

# Lysimeterforsøg med kombinationer af kvælstof, fosfor og kalium i handelsgødning

## II. Næringsstofnedvaskning

*Lysimeter experiments with combinations of nitrogen, phosphorus and potassium in mineral fertilizer*  
*II. Leaching of nutrients*

JØRGEN F. HANSEN, P. SØNDERGÅRD KLAUSEN† og JENS PETERSEN

### Resumé

Næringsstofnedvaskningen blev undersøgt i et sædskifte med vinterhvede-bederøer-vårbyg m. udlæg-græs ved forskellige kombinationer af N-, P- og K-tilførsel. Dyrkningssjorden var en grov sandblandet lerjord (JB 5). Ved tilførsel af 16,25 g N, 5 g P og 15,58 g K pr. m<sup>2</sup> i gennemsnit for sædskiftet varierede nedvaskningen af HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> og Ca<sup>++</sup> fra 25 til 90 g pr. m<sup>2</sup>, af Cl<sup>-</sup> og SO<sub>4</sub>-S fra 5 til 17 g pr. m<sup>2</sup>, af NO<sub>3</sub>-N fra 3 til 7 g pr. m<sup>2</sup>, af Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> og Mg<sup>++</sup> fra 1 til 4 g pr. m<sup>2</sup> og af PO<sub>4</sub>-P fra 0 til 20 mg pr. m<sup>2</sup>.

N-nedvaskningen var påvirket af afgrøde, vandafstrømning og gødningstilførsel. Den største nedvaskning fandt sted i efterårs- og vinterperioden. Der blev fundet størst nedvaskning fra ubevokset jord efter høst af hvede, mindre efter roer og efter græs med efterfølgende hvede og mindst efter byg med græsudlæg.

Ved alle afgrøder var N-nedvaskningen stigende med stigende N-tilførsel, især hvor der ikke blev gødet med K, idet K-mangel øgede N-nedvaskningen. I gennemsnit steg N-nedvaskningen fra 3,4 til 4,5 g N pr. m<sup>2</sup> ved at øge N-tilførslen fra

0 til 16,25 g N pr. m<sup>2</sup>, men fra 4,5<sup>-</sup> til 7,4 g N pr. m<sup>2</sup>, når N-tilførslen steg fra 16,25 til 32,5 g N pr. m<sup>2</sup>.

I efterårsperioden var N-nedvaskningen stort set upåvirket af N-tilførslen, idet der kun fandtes små koncentrationsforskelle i afstrømningsvandet. Samtidig observeredes der formindsket vandafstrømning med stigende N-tilførsel. Den øgede N-nedvaskning som følge af N-tilførslen indtraf senere i afstrømningsperioden.

P-nedvaskningen var upåvirket af næringsstofftilførslen, herunder tilførslen af superfosfatgødning. Nedvaskningen af Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup> og SO<sub>4</sub>-S steg, og nedvaskningen af HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> faldt med tilførslen af superfosfatgødning. Nedvaskningen af Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup> og Cl<sup>-</sup> steg med tilførsel af K-gødning (KCl). Nedvaskningen af Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> og Cl<sup>-</sup> faldt med tilførsel af N-gødning.

En balanceret tilførsel af næringsstoffer medvirker således til en minimering af nedvaskningen af N og andre næringsstoffer.

Der blev generelt fundet god sammenhæng mellem afstrømningens størrelse og N-nedvaskningen. Også nedvaskningen af de andre næringsstoffer varierede med afstrømningen.

**Nøgleord:** Kvælstof, fosfor, kalium, næringsstofnedvaskning, afgrøde, vekselvirkning.

## Summary

The leaching of nutrients in a crop rotation of winter wheat-beets-spring barley with undersown grass-grass was studied by using different combinations of N, P and K applied in mineral fertilizer. The crops were grown in a sandy loam soil.

Expressed as g per m<sup>2</sup> the amounts of nutrients leached decreased as follows:

$\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{++} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4\text{-S} > \text{NO}_3\text{-N} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{++} \gg \text{PO}_4\text{-P}$ . At the application of 16.25 g N, 5 g P and 15.58 g K per m<sup>2</sup> on average for the crop rotation leaching of  $\text{HCO}_3^-$  and  $\text{Ca}^{++}$  was 25 to 90 g per m<sup>2</sup>, of  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4\text{-S}$  5 to 17 g per m<sup>2</sup>, of  $\text{NO}_3\text{-N}$  3 to 7 g per m<sup>2</sup>, of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Mg}^{++}$  1 to 4 g per m<sup>2</sup> and of  $\text{PO}_4\text{-P}$  less than 20 mg per m<sup>2</sup>.

The major leaching loss of N occurred during autumn and winter and was affected by crop, percolation of water and fertilizer treatment.

Leaching of N was greatest from a bare soil after wheat, less after beets and after grass followed by winter wheat and least after barley with undersown grass.

Increasing N application increased leaching of

N in all crops particularly under conditions of K deficiency. Average leaching of N increased from 3.4 to 4.5 g N per m<sup>2</sup> by increasing N application from 0 to 16.25 g N per m<sup>2</sup>, and from 4.5 to 7.4 g N per m<sup>2</sup> by doubling the N application from 16.25 to 32.5 g N per m<sup>2</sup>.

Early autumn leaching of N was almost unaffected by the N application. Only small differences in the N concentrations were found in percolation water and reduced percolation was observed when N application was increased. Later in the leaching period the effect of different N applications was appreciable.

Leaching of P was not affected by the application of nutrients, including P. Leaching of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Ca}^{++}$  and  $\text{SO}_4\text{-S}$ , increased and leaching of  $\text{HCO}_3^-$  decreased by application of P. Leaching of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$  and  $\text{Cl}^-$  increased by application of K, leaching of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Cl}^-$  decreased by the application of N.

A balanced application of nutrients contribute to minimize the leaching of N and other nutrients.

Leaching of N and other nutrients was well correlated with the amount of percolated water.

**Key words:** Nitrogen, phosphorus, potassium, leaching of nutrients, crop, interactions of nutrients.

## Indledning

Intensiv planteproduktion kræver tilførsel af næringsstoffer. Gødsningen vil påvirke jordens næringsstofindhold, udbyttes størrelse og afgrødens kvalitet.

Med afstrømningsvandet kan næringsstoffer i jorden føres ned under planternes rodzone, hvorved de i gødningsmæssig henseende er tabt. For nogle stoffers vedkommende kan der blive tale om en miljømæssig belastning som følge af nedvaskningen.

Vandnedrivning til dræn og grundvand sker, når jordens markkapacitet overskrides, hovedsagelig i efterårs- og vintermånederne. Den største nedvaskning af næringsstoffer vil derfor normalt finde sted i efterårs- og vinterperioden. Mængden som nedvaskes bestemmes af et kompliceret samspil mellem den mikrobielle omsætning i jorden, jordtype, nedbør, afgrøde og gødsning.

Indflydelsen af gødningsstof tilførsel og afgrøde på udbytte og næringsstofoptagelse og -nedvaskning blev undersøgt i lysimeterforsøg på Askov for-

søgsstation i perioden 1974–84. I en tidligere beretning fra Statens Planteavlsvforsøg (5) er næringsstof tilførselens betydning for udbytte og næringsstofoptagelse og -koncentration i afgrøden omtalt.

Nærværende beretning giver resultater for næringsstof nedvaskningen. Næringsstofbalancen vil blive omtalt i en efterfølgende beretning.

## Materiale og metode

Lysimeteranlæggets opbygning og forsøgsledenes placering er beskrevet af Klausen og Hansen (5). I tabel 1 er givet en beskrivelse af den anvendte forsøgsjord.

I forsøget er nedvaskningen bestemt som næringsstoffer nedvasket under 1 m's dybde (= jorddybden i lysimeterkarrene) og målt i afstrømningsvandet fra lysimeterne. Det enkelte års afstrømning blev opgjort fra forudgående afstrømningsperiodes ophør om foråret til afstrømningsens ophør næste forår.

