

Vandbalance og kvælstofbalance ved optimal planteproduktion

Water-balance and nitrogen-balance by optimal plant-production

3. Modeller og resultater

3. Models and results

F. Bennetzen

INDHOLDSFORTEGNELSE

	Side
1. Sammen drag	192
2. Summary	192
3. Indledning	193
4. Metoder og modeller	193
4.1. Vandbalanceligningen	193
4.2. Hydraulisk potential	194
4.3. Jordens vandindhold	195
4.4. Jordens ledningsevne for vand	196
4.5. Grundvandstandsmålinger	196
4.6. Kvælstofbalance og kvælstoftransport i jorden	196
5. Resultater og diskussion	197
5.1. Udbytter	197
5.2. Vandbalance	199
5.3. Planternes vandforbrug	201
5.4. Jordens vandindhold og tension	204
5.5. Vandbevægelse i jorden	205
5.5.1. Vandbevægelse over grundvandet	205
5.5.1.1. Vandets bevægelsesretning	205
5.5.1.2. Hydraulisk ledningsevne	207
5.5.2. Grundvandstand og grundvandsbevægelse	208
5.6. Kvælstofbalancen	210
5.7. Kvælstofudvaskning	211
6. Beregning af nitratudvaskning	215
7. Afsluttende diskussion	216
8. Konklusion	218
9. Erkendtlighed	219
10. Litteratur	219

1. Sammendrag

På sandjord ved Jyndeved og lerjord ved Åbenrå er der i årene 1974–76 gennemført undersøgelser af afstrømning, planternes vandforbrug og nitratudvaskning fra vandet og uvandet korn og græs.

I denne beretning gennemgås de modeller, der er anvendt ved beregningerne, og de første 3 års resultater præsenteres.

Vanding af afgrøderne medfører både større fordampning og større afstrømning. 70–80 pct. af vandingsvandet fordamper. Resten afstrømmer. Vandforbruget i vandet græs har været godt 3 mm pr. hkg tørstof pr. ha. I vandet vårsæd på sandjord og uvandet vårsæd på lerjord har forbruget været godt 6 mm vand pr. hkg kerne pr. ha. I de uvandede afgrøder på sandjord har vandforbruget pr. afgrødeenhed været væsentlig større.

Planterne har maksimalt brugt 65–80 mm vand fra jorden på sandjord og 125–140 mm på lerjord. Maksimal roddybde for henholdsvis sand- og lerjord var 100 og 170 cm.

Der udvaskes mere nitrat fra planternes rodzone på sandjord end på lerjord.

Der udvaskes væsentlig mere nitrat fra kornafgrøder end fra græsafgrøder. Den primære årsag hertil er, at der efter kornhøsten ingen afgrøder er til at udnytte den kvælstofmængde, som frigøres ved mineralisering af rod- og stubrester.

Under normale vækstbetingelser er næsten alt gødningskvælstoffet i jorden brugt ved vækstperiodens afslutning. Kun når plantevæksten standses f.eks. på grund af tørke, kan der ske direkte udvaskning af gødningskvælstof.

Der kan ikke generaliseres ud fra de fundne udvaskningstal fra 1975 og 1976 på grund af det tørre, varme klima i begge vækstperioder. Udvasningstallene er sandsynligvis højere end normalt.

Nøgleord: Vandbalance, planternes vandforbrug, afstrømning, kvælstofbalance, nitratudvaskning.

2. Summary

On coarse sand and clay loam soils the plants' water extraction from the soil, the discharge of water and the leaching of nitrate have been investigated. The investigations are carried out in irrigated and not irrigated grass and cereals.

In this paper are presented the used models, and the results of the first 3 years are discussed.

Irrigation of the crops will increase both the evapotranspiration and the discharge. – 70–80 per cent of irrigation-water will evaporate. Water-consumption in irrigated grass has been rather more than 3 mm per hkg dry matter per hectare. In irrigated spring cereals on coarse sand and not irrigated spring cereals on the clay loam the water-consumption has been rather more than 6 mm per hkg grain per hectare. In not irrigated crops the water-consumption per yield unit has been considerable greater.

Maximum water-extraction by plants from the soil has been 65–80 mm on the coarse sand and 125–140 mm on the clay loam. – Maximum root-depth on coarse sand and clay loam was 100 and 170 cm respectively.

