining <i>Before exhaustion</i>			mækv./100 g jord <i>meq/100 g soil</i>			Efter udpining <i>After exhaustion</i>		
		ARe ^K	$\Delta G_{K, Ca, Mg}$	PBC ^K	ARe ^K × PBC ^K	Labilt K <i>Labile K</i>	Omregnet Kt <i>NH₄⁺-ex- changeable K</i>	ARe ^K	$\Delta G_{K, Ca, Mg}$	PBC ^K
Aarslev.....	1a	0,0157	-2500	21	0,33	0,53	0,54	0,0006	-4400	21
Abed.....	5a	0,0020	-3700	68	0,14	0,27	0,22	0,0011	-4000	63
Blangstedgaard.	6a	0,0032	-3400	41	0,13	0,17	0,20	0,0014	-3900	41
Borris.....	10a	0,0043	-3200	10	0,04	0,13	0,10	0,0011	-4000	6
Hørnum.....	16a	0,0349	-2100	8	0,29	0,38	0,41	0,0010	-4100	10
Højer.....	17a	0,0071	-2900	43	0,31	0,37	0,44	0,0017	-3800	46
Jyndevad.....	19a	0,0539	-1700	4	0,21	0,38	0,29	0,0014	-3900	6
Roskilde.....	20a	0,0147	-2500	19	0,28	0,43	0,46	0,0012	-4000	24
Spangsbjerg....	21a	0,0269	-2100	10	0,27	0,50	0,45	0,0009	-4200	10
Studsgaard....	29a	0,0533	-1700	8	0,43	0,56	0,63	0,0010	-4100	8
Tylstrup.....	33a	0,0106	-2700	10	0,10	0,13	0,13	0,0006	-4400	9
Tystofte.....	34a	0,0052	-3100	26	0,13	0,20	0,23	0,0016	-3800	33
Silstrup.....	37a	0,0095	-2900	39	0,37	0,45	0,45	0,0009	-4200	42
Virumgaard....	39a	0,0113	-2700	22	0,25	0,35	0,43	0,0011	-4100	24
Ødum.....	40a	0,0069	-2900	33	0,23	0,43	0,33	0,0010	-4100	35
Ribe.....	46a	0,0037	-3300	81	0,30	0,40	0,51	0,0016	-3800	67
Askov lermark .	49a	0,0068	-3000	18	0,12	0,23	0,21	0,0009	-4200	24
Askov sandmark	51a	0,0131	-2600	7	0,09	0,16	0,12	0,0007	-4300	11
Lundgaard.....	52a	0,0281	-2100	6	0,17	0,21	0,21	0,0008	-4300	8
Montmorillonit.	24	0,0027	-3500	279	0,75	0,81	1,38	0,0006	-4400	249
Aarslev.....	3a	0,0013	-4000	23	0,03	0,11	0,11			
Blangstedgaard.	7a	0,0106	-2100	46	0,49	0,55	0,65			
Askov lermark .	- K	0,0008	-4200	22	0,02	0,05	0,05			
Askov lermark .	+ K	0,0230	-2200	20	0,46	0,50	0,30			

Undersøgelsens resultater er vist i tabel 1. Kaliumintensiteten, udtrykt enten ved ARe^K eller $\Delta G_{K, Ca, Mg}$, varierer meget fra den ene jord til den anden, og den er gennemgående mindre i lerjorde end i sandjorde. På grund af den høje PBC^K optræder der sjældent kaliummangel på lerjordene, selv om deres intensitet ligger i nærheden af minimumsområdet. $\Delta G_{K, Ca, Mg}$ ligger for de fleste jorde i optimumsområdet fra -3000 til -2000 kal./ækv., men i 2 af jordene (19a og 29a) er der overmål af kalium i forhold til calcium og magnesium ($\Delta G_{K, Ca, Mg} > -2000$ kal./ækv.).

I modsætning til kaliumintensiteten er PBC^K høj i lerjorde, og de kan derfor levere mere kalium til planterne, før jordens intensitet falder.