**Table 1.** Jordens volumenvægt samt tekstur- og jordbundsanalyser ved forsøgets start.  
*Soil volume weight and soil texture and analyses by start of the experiment.*

	Dybde <i>Depth</i> cm	Jord <i>Soil</i> g/cm <sup>3</sup>	Pct. %				Rt <i>pH</i>	Ft <sup>1)</sup>	Kt <sup>2)</sup>	Mgt <sup>3)</sup>
			Ler <i>Clay</i>	Silt <i>Silt</i>	Fin- sand <i>Fine sand</i>	Grov- sand <i>Coarse sand</i>				
Overjord <i>Topsoil</i>	0–20	1,50	9,3	11,2	37,3	42,2	6,8	9,0	15,7	6,1
Mellemjord <i>Intermediate layer</i>	20–40	1,55	6,9	6,6	29,8	56,7	6,3	4,9	4,0	3,5
Underjord <i>Subsoil</i>	40–100	1,23	9,1	6,9	31,4	52,6	6,0	2,5	4,5	2,5

<sup>1)</sup> 1 Ft = 3 mg P/100 g soil

<sup>2)</sup> 1 Kt = 1 mg K/100 g soil

<sup>3)</sup> 1 Mgt = 1 mg Mg/100 g soil

### Forsøgsplan

Der blev i de første 10 forsøgsår, 1974–83, benyttet et 4-marks sædskifte med afgrøderne: vinterhvede-bederoer-vårbyg med udlæg-græs. Alle af-

grøder blev dyrket hvert år. Forsøget gennemførtes uden gentagelser. Næringsstofmængde og kombinationer de første 8 forsøgsår fremgår af tabel 2.

**Table 2.** Næringsstofniveauer de første 8 forsøgsår 1974–81, samt næringsstofmængder.  
*Application of nutrients during 1st–8th experimental year.*

Næringsstofniveau <i>Level of nutrient application</i>	Gødningstyper <i>Type of fertilizer</i>	g næringsstof pr. m <sup>2</sup> *) <i>g nutrient per m<sup>2</sup> *)</i>				
		Vinter hvede <i>Winter wheat</i>	Roer <i>Beets</i>	Vårbyg m. udlæg <i>Spring barley with under- sown grass</i>	Græs <i>Grass</i>	Gns. for sædskifte <i>Average of crop rotation</i>
1. 0N	Kalkammon- salpeter <i>CAN</i>					
2. 1N		10,0	22,5	10,0**)	22,5	16,25
3. 2N		20,0	45,0	20,0**)	45,0	32,5
x. 0P	Superfosfat <i>Singel super phosphate</i>					
y. 1P		4,0	8,0	4,0	4,0	5,0
A. 0K	Kalium- chlorid <i>Potassium chloride</i>					
B. 1K		10,0	22,5	7,3	22,5	15,58
C. 2K		20,0	45,0	14,6	45,0	31,15

\*) g/m<sup>2</sup> x 10 = kg/ha

\*\*\*) Heraf de 2,5 g til græsudlæg efter byghøst.

*Including 2.5 g applied to grass after harvest of barley.*

Da den tilførte mængde næringsstof pr. m<sup>2</sup> ved samme næringsstofniveau er forskellig for nogle afgrøder, er næringsstofforsyningen i den følgende tekst af hensyn til enkeltheden i flere tilfælde angivet ved næringsstofniveauet, fx 1 N+1 P+1 K. Vedr. g næringsstof tilført pr. m<sup>2</sup> henvises der til tabel 2.

I 9. og 10. forsøgsår (1982–83) ændredes gødskningen. Alle led fik tilført 1 N i kalkkamonsalpet. K-tilførslen ved leddet med 1 K forblev uændret. Led, der tidligere ikke var tilført K, fik nu tilført 2 K, hvorimod de led, som tidligere var tilført 2 K, ikke blev gødet med K. P-tildelingen var uændret.

I 1984 (11. forsøgsår) blev der dyrket byg i hele forsøget. Der blev gødet med 10 g N pr. m<sup>2</sup>, mens P- og K-tilførslen var som de foregående 2 år.

Vanding indgik ikke som en forsøgsbehandling. De enkelte led blev vandet, såfremt der op-

stod behov, for at undgå en utilsigtet forskel i vækstbetingelserne fra led til led.

### Analyser af afstrømningsvand

Der blev bestemt NO<sub>3</sub>-N med autoanalyser, vandopløseligt P ved ascorbinsyremetoden, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup> ved atomabsorptionsflammeometri, SO<sub>4</sub>-S ved titrering med tholin som indikator, elektrometrisk bestemmelse af Cl<sup>-</sup> med titrering med sølvnitrat, samt bestemmelse af HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

### Klimatiske forhold

Der var stor variation i nedbørsmængden, såvel i de forskellige år som måneder. Specielt i perioden oktober-december var nedbøren i de fleste forsøgsår højere end normalnedbøren, tabel 3. Da jorden endvidere har haft varierende udtørningsgrad ved vækstperiodens afslutning de en-

Tabel 3. Nedbør ved Askov forsøgsstation, mm (målt i 1,5 m højde).  
*Precipitation at Askov Research Station, mm.*

År	Maj <i>May</i>	Juni <i>June</i>	Juli <i>July</i>	Aug.	Sep.	Okt. <i>Oct.</i>	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Okt. /Mar.	Hele perioden <i>The period</i>
1974/75				73	148	51	153	156	115	15	31	65	521	–
–75/76	27	14	53	46	92	58	90	51	101	18	21	31	339	602
–76/77	81	15	22	23	68	120	59	84	83	68	28	103	442	754
–77/78	44	75	90	31	49	75	172	89	89	24	129	24	578	891
–78/79	17	133	62	64	105	95	106	50	50	16	75	65	392	838
–79/80	92	33	41	96	77	56	143	150	39	36	41	38	465	842
–80/81	11	178	133	138	64	238	148	110	83	74	125	14	778	1316
–81/82	88	165	99	68	42	169	130	55	75	23	53	24	505	991
–82/83	61	40	34	193	47	113	118	158	112	28	89	86	618	1079
–83/84	168	29	12	6	152	129	57	89	112	48	38	22	473	862
–84/85	44	68	52	26	128	176	88	44	66	24	60	70	458	846
Gennemsnit <i>Average</i>	63	75	60	69	88	116	115	94	84	34	63	49	506	902
1931–60														
»Normal«	43	50	89	102	89	84	70	67	66	48	36	46	371	790
»Normal« (6)														

kelte år, var drænvandsmængden ikke fuldstændig korreleret med nedbøren.

Afstrømningen begyndte som regel i oktober og sluttede i april, men som følge af varierende klimaforhold var der betydelige afvigelser, tabel 4.

Kvælstofnedvaskningens størrelse er bl.a. afhængig af den biologiske omsætning i jorden, som er meget temperaturafhængig. Jordtemperaturen blev ikke målt i nærværende forsøg, men luftens middeltemperatur giver en orientering om forholdene de enkelte år, tabel 5.