Leaching of nitrate, out of the plants rooting zone is greater on the sand soil than on the clay soil, but the influence on the recipient may well be contrary, while all the discharged water on the sandy soil has to pass the soil to the ground-water.

Leaching of nitrogen is greater from cereal crops than from grass, because after harvest there is no crop to use the nitrogen released by mineralization of roots and stubbles.

The presented figures from 1975 and 1976 for nitrogen-leaching are presumable greater than usual because of the dry and warm growing seasons. – Therefore there is no basis for generalization from absolute values, but only from the tendency in the results.

Key words: Water-balance, water-extraction by plants, nitrogen-balance, nitrogen-leaching.

3. Indledning

I den første beretning fra nærværende projekt er der givet en generel omtale af næringsstofudvaskning. Desuden er forsøgsplan og forsøgsarealer beskrevet (Bennetzen 1978a). I den anden beretning er den anvendte teknik gennemgået i detaljer (Bennetzen 1978b).

I denne beretning behandles de anvendte beregningsmodeller, og de første 3 års resultater præsenteres.

Vandbalance kan defineres som nedbørens fordeling mellem fordampning, afstrømning til vandløb og nedsivning til grundvandet. – Vandbalanceopgørelser tjener flere formål. For det første kræves et nøje kendskab til vandbalancen for at beregne, hvor store mængder plantenæringsstoffer, der udvaskes fra jorden. For det andet giver vandbalanceopgørelsen mulighed for at beregne planternes vandforbrug fra jorden. F.eks. hvornår vandet bruges, fra hvilke dybder vandet hentes, og hvor meget vand jorden stiller til rådighed.

Gennemgangen af næringsstofudvaskning vil udelukkende blive koncentreret om kvælstof. I den første beretning er der refereret en del undersøgelser om kvælstofudvaskning. De refererede markundersøgelser handler kun om udvaskning med drænvand. Drænvand udgør imidlertid i gennemsnit kun godt en trediedel af afstrømningen fra de drænedde marker. De to trediedele strømmer uden om drænene direkte til vandløbene eller siver til grundvandet. – Det er vigtigt at finde frem til, om disse to trediedele har samme kvælstofkoncentration som drænvandet. I bekræftende fald ville det betyde, at udvaskningstallene fra drænvandsundersøgelserne skal multipliceres med 3 for at få den totale udvaskede mængde.

På sandjorde, som sædvanligvis ikke er drænedde, passerer hele afstrømningsmængden jorden til grundvandet og følger grundvandsstrømmen til vandløbene og havet.

Der foreligger ingen markundersøgelser til belysning af kvælstofudvaskning fra planternes rodzone på sandjord. – Udvasningsundersøgelser, som omfatter hele afstrømningsmængden fra planternes rodzone, er kun gennemført i lysimetre.

Det er vigtigt her at pege på, at de udvaskningstal, som fremkommer ved at regne med hele afstrømningsmængden – uanset om det drejer sig om lysimeterforsøg eller markundersøgelser – kun fortæller noget om, hvor meget kvælstof der udvaskes fra planternes rodzone og dermed om rodzonens kvælstofbalance. – De fortæller ikke umiddelbart noget om, hvor meget modtageren (recipienten) belastes, idet en del af nitratkvælstoffet under passagen gennem jorden vil blive omdannet til luftformigt kvælstof og forsvinde til atmosfæren (Lind og Pedersen 1975a og b).

4. Metoder og modeller

4.1. Vandbalanceligningen

Vandbalancen opstilles ud fra ugentlige målinger af mængden af nedbør og vanding, jordprofilens vandindhold og drænastrømning. – I figur 1 er vandbalancens led illustreret. I vækstperioden bruger planterne vand, og der sker en udtørring af jorden i rodzonen. Vandet bevæger sig opad gennem jord og planter. Under planternes rodzone vil der være en langsom nedadgående vandbevægelse, som aftager med vandindholdet. Niveaulet mellem opad- og nedadgående vandbevægelse benævnes »vandskellet«, Z_v , og angives i cm under jordoverfladen. – Vandskellets beliggenhed gennem vækstperioden er bestemt ud fra jordens hydrauliske potential (se afsnit 4.2.), som måles med tensiometre. – Ved balanceopgørelsen skelnes der mellem perioder med aktiv rodzone ($Z_v > 0$) og perioder uden aktiv rodzone ($Z_v = 0$). – I begyndelsen af vækstperioden er Z_v lille. Det forskydes gradvist nedad i løbet af vækstperioden.