Til gengæld skal der gødes med større mængder, før intensiteten stiger. Jorden fra Abed, 5a, med $\Delta G_{K, Ca, Mg} = -3700$ kal./ækv. (ARe^K = 0,0020 $\sqrt{M/l}$) og PBC^K 68 skal gødes med ca. 550 kg kalium pr. ha for at hæve intensiteten til $\Delta G_{K, Ca, Mg} = -2600$ kal./ækv. (ARe^K = 0,0100 $\sqrt{M/l}$). For sandjordene er PBC^K lille, og planternes kaliumoptagelse vil hurtigt resultere i et fald i intensiteten, medens tilførsel af beskedne kaliummængder bevirker en kraftig stigning i intensiteten. I sandjorden fra Lundgaard, 52a, vil en afgrødes optagelse af 100 kg kalium pr. ha således bevirke, at intensiteten falder fra $\Delta G_{K, Ca, Mg} = -2100$ (ARe^K = 0,0281) til $\Delta G_{K, Ca, Mg} = -2600$ kal./ækv. (ARe^K = 0,0130 $\sqrt{M/l}$).

Tabel 2. Korrelation mellem tørstofudbytte, kaliumoptagelse, procent kalium i tørstof og jordens kaliumintensitet og -kvantitet

(Correlation between dry matter yield, uptake of potassium, per cent K in dry matter, and quantity and intensity of potassium in soils)

	Slæt		$\Delta G_{K, Ca, Mg}$	PBC ^K	ARe ^K × PBC ^K	Labilt K
	Harvest	ARe ^K				
Tørstof	1.	0,47 ¹	-0,59 ²	-0,45 ¹	0,58 ²	0,53 ²
Dry matter	1.+2.	0,42	-0,49 ¹	-0,24	0,66 ²	0,63 ²
	1.—5.	0,28	-0,33	-0,03	0,63 ²	0,60 ²
K optaget	1.	0,66 ²	-0,70 ³	-0,35	0,93 ³	0,95 ³
K uptake	1.+2.	0,63 ²	-0,67 ³	-0,32	0,92 ³	0,91 ³
	1.—5.	0,58 ²	-0,62 ²	-0,26	0,89 ³	0,83 ³
% K i tørstof	1.	0,65 ²	-0,68 ³	-0,37	0,89 ³	0,85 ³
Per cent K in dry matter						
ARe ^K				-0,57 ²	0,76 ³	0,75 ³
$\Delta G_{K, Ca, Mg}$				0,74 ³	0,74 ³	-0,75 ³
PBC ^K					-0,23	0,25
ARe ^K × PBC ^K						0,97 ³

18 frihedsgrader (18 degrees of freedom)

1 = P (95) R = 0,44

2 = P (99) R = 0,56

3 = P (99,9) R = 0,68

Ved disse beregninger af gødskningens og optagelsens indflydelse på intensiteten er der ikke taget hensyn til frigørelse af ikke-ombytteligt kalium eller kaliumoptagelse fra undergrunden.

En uheldig kombination vil det være, hvis såvel intensiteten som kvantiteten er lille. Dette forekommer i jordene 3a og 10a, som også gav et særdeles lille udbytte af såvel tørstof som kalium ved potteforsøget.

Det fremgår af tabel 1, at Kt omregnet til mækv. og indholdet af labilt kalium i jordprøverne er næsten ens.

Nogle jorde klassificeres forskelligt som kaliumdonorer ved vurdering efter intensitet eller labilt kalium og Kt. Dette gælder således 5a med lille kaliumintensitet og normalt Kt, 46a med lille kaliumintensitet og højt Kt og 33a normal intensitet og lavt Kt.

Kaliumintensiteten såvel som Kt er dog utilstrækkelige ved vurdering af jordens værdi som kaliumforsyner.

Kurverne i fig. 1 og 2 viser, at relationen mellem intensiteten udtrykt ved AR^K og kvantiteten ΔK er retlinjet omkring ARe^K, dvs. det område hvor man normalt gøder. Ingen af jordene var afvigende i dette forhold, og fikseringen eller frigørelsen af kalium ved ændringer i intensiteten kan derfor beregnes, $\Delta K = PBC^K \times \Delta AR^K$. PBC^K × ARe^K, som var signifikant korreleret med planternes kaliumoptagelse i potteforsøget, er også anvendt ved vurdering af jordens evne som kaliumdonor.