Tabel 4. Afstrømning, mm. Gennemsnit af alle forsøgsbehandlinger og afgrøder.  
*Drainage, mm. Average of all treatments and crops.*

Periode	74/75	75/76	76/77	77/78	78/79	79/80	80/81	81/82	82/83	83/84	84/85
Sommer	-	-	-	-	7	-	160	69	-	78	-
<i>Summer</i>											
Efterår*-nov.	224	62	78	100	154	166	344	204	190	158	227
<i>Autumn*-Nov.</i>											
Dec.-jan.	255	128	121	152	66	175	185	93	260	175	76
<i>Dec.-Jan.</i>											
Feb.-forår**	124	55	177	172	142	90	195	94	208	79	139
<i>Feb.-spring**</i>											
I alt	603	245	376	424	369	431	884	460	658	490	442
<i>Total</i>											

\* Efterår = afstrømningsperiodens begyndelse om efteråret

*Autumn = start of drainage period in autumn*

\*\* Forår = afstrømningsperiodens ophør

*Spring = end of drainage periode*

Tabel 5. Lufttemperatur ved Askov forsøgsstation, °C. Gennemsnit af månedens døgn minimum og maksimum.  
*Air temperature at Askov Research Station, °C. Average of daily minimum and maximum.*

År	Aug.	Sep.	Okt. Okt.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Maj May	Jun.	Jul.
1974/75	15,2	12,7	6,2	5,0	4,4	4,5	1,5	2,6	5,4	10,5	14,1	16,8
-75/76	19,2	14,0	8,2	4,1	3,7	0,4	-0,1	0	5,5	10,8	14,5	17,5
-76/77	16,9	12,1	9,1	4,5	-1,1	-1,0	-0,5	4,1	4,5	10,7	14,7	15,0
-77/78	14,9	11,5	9,7	4,9	2,6	0,8	-2,8	2,5	4,5	11,3	14,4	13,4
-78/79	14,7	11,5	9,3	6,9	-0,6	-4,5	-4,1	1,0	5,0	9,9	14,2	13,8
-79/80	14,4	12,4	8,1	4,3	2,2	-2,2	-1,1	0,6	6,3	10,1	14,7	15,2
-80/81	15,1	13,2	7,7	3,7	1,9	-0,8	-0,3	3,0	5,9	12,5	13,2	14,7
-81/82	15,1	13,0	7,7	4,6	-4,6	-3,5	-0,8	3,3	6,1	10,5	14,1	16,7
-82/83	16,8	13,2	9,9	6,0	2,1	4,2	-1,6	3,2	6,5	10,1	14,0	17,2
-83/84	17,1	12,8	9,0	4,3	1,3	0,7	-0,2	1,0	6,2	10,5	13,0	14,4
-84/85	16,9	11,7	10,2	5,6	2,3	-5,8	-3,6	1,1	5,0	11,5	13,1	15,6
1931-60												
»Normal«	15,8	12,8	8,6	4,8	2,0	-0,2	-0,4	1,7	6,1	11,0	14,1	16,0
»Normal« (6)												

Temperaturen var i august og september 1975 en del højere end de øvrige år, og det er sandsynligt, at der dette år har været en stor kvælstofminalisering.

## Resultater og diskussion

Tilførsel af N havde en markant indflydelse på udbyttets størrelse (5) og afgrødernes vandforbrug, tabel 6. Ved moderat og høj N-tilførsel var afstrømningsmængden i gennemsnit henholdsvis 11 pct. og 15 pct. lavere end i led uden N-tilførsel.

**Tabel 6.** Afstrømning i relation til N-tilførsel. Gns. af 1.-8. forsøgsår og 4 afgrøder, samt alle kombinationer af P og K.

*Drainage in relation to application of N. Average of 1st - 8th experimental year and 4 crops plus all combinations of P and K.*

N-tilførsel <i>N application</i>	mm
0 N	519
1 N	463
2 N	440
LSD <sub>95</sub>	4,4

## Kvælstofnedvaskning

### Afgrødens indflydelse på kvælstofnedvaskningen

Ved kombinationen 1 N + 1 K er afgrødvalgets indflydelse på N-nedvaskningen vist i fig. 1.

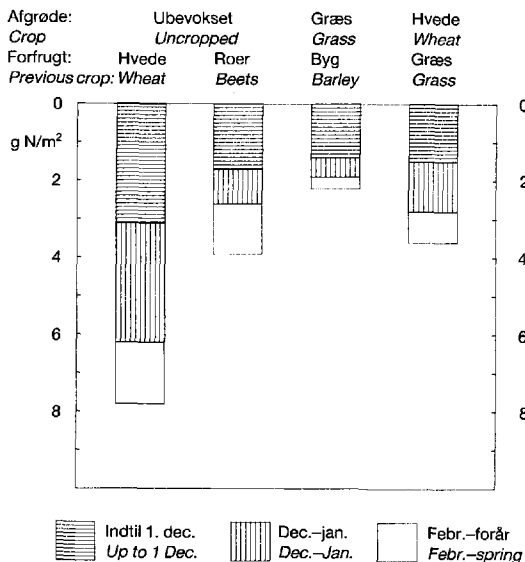


Fig. 1. N-nedvaskning ved forskellige afgrøder. Gns. af 1.-8. forsøgsår ved moderat N- og K-tilførsel (1 N + 1 K).

*N leaching from different crops. Average of 1st-8th experimental year at moderate application of N and K (1 N + 1 K).*

Den største N-nedvaskning blev fundet efter hvede. Selvom N-tilførslen var mere end dobbelt så stor til roer og græs, var N-nedvaskningen efter disse afgrøder kun halvt så stor som efter hvede.

I hvede efter græs var nedvaskningen større end i græs efter byg. Der er sandsynligvis mineraliseret mere N fra det nedgravede græs, end den nyetablerede hvede kunne optage.

I afstrømningsperioden 1975/76 var nedvaskningen efter hvede næsten dobbelt så stor som i de øvrige år. Dette skyldtes formodentlig de meget gunstige betingelser for mikrobiel omsætning i august-september dette år som følge af passende fugtighedsforhold samt 1-5°C højere temperatur end i de øvrige forsøgsår (tabel 5). Da der endvidere ikke var planter, som efter høst af hveden kunne optage den store mængde mineraliseret N, skete der en stor N-nedvaskning, efter at jordens markkapacitet blev overskredet.

Til sammenligning var N-nedvaskningen i græs efter byg under 1/3 af nedvaskningen efter hvede. Den store nedvaskning efter hvede skyldtes formodentlig hvedens placering efter græs i sædskiftet. Græsafrøden forud for hveden var næppe fuldt ud omsat ved hvedens høst, og en fortsat mineralisering efter høst har således påvirket den efterfølgende N-nedvaskning.

### Nogle klimatiske forholds betydning for N-nedvaskningen

Afstrømningen har væsentlig indflydelse på N-nedvaskningen. Afstrømningen og N-nedvaskningen opdelt på tre perioder er vist i fig. 2.

Jordens N-mineralisering antages normalt at være beskeden, når jordtemperaturen falder til under 4°C, hvilket oftest sker i løbet af november måned. Der blev dog også i nogle år konstateret en betydelig N-nedvaskning i perioden december-januar og februar-forår, fig. 2. En sandsynlig årsag hertil er, at det tager en vis tid for vandet at sive gennem 1 meter jord, hvorved nedvaskningen forsinkes i forhold til N-mineraliseringen. Endvidere kan der også i vintermånederne i nogle år have været perioder med tilstrækkelig høj jordtemperatur, til at mineralisering kunne foregå.

I de år, hvor jorden tidligt blev vandmættet, var nedvaskningen stor i den første del af afstrømningsperioden. I år med mere beskeden efterårsnedbør var nedvaskningen størst omkring årsskiftet.

Den store N-nedvaskning i 1980/81 skyldtes især en betydelig sommernedvaskning i 1980 (2 g N pr. m<sup>2</sup> i gennemsnit af de fire afgrøder). Den 15. juni faldt der 60 mm nedbør, og frem til 31. august faldt i alt 439 mm nedbør, hvilket er dobbelt så meget som normalt.

Den sidste halvdel af N-mængden til roer blev givet d. 11. juni, få dage før den store nedbør. Samtidig var roeplanterne stadig små og havde kun en beskeden N-optagelse.

Græsset blev slået d. 21. maj, hvorefter 1/4 af N-gødningen blev udbragt. Noget af dette N har planterne ikke nået at optage før nedbøren d. 15. juni.

Den store nedbør i sommeren 1980 medførte tidlig afstrømning, og resultatet var en usædvanlig stor N-nedvaskning sidst på sommeren. I roerne nedvaskedes således 5,9 g N pr. m<sup>2</sup>, og N-koncentrationen var høj, 33 mg N pr. liter vand.