Når $Z_v > 0$, bestemmes den aktuelle fordampning, E_a ud fra nedbør, vanding og ændringen i rodzonens vandindhold, $\Delta R (0-Z_v)$. – Konstatere der en stigning i vandindholdet i den ikke vandmættede zone under rodzonen, skal denne trækkes fra E_a , idet rodzonen i den forløbne uge da må have været overmættet. Den ikke vandmættede zone under rodzonen regnes fra Z_v til G_k , som er grundvandstand plus kapillær vandstigning. – Sædvanligvis regnes vandet først som afstrømmet, når det har nået grundvandet, d.v.s. under niveauet G_k . Det betyder, at afstrømningen, A_v er lig med nedgangen i jordens vandind-

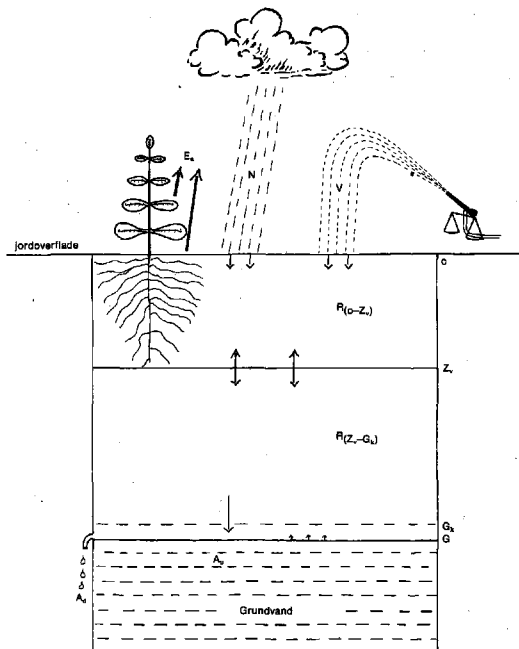


Fig. 1. Vandbalance
Water-balance

E_a : evapotranspiration, N : nedbør, V : vanding, Z_v : rodzone dybde («vandskel»), G : grundvandstand, G_k : kapillær vandstigning, R : jordens vandindhold, A_d : drænaftstrømning, A_u : afstrømning til grundvand, \uparrow : vandbevægelse

E_a : evapotranspiration, N : precipitation, V : irrigation, Z_v : »zero flux plane«, G : groundwater table, G_k : capillary rise, R : soil water, A_d : discharge through drainsystem, A_u : seepage water, \uparrow : water movement

hold fra Z_v til G_k . Når vandindholdet fra Z_v til G_k stiger, sættes A_u lig 0. Det giver en lille fejl, idet der samtidig med, at der er en stigning i vandindholdet fra Z_v til G_k , vil være en lille afgang af vand. Fejlen er som regel ubetydelig, men kan i nedbørsrige perioder blive for stor. Den afhjælpes ved aldrig at tillade E_a at blive større end $E_p + 2$ mm pr. uge. E_p er potentiel fordampning målt med en fordampningsmåler med 0,315 m² overfladeareal. Der er anvendt de korrektionsfaktorer, som er angivet af *Aslyng* (1976). For perioden december til marts anvendes faktoren 0,7. At tillade E_a at blive større end E_p burde være et paradoks. *Kristensen* (1974) har imidlertid fundet, at E_a kan blive større end E_p i perioder, hvor afgrø-

den har et stort bladareal. De 2 mm pr. uge er skønnet ud fra *Kristensens* resultater.

Når E_a overskrider størrelsen $E_p + 2$ mm pr. uge eller når $Z_v = 0$, sættes $E_a = E_p$, og A_u beregnes som differens. - Ovennævnte metode kan udtrykkes i følgende ligninger (se fig. 1):

$$R(0-Z_v) = R_1$$

$$R(Z_v-G_k) = R_2$$

For $Z_v > 0$:

$$\Delta R_2 < 0 \Rightarrow A_u = |\Delta R_2| - A_d$$

$$\Delta R_2 > 0 \Rightarrow A_u = 0$$

$$E_a = N + V - \Delta R_1 - \Delta R_2 - A_u - A_d$$

hvis $E_a > E_p + 2$ mm pr. uge

eller $Z_v = 0$:

$$E_a = E_p$$

$$A_u = N + V - E_a - \Delta R_1 - \Delta R_2 - A_d$$

hvor E_a = Aktuell fordampning, mm

E_p = Potentiel fordampning, mm

N = Nedbør, mm

V = Vanding, mm

A_u = Afstrømning til grundvand, mm

A_d = Drænaftstrømning, mm

ΔR = Ændring i jordens vandindhold, mm

Z_v = Vandskel mellem opad- og nedadgående vandbevægelse, cm

G_k = Grundvandstand plus kapillær vandstigning, cm

Metoden er tilstrækkelig under de fleste forhold i marken. Metodens svageste led er tidspunktet, hvor jorden vandmættes til over markkapacitet i perioder, hvor betingelserne for potentiel fordampning ikke er til stede. Nøjagtig bestemmelse af E_a og A_u under disse betingelser kræver en væsentlig højere målefrekvens af jordens hydrauliske potential og vandindhold.

4.2. Hydraulisk potential

Jordens hydrauliske potential fortæller noget om vandets mulighed for bevægelse. Jordvandets bevægelsesretning går altid fra steder med højt til steder med lavt potential.

Det antages, at næringsstofkoncentrationen i jorden er så ensartet, at der kan ses bort fra det osmotiske potential. Jordens hydrauliske potential er da alene summen af tryk- og gravitationspotentialet. Trykpotentialet er målt med tensiometre anbragt med dybdeintervaller på 20 cm fra 20 cm til 200 cm dybde samt i 240 og 320 cm dybde.

I figur 2 er vist et eksempel på en jordprofils hydrauliske potential på et tidspunkt i vækstsæsonen. Potentialt er angivet i forhold til jordoverfladen således at gravitationspotentialt er negativt. Potentialt er beregnet efter ligningen:

$$\psi_h = -\psi_p - z$$

- hvor ψ_h = hydraulisk potential, cm vandsøjle
 ψ_p = tension, cm vandsøjle
 z = dybde under jordoverfladen, cm

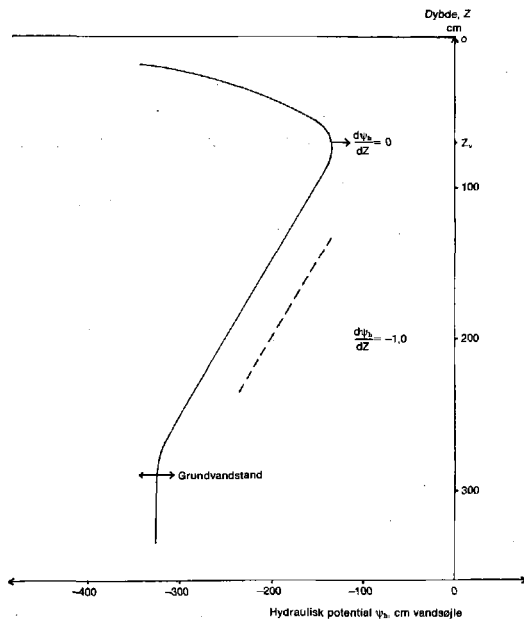


Fig. 2. Hydraulisk potential
 Hydraulic potential profile
 $\frac{d\psi_h}{dz}$ = Hydraulisk gradient Z_v = »vandskel«
 Hydraulic gradient »zero flux plane«

En grafisk fremstilling, som vist i figur 2, kan bl.a. anvendes til at lokalisere den dybde (eller de dybder), hvor den hydrauliske gradient er 0. Da nettovandstrømmen over enten et maximum eller minimum punkt på kurven er 0, vil denne dybde (disse dybder) repræsentere »vandskel« for vandbevægelse. På engelsk benævnes disse »zero flux plan« (McGowan, 1974).

4.3. Jordens vandindhold

Jordens vandindhold er målt efter neutronspretningsmetoden (Haahr, 1963). Der er målt i 3–7 rør pr. forsøgsled i 10 cm dybde og derefter med 20 cm intervaller fra 20 til 240 cm dybde samt tre dybder i grundvandet.