I jordene fra potteforsøget med udpining for kalium ved ekstraktion med ital. rajgræs blev kaliumintensiteten og PBC^K-indekset bestemt såvel før som efter udpining. Resultaterne af de kemiske analysemetoder til vurdering af jordens kaliumtilstand er sammenlignet med tørstofudbyttet og planternes optagelse af kalium. Ved det første slæt var kaliumoptagelsen 60 pct. af den samlede optagelse, og der blev høstet ialt 5 slæt med ca. 4 ugers mellemrum.

Tabel 2 viser, at der kun er ringe sammenhæng mellem tørstofudbytte og de forskellige indeks for kalium såvel ved det første som ved de følgende slæt.

Derimod er såvel kaliumoptagelsen som pct. kalium i tørstof korreleret med de fleste af kalium-indeksene fra den kemiske analyse, og sammenhængen er omtrent den samme for begge værdier.

Korrelationen mellem kaliumintensiteten ved forsøgets start, udtrykt ved $\Delta G_{K,Ca,Mg}$ og kaliumoptagelsen er stærkest i den første del af vækstperioden, og aftager efterhånden, som jorden bliver udpint for ombytteligt kalium. Det samme gælder for intensitetsfaktoren ARe^K , som dog er svagere korreleret med kaliumoptagelsen end $\Delta G_{K,Ca,Mg}$.

Kvantitetsfaktoren PBC^K alene giver kun få oplysninger om jordens værdi som kaliumdonor, og ved de 2 første slæt er korrelationskoefficienten mellem kaliumoptagelsen og PBC^K negativ. Dette skyldes muligvis, at intensiteten er negativt korreleret med PBC^K , medens den er positivt korreleret med kaliumoptagelsen. Korrelationskoefficienten mellem PBC^K og kaliumoptagelsen er størst ved de sidste slæt, hvor planterne optager en del kalium fra de syreopløselige ikke-ombyttelige reserver.

Det bedste udtryk for sammenhængen mellem de kemiske indeks for kalium og planternes optagelse blev opnået ved at anvende såvel ARe^K som PBC^K ved vurdering af jordens kaliumtilstand. I tabel 1 er det sammensatte udtryk for intensitet og kvantitet dannet ved multiplikation af ARe^K og PBC^K . Det fremgår af tabel 2, at der er en stærkt signifikant korrelation mellem såvel kaliumoptagelsen som procent kalium i tørstof og produktet af ARe^K og PBC^K . $ARe^K \times PBC^K$ var således et udmærket indeks for jordens evne til at forsyne planterne med kalium, under disse specielle forhold (pottforsøg, stærk udpining for kalium og overskud af andre næringsioner).

Barrow (1966) fandt ved pottforsøg signifikant korrelation mellem kaliumoptagelse hos hvidkløver og kaliumindekset $\Delta G_{K,Ca,Mg} \times \log. PBC^K$.

Det labile kalium er en kvantitetsfaktor, der er analog med og i størrelse svarer til Kt . Korrela-

tionen mellem det labile kalium i jorden ved forsøgets start og kaliumoptagelsen var signifikant under hele væksten, og koefficienten er af samme størrelse som mellem optagelse og $ARe^K \times PBC^K$. Det labile kalium såvel som Kt (*Lind*, 1971) var således en udmærket indikator for kaliumoptagelsen ved udpining af jorden for kalium. Under markforhold, hvor jorden sjældent udtømmes så stærkt for kalium, kan det tænkes, at indeksene for det lettest tilgængelige kalium $\Delta G_{K,Ca,Mg}$, ARe^K eller $ARe^K \times PBC^K$ er et bedre udtryk for jordens kaliumtilstand end det labile kalium eller Kt .

Udpiningsforsøget blev afsluttet, da jordene var næsten udtømt for labilt kalium. Planternes vækst var da helt standset eller stærkt hæmmet. I den sidste afgrøde var der kaliummangelsymptomer i en del forsøgsled i overensstemmelse med, at $\Delta G_{K,Ca,Mg}$ er i minimumsområdet for de fleste jorde.