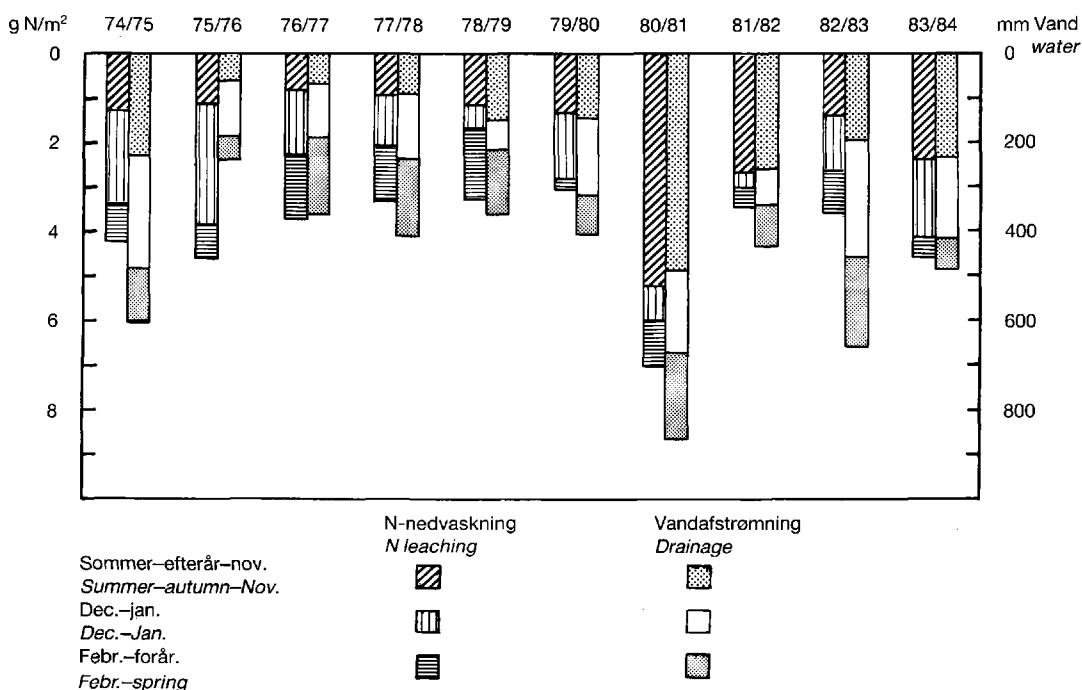


Fig. 2. Årsvariation i N-nedvaskning og vandafstrømning ved moderat gødskning (1 N + 1 K + 1 P), gns. af 4 afgrøder.  
N leaching and drainage at moderate fertilizer application (1 N + 1 K + 1 P). Average of 4 crops.

Fig. 3 viser, hvorledes sammenspillet mellem stoftilførsel påvirkede nedvaskningen i de enkelte afgrøder i 1980/81.

stoftilførsel påvirkede nedvaskningen i de enkelte afgrøder i 1980/81.

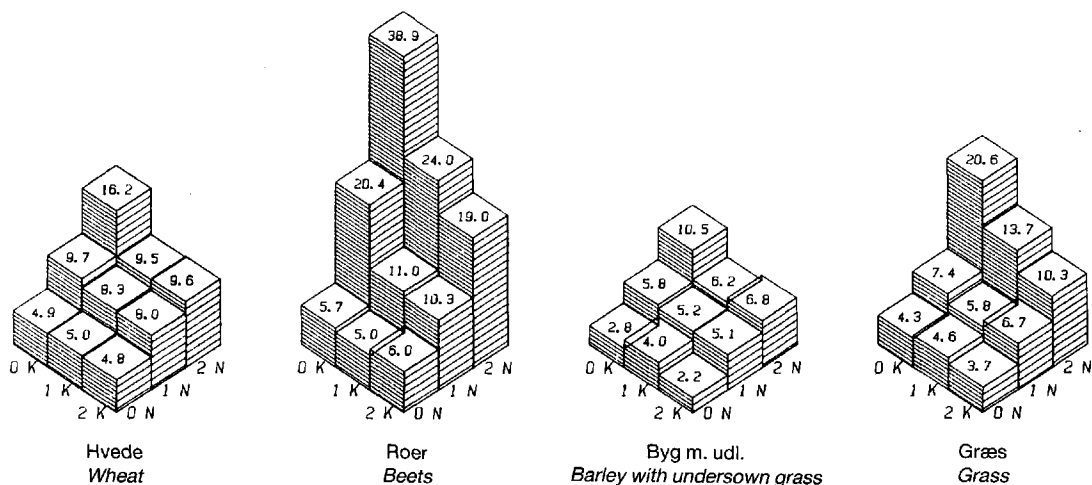


Fig. 3. N-nedvaskning 1980/81 ved unormalt stor sommernedbør i 1980, g N pr. m<sup>2</sup>.  
N leaching 1980/81 in relation to high summer precipitation in 1980, g N per m<sup>2</sup>.

### Gødskningens indflydelse på N-nedvaskningen

I alle afgrøder var nedvaskningen stigende med stigende N-tilførsel, især hvor der ikke blev gødet

med K, tabel 7. Ved K-mangel var afgrøden ikke i stand til at udnytte den store N-mængde, hvilket forøgede nedvaskningen betydeligt.

Tabel 7. N-nedvaskning i relation til N-, P- og K-tilførsel. Gns. af 1. – 8. forsøgsår og 4 afgrøder. *Leaching of N in relation to application of N, P and K. Average of 1st – 8th experimental year and 4 crops.*

N-niveau N-application	g N pr. m <sup>2</sup>							
	K-niveau K application				P-niveau P application			Gns.
	0K	1K	2K	LSD <sub>95</sub>	0P	1P	LSD <sub>95</sub>	
0N	3,41	3,47	3,29		3,43	3,35		3,39
1N	5,05	4,32	4,22	0,66	4,69	4,39	0,57	4,54
2N	9,18	6,65	6,35		7,99	6,79		7,39
LSD <sub>95</sub>		0,97		0,71		0,98	0,96	0,71

K-gødskningen påvirkede N-nedvaskningen meget kraftigere i 7. forsøgsår 1980/81 end i de forudgående forsøgsår, fig. 4. På dette tidspunkt var der stærk K-mangel i leddene, der i de foregående år ikke var gødet med K, specielt hvor der samtidig var gødet med store mængder N.

Desuden var der som før omtalt en stor sommernedvaskning i 1980.

Fig. 4 viser, hvorledes varierende gødskning gennem en årrække påvirker N-nedvaskningen.

Så længe jordens reserve kunne klare afgrødernes K-behov, havde K-tilførsel ingen indflydelse på N-nedvaskningen. Efterhånden som K-mangel i 0 K leddene forårsagede væsentlig udbyttenedgang, observeredes en dårligere N-udnyttelse og øget N-nedvaskning i leddene med 0 K og 1 N og 2 N.

P-gødskning havde kun indflydelse på N-nedvaskningen ved 2 N, tabel 7. I situationer med P-mangel vil N-nedvaskningen øges, men virkningen vil være mindre end ved K-mangel.

### Tidsforløbet af N-nedvaskningen

Tidsforløbet af N-nedvaskningen ved de fire afgrøder ved ingen, ved moderat og ved stor mængde N og K er vist i fig. 5. Nedvaskningen er målt med 2–4 ugers mellemrum i alle afgrøder i afstrømningsperioderne 76/77–81/82.

Der var stor forskel på, hvornår nedvaskningen begyndte de forskellige år, afhængig af afstrømningens størrelse og fordeling (se fig. 2). I afstrømningsperioderne 80/81 og 81/82 begyndte nedvaskningen således tidligt, fig. 5, pga. en relativ stor afstrømning i efterårsmånederne (fig. 2).