For målingen i 10 cm dybde på sandjorden er der foretaget en markkalibrering, som anført af Kristensen (1973). Sideløbende med målingerne er der udtaget jordprøver til vandbestemmelse. Prøveudtagningerne blev udført ved et vandindhold i jorden spændende fra 7 til 20 vol.pct. Der fandtes følgende lineære sammenhæng mellem tælletal og vandindholdet:

$$y = 0,00178 \cdot x - 6,3 \quad r = 0,99$$

hvor y = vol.pct. vand

x = tællertallet fra neutronmålingerne

For de øvrige dybder og for lerjorden anvendes standardkalibreringskurver.

Der er målt i grundvandet i flere dybder regelmæssigt gennem 3 år for at få et udtryk for målingernes sikkerhed. – I grundvandet er vandindholdet konstant, og en eventuel variation i tællertallet ved neutronmålingerne må være et udtryk for målingernes samlede fejl. Spredningen for alle målerør og -dybder var mindre end 0,5 vol.pct. vand. Volumenprocent vand i grundvandet skal være lig med volumenprocent porer, som er beregnet ud fra jordpartiklernes massefylde og jordens volumenvægt. Jordens volumenvægt er bestemt ved gammastråling (Engman, 1963). I sandjorden ved Jyndeved er der rimelig overensstemmelse mellem fundet volumenprocent vand og volumenprocent porer. I lerjorden ved Åbenrå er det fundne vandindhold for lavt. Det er ikke undersøgt, om en eventuel niveauforskydning på

måleresultatet fra grundvandet kan overføres til målingerne ved et lavere vandindhold.

4.4. Jordens ledningsevne for vand

Jordens evne til at bortlede vand – jordens hydrauliske ledningsevne – er målt på jordprøver i laboratoriet efter samme metode som beskrevet af *Rasmussen* (1976). Metoden gælder kun for vandbevægelse i vandfyldt jord.

4.5. Grundvandstandsmålinger

For at kunne beregne, hvor hurtigt grundvandet bevæger sig, må man have kendskab til grundvandets højdeforhold i flere punkter.

På sandjordsarealet pejles grundvandet i 14 punkter fordelt over 12 ha med forsøgsmarken beliggende i midten. I de fleste rør er der pejlet manuelt med ugeintervaller. I enkelte rør er der placeret grundvandstandsmålere, som registrerer vandstanden på en skriver. På lerjorden er grundvandsforholdene mere komplicerede. Det egentlige dybtliggende grundvandsspejls beliggenhed er registreret kontinuerligt på en skriver. Det højstliggende sekundære grundvandsspejl pejles manuelt ugentlig i 36 punkter fordelt på tværs af dræningerne.

På lerjorden og i frostperioder på sandjorden er det nødvendigt at korrigere den målte grundvandstand for barometerudsving. Årsagen er, at der findes et tæt lag i jorden, således at der ikke kan finde en trykudligning sted ved ændringer i lufttrykket. Stigende lufttryk medfører, at den observerede grundvandstand er for lav og omvendt ved faldende tryk.

Korrekturen foretages som beskrevet af *Andersen* og *Haman* (1970):

Grundvandstanden pejles flere gange inden for en kort periode, f.eks. et døgn, hvor den reelle grundvandsstand kan antages at være uændret. Samtidig måles barometerstanden. Barometereffekten i pct. beregnes først:

$$BE = \frac{\Delta W \cdot 100}{\Delta P \cdot 1,36}, \text{ pct.}$$

Herefter kan korrekturen i cm beregnes, når barometerstanden kendes:

$$W_k = \frac{BE \cdot (760 - P) \cdot 1,36}{100}$$

hvor ΔW = vandstandsændring, cm
 ΔP = lufttryksændring, mm Hg
 BE = barometereffekt, pct.
 P = lufttryk, mm Hg
 W_k = vandstandskorrektion, cm

4.6. Kvælstofbalance og kvælstoftransport i jorden

Kvælstofbalancen opstilles efter følgende ligning:

$$N_{\text{tilf.}} - N_{\text{høstet}} - N_{\text{udvasket}} - \Delta N_{\text{jordvæske}} - \Delta N_{\text{lager}} = 0$$

Tilført kvælstof i gødning, nedbør og vandingsvand samt kvælstof, som bortføres med den høstede afgrøde, er bestemt direkte. Udvaske kvælstof såvel til grundvand som til vandløb er bestemt ved at måle den afstrømmede vandmængde og vandets kvælstofkoncentration. Fjerde led er ændringen i jordens opløste N-fraktion. Ledet svarer til den plantetilgængelige N-mængde og udgøres overvejende af nitrat. Størrelsen er bestemt ved at måle jordprofilens vandindhold og vandets kvælstofkoncentration ved begyndelsen og afslutningen af den betragtede periode. – Ligningens sidste led bestemmes som differens. Ud over at omfatte ændringen i jordens store organiske kvælstoflager er det »samlede« for de omsætninger, som er vanskelige at bestemme. Det gælder biologisk kvælstofbinding, ammoniakfordampning og nitratreduktion.