Det fremgår af tabel 1, at $\Delta G_{K,Ca,Mg}$ er næsten ens for alle jordene efter udpiningen, selv om deres kaliumintensitet var meget forskellig ved forsøgets start. Udpiningsforsøget viser således, at planterne (ital. rajgræs) optager kalium indtil intensiteten er reduceret til en minimumsstørrelse, som er næsten ens for alle jorde. Lignende forhold fandtes for hvidkløver af *Barrow et. al.* (1967), som dog angiver, at udpiningsniveauet afhænger af PBC^K . $\Delta G_{K,Ca,Mg}$ var for kaliumudpinte jorde med PBC^K mellem 5 og 50 fra -4000 til -5000 kal/ækv. og mindst for jorde med høj PBC^K .

Modsat kaliumintensiteten har kvantitetsfaktoren PBC^K været næsten den samme før og efter udpiningen, og variationen ligger inden for fejlgrænsen. Dette betyder, at kaliumintensiteten i jorden efter gødskning kan beregnes uanset jordens udpining, når man kender PBC^K .

De udpinte jorde blev opbevaret lufttørret, og nogle blev undersøgt igen efter 2 måneders opbevaring. Såvel kaliumintensiteten som PBC^K forblev uændret, og der var ingen målelig frigørelse af ikke-ombyttelige kaliumreserver ved opbevaringen. *Beckett et. al.* (1966) fandt, at der ved ovtørring af kaliumudpinte jorde frigøres ikke-ombytteligt kalium, og ARe^K ændres i retning af

større kaliumintensitet, medens PBC^K forbliver konstant. Under naturlige forhold vil betingelserne for kaliumfrigørelse være helt anderledes på grund af biologiske og klimatiske påvirkninger.

Konklusion

For alle plantenæringsstoffer, som optages fra jorden, gælder, at der er en sammenhæng mellem mængden af næringsstoffet Q og dets intensitet I. Denne sammenhæng, Q/I relationen, er karakteristisk for hvert plantenæringsstof og hver jord.

Da fosfor- og kaliumoptagelsen ofte er begrænsende faktorer for planteproduktionen, og da den kemiske analyse for disse 2 plantenæringsstoffer er ret hurtig, er Q/I relationer mest anvendt ved undersøgelser af jordens fosfor- og kaliumdynamik.

For de fleste mikronæringsstoffer er den kemiske analyse ret arbejdskrævende, og til praktiske formål bliver det kostbart med adskillige analyser for hver jord. Det må dog antages, at en jords intensitet af et mikronæringsstof er mere væsentlig for planterne end kvantiteten, idet der kun optages små mængder. Lamm (1969) undersøgte Q/I relationen for mangan og fandt, at intensiteten var stærkt faldende ved kalkning af jorden.

Resultaterne af denne undersøgelse af forskellige jordtyper viser, at bestemmelse af Q/I relationen for kalium giver en række vigtige oplysninger om de pågældende jordens evne til at forsyne planterne med kalium.

1. En intensitetsfaktor ($ARE^K \sim \Delta G_{K, Ca, Mg}$), som udtrykker den momentane kaliumintensitet i jordvædsken.
2. En kapacitetsfaktor (PBC^K), som udtrykker jordens evne til at vedligeholde intensiteten, når planterne optager kalium.
3. En kvantitetsfaktor (labilt kalium), der er analog med Kt.

Q og I måles i absolutte enheder, og de kan derfor sammenlignes for forskellige jorde.

Kender man Q/I relationen for en jord, kan man ved de senere målinger nøjes med 2 punkter (2 analyser for hver jordprøve), idet PBC^K for-

bliver konstant såvel ved udpining som ved gødskning med kalium.

I praksis er Q/I relationer hidtil kun anvendt i ringe omfang, idet deres fastlægning kræver et omfattende analyserings- og beregningsarbejde for hver enkelt jord. Det må dog antages, at kendskabet til Q/I relationerne for de forskellige jordtyper vil kunne udnyttes ved den praktiske planlægning af gødskningen. Ved forsøg, hvori der indgår et plantenæringsstof, vil kendskab til dets Q/I relation i jorden altid være værdifuldt ved såvel planlægningen som tydingen af forsøgsresultaterne.