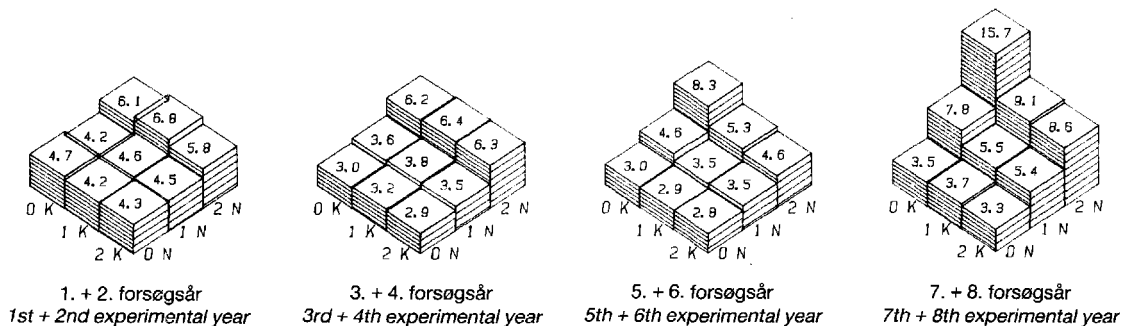


Fig. 4. Forløbet af N-nedvaskning ved varierende gødskning, g N pr. m<sup>2</sup>. Gennemsnit af 4 afgrøder og 2-års perioder.

*N leaching during 1st–8th experimental year, g N per m<sup>2</sup>. Average of 4 crops and 2 year periods.*



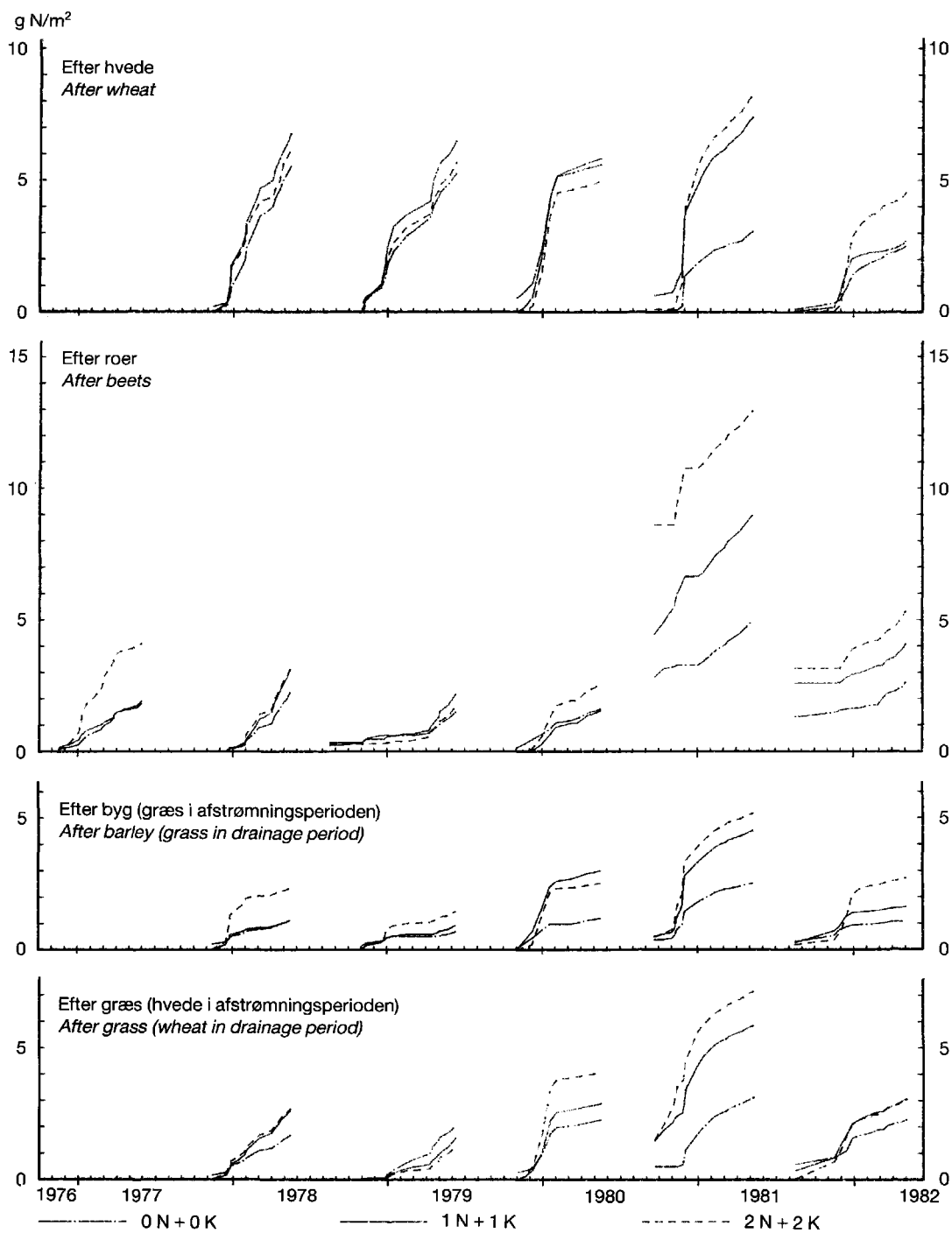


Fig. 5. Akkumuleret N-nedvaskning ved forskellige gødskningsniveauer.  
*Accumulated N leaching at different levels of N and K application.*

Generelt var N-nedvaskningen i efterårsmånederne nogenlunde uafhængig af N-tilførslen.

Det skyldtes bl.a., at koncentrationsforskellen i afstrømningsvandet ved forskellig N-tilførsel generelt var mindre i de tidlige efterårsmåneder end senere på efteråret. Dette er i overensstemmelse med *Kjellerup* og *Kofoed* (4). Desuden var der tendens til aftagende vandafstrømning i efterårsmånederne med stigende N-tilførsel.

I vintrene 77/78 og 79/80 var der efter hvede omtrent samme nedvaskning, og den nedvaskede mængde N var ikke nævneværdig påvirket af gødningstilførslen.

I 1980/81 var der ved moderat og højt N- og K-niveau en kraftig stigning i nedvaskningen efter hvede og roer. Næste vinter blev der i hvede kun efter tilførsel af stor N- og K-mængde fundet øget nedvaskning.

Tilførsel af stor N- og K-mængde (2 N + 2 K) har de fleste vintre tilsyneladende givet størst nedvaskning efter roer. Ved tilførsel af moderat N- og K-mængde (1 N + 1 K) afveg nedvaskningen i halvdelen af vintrene derimod ikke nævneværdigt fra de ugødede led.

I græs efter byg og i hvede efter græs blev nedvaskningen i efterårsmånederne kun i ringe grad påvirket af gødskningen, men hen på vinteren viste virkningen af gødningstilførsel sig.

### Nedvaskningen af andre næringsstoffer

Der var betydelige forskelle i nedvaskningen af de enkelte næringsstoffer. For de undersøgte elementer var rækkefølgen i nedvaskningen udtrykt som g pr. m<sup>2</sup>: HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Ca<sup>++</sup> > Cl<sup>-</sup> > SO<sub>4</sub>-S > NO<sub>3</sub>-N > Na<sup>+</sup> > K<sup>+</sup> > Mg<sup>++</sup> >> PO<sub>4</sub>-P.

Det kan specielt bemærkes, at P-nedvaskningen var under 1/100 af nedvaskningen af stoffet med den næstlaveste nedvaskning, Mg.

I drænvandsundersøgelser på lerjords-lokaliteter (7) blev der fundet tilsvarende rækkefølge i næringsstofnedvaskningen bortset fra Mg<sup>++</sup> og K<sup>+</sup>, hvor placeringen var byttet om. I tidligere lysimeterundersøgelser ved Askov forsøgsstation (4) var tabet af Mg<sup>++</sup> også større end tabet af K<sup>+</sup>, og Na<sup>+</sup> nedvaskningen oversteg N-nedvaskningen. Derudover var rækkefølgen for nedvaskningen den samme som i nærværende undersøgelse.

Nedvaskningen af de enkelte næringsstoffer var påvirket af flere faktorer. Der blev således konstateret en årsvariation i nedvaskningen, som de fleste år var relateret til afstrømningen, fig. 6.

Nedvaskningens størrelse det enkelte år bestemmes af afstrømningsmængden og næringsstofkoncentrationen i afstrømningsvandet. Koncentrationen af de enkelte næringsstoffer varierede gennem årene, fig. 7. Generelt var der oftest størst koncentration i år med lille afstrømning og de mindste koncentrationer i år med stor afstrømning.