Ved beregning af kvælstofudvaskningen antages, at nitrat bevæger sig i jorden med samme hastighed som vandet.

Det skal nævnes, at der findes flere undersøgelser, som afviger fra denne antagelse. *Thomas* og *Swoboda* (1970) og *Hansen* (1974) har fundet, at klorid- og nitrater bevæger sig 10–30 pct. hurtigere end vandet gennem jorden. Det angives, at forskellen skyldes elektriske kræfter i jorden. Anionerne udelukkes fra de negativt ladede kolloidoverflader, og samtidig er strømmingen i vandet meget langsom i det elektriske dobbeltlag om-

kring lerkolloiderne. Lav ionkoncentration betyder et tykt dobbeltlag og dermed en stor forskel på vandets og nitrats bevægelseshastighed.

Burns (1975 og 1976) har fundet, at nitrat gennemsnitligt bevæger sig 30 pct. langsommere end jordvandet. – Årsagen angives at være, at en stor del af vandet fra kraftig nedbør vil strømme gennem de store porer og revner i jorden, således at der ikke opnås ligevægt med vandet i de små porer, som har en højere koncentration af nitrat end regnvandet.

Begge teorier er givetvis rigtige, men med forskellige forudsætninger med hensyn til jordens homogenitet og afstrømningsintensiteten. Under praktiske forhold i markundersøgelser er det fundet rimeligst at anvende en mellemtung mellem de to teorier og antage, at nitrat i gennemsnit bevæger sig med samme hastighed som vandet.

Udvaskningen beregnes efter følgende ligning:

$$U = \frac{A_z \cdot C_z}{100}$$

hvor U = udvaskning, kg pr. ha pr. uge
 A_z = afstrømning under dybden z, mm pr. uge
 C_z = koncentration af $\text{NO}_3\text{-N}$ i dybden z, ppm. Gennemsnit pr. uge

På lerjord sættes z lig med 200 cm og på sandjord sædvanligvis med 180 cm, men i perioder med høj grundvandstand mindre.

5. Resultater og diskussion

I dette afsnit behandles resultaterne af både vandbalance- og kvælstofbalanceundersøgelserne. Talmaterialet må betragtes som foreløbigt, idet en del af undersøgelserne fortsætter i 1977/78. Det tørre, varme klima i somrene 1975 og 1976 har betydet usædvanlige vækstbetingelser, og det ville derfor være forkert at generalisere ud fra de eksakte talværdier.

5.1. Udbytter

I tabel 1 er udbytteresultaterne anført. 1974 var startåret, hvor arealerne blev forberedt for de ønskede afgrøder. På åbenråmarken var der afgræsningsgræs, som blev pløjet i efteråret. På jyndevadmarken var der rug med græsudlæg i 2 forsøgsled. Der høstedes et efterslæt på nogle få hkg i udlægsmarkerne.

Jyndevad: I den vandede græsmark er der høstet store udbytter både i 1975 og 1976. I den uvandede græsmark standsede græsvæksten efter 1. slæt. 2. og 3. slæt høstedes ikke, og 4. slæt gav på grund af de tørkebeskadede planter et ringe udbytte, især i 1976. Bygudbyttet var lavt i 1975

Tabel 1. Udbytte af korn og græs. Hkg pr. ha
Yields of cereals and grass. Hkg per hectare

Sted	Afgrøde	År	Kerne		Halm		Græs tørstof	
			Vandet	Uvandet	Vandet	Uvandet	Vandet	Uvandet
Jyndevad	Rug m. udlæg	1974	39,7	35,1	52,2	34,5	4,2	1,2
	Rug	1974	38,2	31,8	38,6	24,0		
	Byg / Græs	1975	34,6	7,1	31,8	9,8	148,6	65,4
	Byg / Græs	1976	47,4	18,9	39,0	25,0	147,0	51,9
Åbenrå	Havre	1975		39,0		43,6		
	Hvede	1976		49,6		103,2		

både i vandet og uvandet. I 1976 opnåedes et stort udbytte i den vandede mark.