Summary

Quantity-Intensity relations of potassium

The quantity-intensity relations (Q/I) of potassium were estimated in the surface profile of typical Danish soils. In field experiments where the soil was exhausted of potassium during 70 years of cropping, the intensity $I = ARE^K$ or $\Delta G_{K, Ca, Mg}$ was reduced to a minimum value of $\Delta G_{K, Ca, Mg} = -4000$ cal/equiv., and further potassium uptake was restricted to the non-exchangeable reserves. The K-intensity of normal Danish surface soils at the same level of exchangeable potassium was higher in sand soils than in clay soils, opposite to the capacity (PBC^K). Early in the growth season the sand soils are therefore considered to be better apt to supply potassium to the crops in comparison with the clay soils which are better able to maintain the intensity during the removal of potassium by the plants. In general the investigated soils showed large differences in K-intensity as well as K-capacity.

Pot experiments were carried out in order to exhaust the soils of potassium (Lind 1971, in the press), and Q/I relations were estimated before and after the experiment. The results showed that the original intensity (but not the capacity) was significantly related to the uptake of potassium and its concentration in the plant material. The highest correlations were obtained by relating the product $PBC^K \times ARE^K$ to the amount of potassium taken up by the plants. Also the quantity factor labile K showed good correlation with potassium uptake. The intensity was reduced to a minimum value which was approximately the same in all the investigated soils, even though they differed widely in intensity before the experiments. The capacity factor was not altered through the exhaustion, and the liberation and fixation of potassium in soils

at a stage of equilibrium soils may therefore be calculated as $\Delta K = PBC^K \times \Delta AR^K$.

Informations about the Q/I relations of some typical soils will be valuable in the practical use of fertilizers. In the planning and in the interpretation of results of field experiments concerning plant nutrition, information about the Q/I relations of the soils in question will always be of value.

Litteratur

- Aslyng, H. C.* (1954). – The lime and phosphate potential of soils, the solubility and availability of phosphates. Kgl. Vet. Landbohøjskoles Årsskrift, 1954, 1–50.
- Barrow, N. J.* (1966). – Nutrient potential and capacity. II. Relationship between potassium potential and buffering capacity and the supply of potassium to plants. Austr. Journ. of Agric. Research, 17, 849–862.
- Barrow, N. J., Asher, C. J. & Ozanne, P. G.* (1967). – Nutrient potential and capacity. III. Minimum value of potassium potential for availability to »Trifolium Subterraneum« in soil and solution culture. Austr. Journ. of Agric. Research, 18, 55–62.
- Beckett, P. H. T.* (1964 a). – Studies on soil potassium. I. Confirmation of the ratio law: measurement of potassium potential. The Journ. of Soil Sci., 15, 1–8.
- Beckett, P. H. T.* (1964 b). – Studies on soil potassium. II. The immediate Q/I relations of labile potassium in the soil. The Journ. of Soil Sci., 15, 9–23.
- Beckett, P. H. T.* (1965). – Activity coefficients for studies on soil potassium. Agrochemica, IX, 2, 150–154.
- Beckett, P. H. T., Craig, J. B., Nafady, M. H. M. & Watson, J. P.* (1966). – Studies in soil potassium. V. The stability of Q/I relations. Plant and Soil, XXV, 435–455.
- Iversen, K. og Dorph-Petersen, K.* (1951). – Forsøg med staldgødning og kunstgødning ved Askov 1894–1948. Tidsskrift for Planteavl, 54, 369–538.
- Lamm, C. G., Tjell, J. Chr., Møller, O. & Christiansen, T. F.* (1969). – Nutrient availability in soils. II. Quantity-intensity relationships of phosphorus and manganese as influenced by soil pH. Acta Agriculturae Scandinavica, XIX, 135–141.
- Lind, A. M.* (1971). – Planters optagelse af kalium og kaliumanalyser af jord. Tidsskrift for Planteavl (under trykning).
- Nielsen, J. Dissing* (1970). – Fiksering og frigørelse af kalium. Tidsskrift for Planteavl, 74, 24–43.
- Schofield, R. K.* (1947). – A ratio law governing the equilibrium of cations in the soil solution. Proc. 11th Int. Congr. Pure and Appl. Chem., 3, 257–261.
- Woodruff, C. M.* (1955). – The energies of replacement of calcium by potassium in soils. Soil Sci. of Am. Proc., 19, 167–171.