Afstrømningsmængdens betydning er især tydelig for stoffer, der blev nedvasket i stor mængde (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>++</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub>-S), men også nedvaskningen af Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup> og PO<sub>4</sub>-P var påvirket af afstrømningens størrelse.

Ved 1 N + 1 K + 1 P var nedvaskningen af PO<sub>4</sub>-P 0–10 mg pr. m<sup>2</sup>, af Mg<sup>++</sup>, K<sup>+</sup> og Na<sup>+</sup> 1–4 g pr. m<sup>2</sup>, af NO<sub>3</sub>-N 3–7 g pr. m<sup>2</sup>, af Cl<sup>-</sup> og SO<sub>4</sub>-S fra 5–17 g pr. m<sup>2</sup> og af Ca<sup>++</sup> og HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> fra 25–90 g pr. m<sup>2</sup>.

Som gennemsnit af alle gødningskombinationer havde afgrøden kun indflydelse på nedvaskningen af NO<sub>3</sub>-N og Cl<sup>-</sup>, fig. 1 og tabel 8.

**Tabel 8.** Cl-nedvaskning i relation til afgrøde. Gennemsnit af 1.–8. forsøgsår og alle kombinationer af N, P og K.

*Leaching of Cl in relation to crops. Average of 1st–8th experimental year and all combinations of N, P and K.*

Afgrøde <i>Crop</i>	g Cl <sup>-</sup> pr. m <sup>2</sup> g Cl <sup>-</sup> per m <sup>2</sup>
Græs <i>Grass</i>	23,4
Roer <i>Beets</i>	10,9
Byg m. udlæg <i>Barley with undersown grass</i>	7,9
Hvede <i>Wheat</i>	5,9
LSD <sub>95</sub>	3,8

For en enkelt næringsstoffkombination, 1 N + 1 K + 1 P, er afgrødens indflydelse på nedvaskningen af alle næringsstoffer illustreret i fig. 8.

Nedvaskningen af næringsstoffer var i nogen grad påvirket af variationerne i gødningstilførsel og -kombinationer, tabel 9-13. Resultaterne er gennemsnit af 4 afgrøder og 1.–8. forsøgsår, og tabellerne 9–13 illustrerer således gødningstilførselens betydning for den gennemsnitlige næringsstofnedvaskning fra et sædskifte.

g/m<sup>2</sup> (P: mg/m<sup>2</sup>)

mm Vand Water

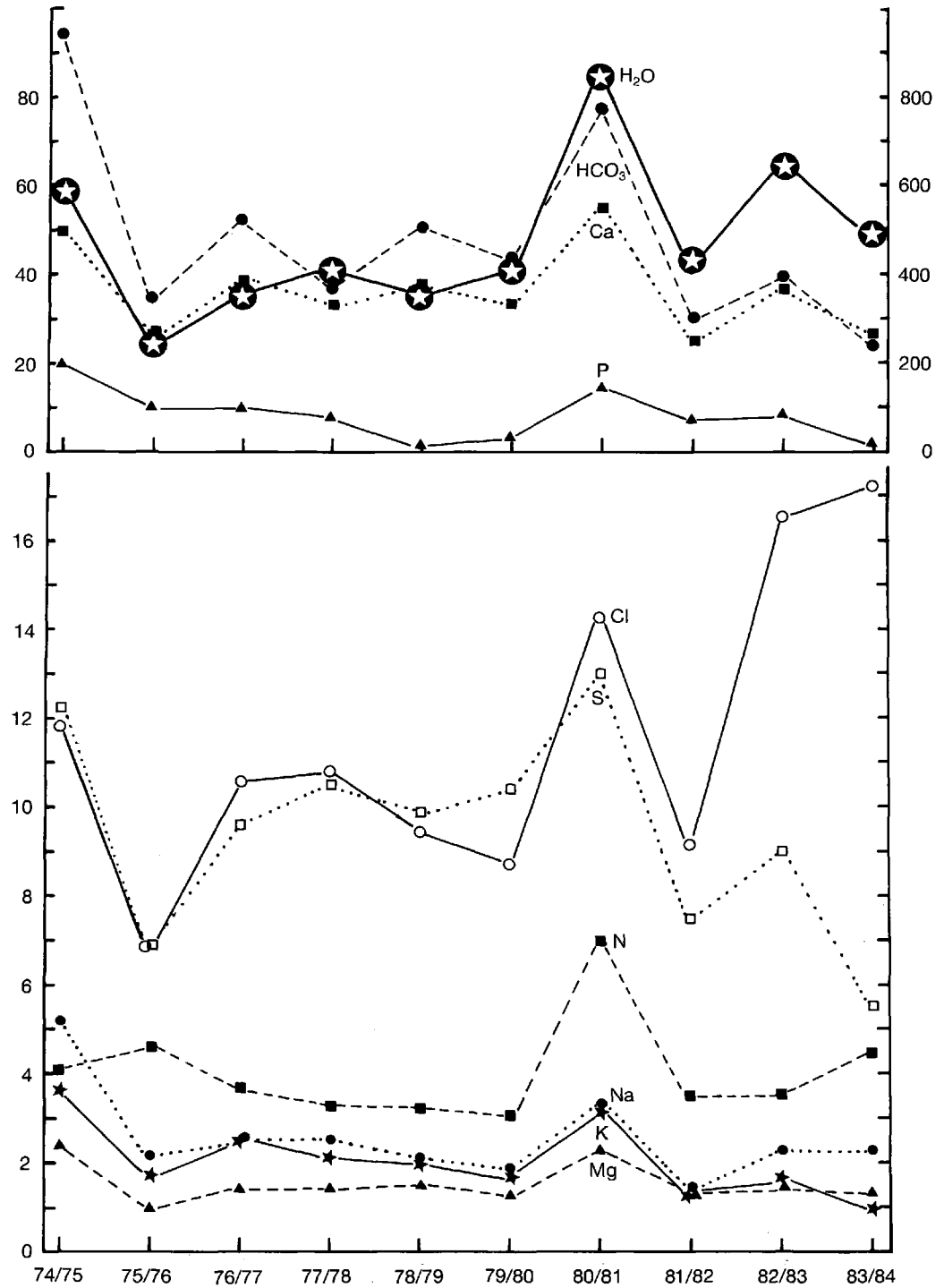


Fig. 6. Årsvariationen i næringsstofnedvaskning og vandafstrømning. Gns. af 4 afgrøder ved moderat gødskning (1 N + 1 K + 1 P).

Yearly variation in leaching of nutrients and drainage. Average of 4 crops at moderate fertilizer application (1 N + 1 K + 1 P).

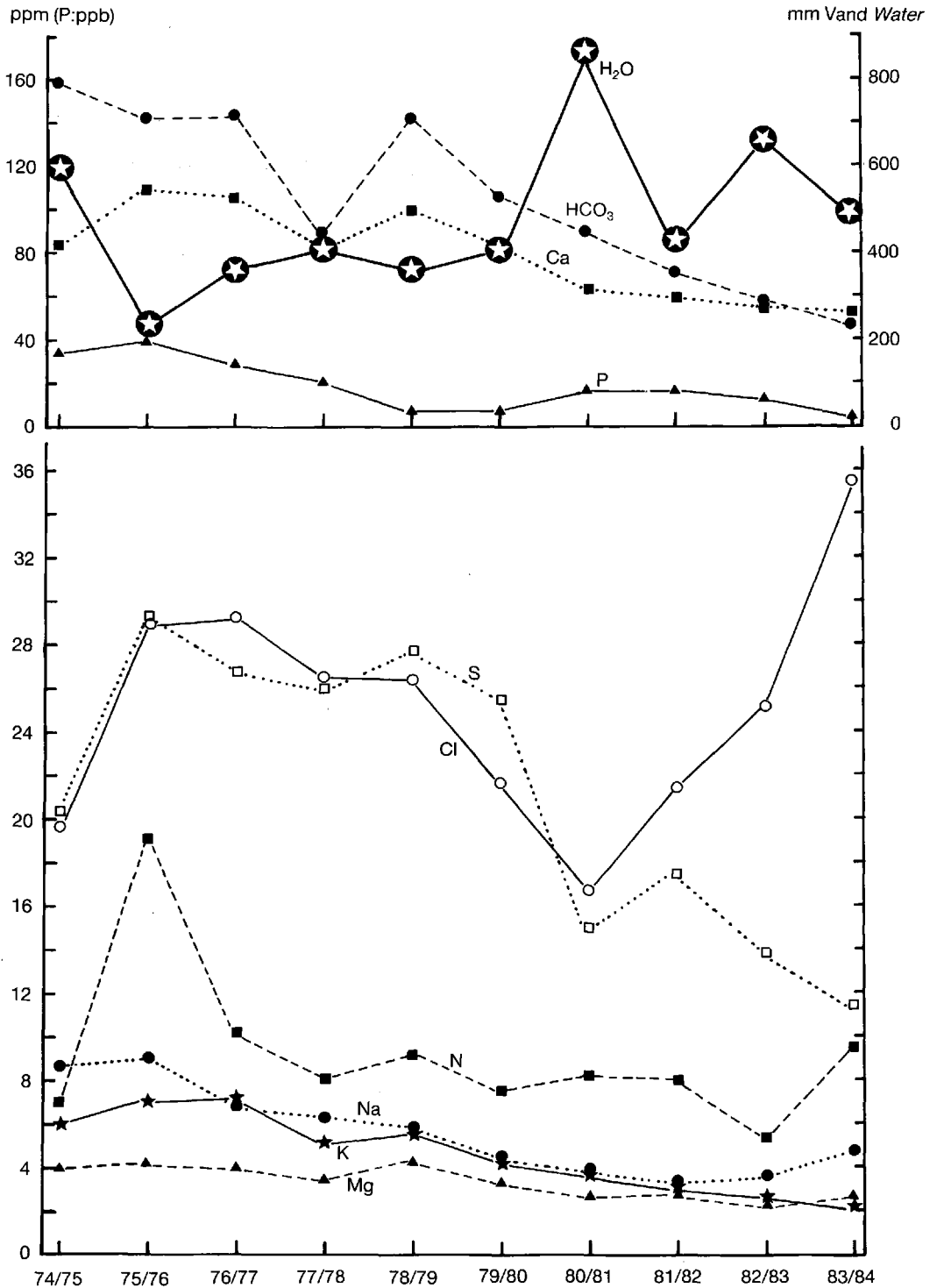


Fig. 7. Årsvariationen i næringsstofkoncentrationer i afstrømningen. Gns. af 4 afgrøder ved moderat gødskning (1 N + 1 K + 1 P).

*Concentrations of nutrients in drainage water. Average of 4 crops at moderate fertilizer application (1 N + 1 K + 1 P).*

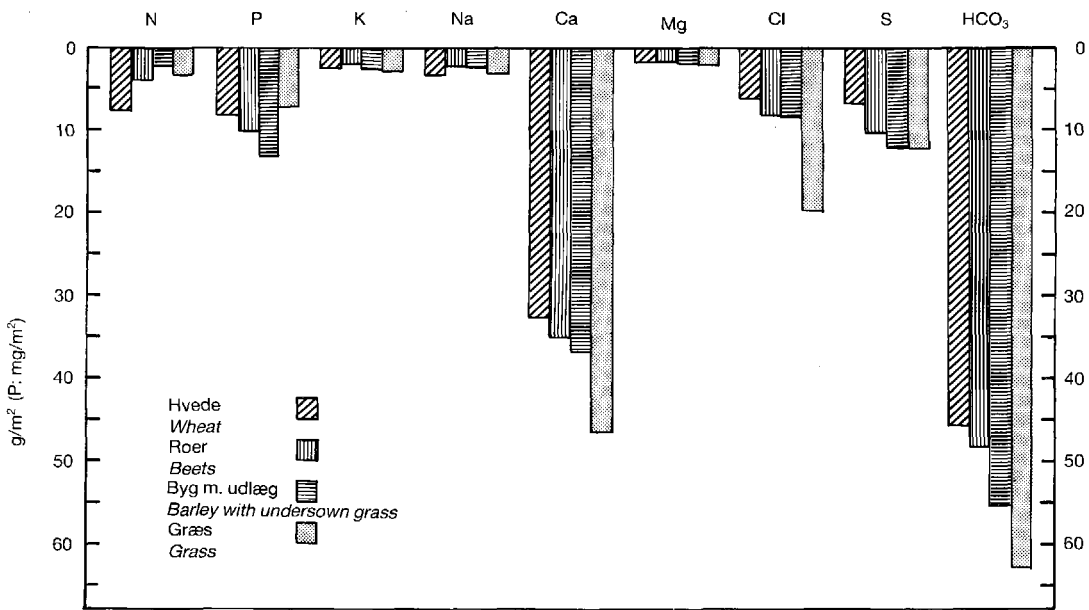


Fig. 8. Næringsstofnedvaskning i relation til afgrøde. Gns. af 1.-8. forsøgsår ved moderat gødskning (1 N + 1 K + 1 P).

Leaching of nutrients in relation to crops. Average of 1st-8th experimental year at moderate fertilizer application (1 N + 1 K + 1 P).

Tilførsel af superfosfat medførte tydelig stigning i nedvaskningen af  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Ca^{++}$   $SO_4-S$  og fald i  $HCO_3^-$  nedvaskningen, tabel 9. Vedrørende  $Ca^{++}$  og  $SO_4-S$  kan virkningen sandsynligvis henføres til indholdet af S og Ca i superfosfat.

**Tabel 9.** Næringsstofnedvaskning i relation til P-tilførsel. Gennemsnit af 1.-8. forsøgsår og 4 afgrøder, samt alle kombinationer af N og K.

Leaching of nutrients in relation to application of P. Average of 1st-8th experimental year and 4 crops, plus all combinations of N and K.

P-niveau P application	g pr. m <sup>2</sup>					
	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	SO <sub>4</sub> -S	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
0	2,17	2,62	32,9	1,41	4,0	53,7
1	2,37	2,77	39,0	1,70	10,0	51,6
LSD <sub>95</sub>	0,13	0,08	1,8	0,05	0,4	1,9

Kun nedvaskningen af  $PO_4-P$  var upåvirket af næringsstofftilførsel, herunder tilførsel af superfosfat. P bindes stærkt i jorden.

Nedvaskningen af  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Ca^{++}$  og  $Cl^-$  steg med stigende K-tilførsel, tabel 10.

**Tabel 10.** Næringsstofnedvaskning i relation til K-tilførsel. Gennemsnit af 1.-8. forsøgsår og 4 afgrøder, samt alle kombinationer af N og P.

Leaching of nutrients in relation to application of K. Average of 1st-8th experimental year and 4 crops, plus all combinations of N and P.

K-niveau K application	g pr. m <sup>2</sup>				
	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Cl <sup>-</sup>
0	1,96	2,20	34,0	1,45	4,6
1	2,23	2,74	35,1	1,50	11,3
2	2,61	3,14	38,7	1,72	20,1
LSD <sub>95</sub>	0,10	0,12	1,1	0,03	2,0

For  $Na^+$ ,  $Ca^{++}$  og  $Mg^{++}$  kan forøgelsen skyldes en ombytning med  $K^+$  på lerkolloiderne, mens  $Cl^-$  er følgestof i den benyttede kaliumgødning.

Ved øget tilførsel af N øges afgrødens optagelse af næringsstoffer, hvilket sandsynligvis er årsag til

den formindskede nedvaskning af  $K^+$ ,  $Na^+$  og  $Cl^-$  med stigende N-tilførsel, tabel 11.

Der fandtes vekselvirkning mellem N- og K-tilførselens indvirkning på nedvaskningen af  $K^+$  og  $Cl^-$ , tabel 12.

Ved balanceret gødskning (0 N + 0 K, 1 N + 1 K, 2 N + 2 K) fandtes ingen forskel i mængden af nedvasket  $K^+$ . Tilføres derimod »overskud« af N (2 N + 0 K) reduceres K-nedvaskningen, mens »underskud« af N (0 N + 2 K) øger K-nedvaskningen.

En tilsvarende virkning af N- og K-tilførslen findes ikke for  $Cl^-$ -nedvaskningen, idet K-gødskningen i højere grad øger nedvaskningen, end N-

**Tabel 11.** Næringsstofnedvaskning i relation til N-tilførsel. Gennemsnit af 1.–8. forsøgsår og 4 afgrøder, samt alle kombinationer af P og K.

*Leaching of nutrients in relation to application of N. Average of 1st–8th experimental year and 4 crops, plus all combinations of P and K.*

N-niveau <i>N application</i>	g pr. m <sup>2</sup>		
	$K^+$	$Na^+$	$Cl^-$
0	2,74	3,41	14,8
1	2,09	2,51	11,0
2	1,97	2,17	10,3
LSD <sub>95</sub>	0,19	0,27	0,5

**Tabel 12.** Nedvaskning af  $K^+$  og  $Cl^-$  i relation til N- og K-tilførsel. Gns. af 1.–8. forsøgsår og 4 afgrøder samt 0 og 1 P.

*Leaching of  $K^+$  and  $Cl^-$  in relation to application of N and K. Average of 1st–8th experimental year and 4 crops plus 0 and 1 P.*

N-niveau <i>N application</i>	g K pr. m <sup>2</sup>			LSD <sub>95</sub>	g Cl pr. m <sup>2</sup>			LSD <sub>95</sub>
	K-niveau <i>K application</i>				K-niveau <i>K application</i>			
	0	1	2		0	1	2	
0	2,28	2,67	3,26	0,15	5,0	14,4	24,9	2,2
1	1,81	2,13	2,34		4,5	10,2	18,3	
2	1,79	1,90	2,23		4,4	9,3	17,2	
LSD <sub>95</sub>	0,22			0,26	0,8			2,7

gødskningen reducerer nedvaskningen. Den stigende  $Cl^-$ -nedvaskning med K-tilførsel skyldtes sandsynligvis anvendelsen af kaliumchlorid som K-gødning.

## Generel diskussion og konklusioner

Umiddelbart efter gødskning er der store mængder vandopløselige næringsstoffer i jorden. Om sommeren er nedvaskningen dog normalt begrænset, idet jorden som regel ikke opnår markkapacitet. Samtidig optager afgrøderne ret hurtigt de vandopløselige næringsstoffer, som tilføres med gødning eller frigøres i jorden ved mineralisering. Nedvaskningen sker overvejende i efterårs- og vinterperioden, når jordens markkapacitet overskrides, samtidig med, at der er opløselige næringsstoffer i jorden og ingen eller kun begræn-

set plantevækst. Vækstsæsonens længde har derfor stor betydning for nedvaskningens størrelse. Denne kan nedsættes ved at holde jorden bevokset i efterårs- og vintermånederne (se fig. 1.)

Ved tilførsel af organisk stof til jorden, fx ved nedpløjning af efterafgrøde eller græsmark vil den efterfølgende mineralisering af selv en letomsættelig organisk pulje kunne strække sig over flere år. Forløbet af mineraliseringen af det organisk bundne N vil have stor indflydelse på størrelsen af N-nedvaskningen. Nedpløjning af græs forud for vintersæd kan således muligvis øge nedvaskningen efter høst af kornet, hvilket synes at være årsagen til den relativt store nedvaskning efter hvede (se fig. 1). Etablering af »grønne marker« i form af efterafgrøder kan således stille større krav til sædskiftet med hensyn til N-optagelseskapacitet og gødskningsniveau.

Gødningstilførselens betydning for N-nedvaskningen var flersidig. Nedvaskningen steg med stigende N-tilførsel, og stigningen var relativt stærkest ved den største N-tilførsel. Ved uændret sædskifte var der således større nedgang i N-nedvaskningen ved at reducere N-tilførslen fra et højt end fra et moderat niveau. Tilsvarende virkning af N-tilførslen er fundet i andre undersøgelser (2, 3 og 7).

N-nedvaskningen i efterårsmånederne var nogenlunde uafhængig af N-tilførslen (se fig. 5). Jorden skal opfyldes til markkapacitet, inden der sker væsentlig afstrømning. Derefter afstrømmer hele nettonedbøren (nedbør ÷ fordampning). N-mineraliseringen sker overvejende i de øvre jordlag. Disse var sandsynligvis stærkere udtørret med stigende N-tilførsel pga. større vandforbrug. Som følge heraf var opfyldning til markkapacitet samt N-mineralisering formodentlig forsinket i de N-gødede led i forhold til ugødede led.

Først når markkapacitet blev opnået, og N-mineraliseringen havde et vist omfang, påvirkede N-niveauet afgørende nedvaskningen.

Tilførslen af K påvirkede også N-nedvaskningen, idet stigningen var stærkest i led uden K-tilførsel (se fig. 3 og tabel 7).

*En balanceret næringsstofftilførsel bidrog således til den relativt mindste N-nedvaskning.* Eksempelvis kunne K-tilførsel til en K-manglende afgrøde, som var gødsket med normale N-mængder, nedsætte N-nedvaskningen.

Afstrømningens betydning for N-nedvaskningen er veldokumenteret (bl.a. 1, 3, 7 og 8), men også nedvaskningen af de øvrige næringsstoffer varierede de fleste år i overensstemmelse med afstrømningen (se fig. 6).

Koncentrationen af de enkelte næringsstoffer i afstrømningsvandet var generelt faldende i år med stor afstrømning, og stigende i år med lille afstrømning (se fig. 7). Dette forhold var dog ikke tilstrækkeligt til at eliminere afstrømningens indflydelse på nedvaskningen. En stigende afstrøm-

ning kan have en vis fortyndingseffekt, men dette kan modvirkes, fx ved, at en øget kontakt mellem vand og næringsstofferne i jorden bringer større mængder næringsstof i opløsning.

Næringsstofftilførselens størrelse og kombination påvirkede nedvaskningen af flere næringsstoffer, heriblandt følgestoffer i gødningerne (se tabel 9–13). Som tidligere anført for N havde en balanceret næringsstofftilførsel og -kombination betydning for en minimering af nedvaskningen af flere næringsstoffer.

## Litteratur

1. Benetzen, F. 1978. Vandbalance og kvælstofbalance ved optimal planteproduktion. 3. Modeller og resultater. Tidsskr. Planteavl 82, 191-220.
2. Gutser, R., Heyn, J., Amberger, A. & Brüne, H. 1987. Zur Stickstoff- und Mineralstoffauswaschung aus Lössboden. Ergebnissen von Lysimeterversuchen in Darmstadt und Weihenstephan. Landwirtsch. Forschung 40, 312-325.
3. Kjellerup, V. 1983. Kvælstofgødskningens indflydelse på drænvandets indhold af nitratkvælstof 1973–81. Statens Planteavlsforsøg, Meddelelse nr. 1736.
4. Kjellerup, V. & Kofoed, A. Dam 1983. Kvælstofgødskningens indflydelse på udvaskning af plantenæringsstoffer fra jorden. Lysimeterforsøg med anvendelse af <sup>15</sup>N. Tidsskr. Planteavl 87, 1-22.
5. Klausen, P. Søndergård & Hansen, J. F. 1988. Lysimeterforsøg med kombinationer af kvælstof, fosfor og kalium i handelsgødning. I. Udbytte og næringsstoffoptagelse. Tidsskr. Planteavl 92, 249-263.
6. Olesen, J. E. 1988. Jordbrugsmeteorologisk årsoversigt 1987. Statens Planteavlsforsøg, Beretning nr. S 1924.
7. Pedersen, E. Frimodt 1983. Drænvandsundersøgelser 1971–81. Statens Planteavlsforsøg, Beretning nr. S 1704.
8. Simmelsgaard, Sv. E. 1985. Vandbalance og kvælstofudvaskning på 4 jordtyper. III. Kvælstofkoncentration, -udvaskning og -balance. Tidsskr. Planteavl 89, 133-154.

Manuskript modtaget den 29. august 1989.