Åbenrå: Havreudbyttet i 1975 var ret lavt. I 1976 opnåedes et nogenlunde udbytte i vinterhveden på trods af tørken.

5.2. Vandbalance

I tabel 2 er vist vandbalancen i mm pr. år. Der er regnet med et hydrologisk år fra april til april. Der er anført resultater for tre år, men kun regnet gennemsnit på de to sidste år, idet der mangler

Tabel 2. Vandbalance, mm. Opgjort på ugebasis og summeret fra april til april.

*Fra 8.5.74. Græs 1974-75 er rug med græsudlæg

Water-balance, mm. Calculated weekly and summed up from April to April.

*From 8.5.74. Grass 1974-75 is rye as cover crop undersown with clover

Sted	Led	År	For- dampning ΣE_a	Nedbør ΣN	Vanding ΣV	Ændring i vand- indhold ΔR	Afstrømning under- jordisk A_u	dræn A_d
Jynde- Sandjod	Græs vandet	*1974/75	374	905	95	28	598	-
		1975/76	504	702	254	-3	455	-
		1976/77	546	645	350	1	448	-
	Gns.	1975/77	525	674	302	-1	452	-
Jynde- Sandjod	Græs uvandet	*1974/75	337	905	0	14	554	-
		1975/76	340	702	0	-5	367	-
		1976/77	283	645	0	-4	366	-
	Gns.	1975/77	311	674	0	-4	367	-
Jynde- Sandjod	Korn vandet	*1974/75	365	905	95	28	607	-
		1975/76	398	702	87	-17	408	-
		1976/77	397	645	152	8	392	-
	Gns.	1975-77	398	674	119	-5	400	-
Jynde- Sandjod	Korn uvandet	*1974/75	330	905	0	14	561	-
		1975/76	327	702	0	-7	382	-
		1976/77	280	645	0	0	365	-
	Gns.	1975/77	304	674	0	-4	374	-
Åbenrå Lerjord	Korn uvandet	1975/76	388	656	0	0	94	174
		1976/77	335	616	0	-12	99	194
	Gns.	1975/77	361	636	0	-6	97	184

resultater for de første fem uger, og desuden var græsmarkerne ikke etablerede i 1974. Den aktuelle fordampning har i de vandede forsøgsled været af samme størrelsesorden i 1975 og 1976. I gennemsnit 525 mm for græsmarken og 398 mm for kornmarken for hele året. Fordampningen fra de uvandede forsøgsled har været 50-60 mm mindre i 1976 end i 1975, men der er også faldet godt 100 mm nedbør mindre i vækstperioden 1976 end i vækstperioden 1975. I gennemsnit af 1975 og 1976 er der tilført 302 mm vandingsvand til græs og 119 mm til korn. Heraf er henholdsvis 214 mm og 94 mm fordampet, resten er afstrømmet til grundvandet. Det svarer til en fordampning på

70-80 pct. af det tilførte vand. I tabel 3 er resultaterne for vækstperioden april til oktober anført for 1975 og 1976. Den aktuelle fordampning i vinterhalvåret, oktober til april, er i gennemsnit fundet at være 68 mm med en variation mellem årene fra 58 til 80 mm. Variationen mellem forsøgsledene er lille, maksimal 5 mm.

Af tabel 3 fremgår, at jorden i tre forsøgsled i Jynde vad i oktober 1975 har været mættet til over markkapacitet. Det skyldes, at der faldt 134 mm nedbør i september. I åbenråmarken er der stadigvæk et underskud, hvilket skyldes jordens større markkapacitet.

I 1976 er der 1. oktober i alle forsøgsled stadig

Tabel 3. Vandbalance, mm. Opgjort på ugebasis og summeret fra 1. april til 1. oktober
Water-balance, mm. Calculated weekly and summed up from April to October

Sted	Led	År	For- dampning ΣE_a	Nedbør ΣN	Vanding ΣV	Ændring i vand- indhold ΔR	Afstrømning under- jordisk A_u	dræn A_d
Jynde- vad Sandjord	Græs vandet	1975	445	364	254	21	152	-
		1976	476	230	350	- 10	114	-
		Gns.	460	297	302	+ 6	133	-
Jynde- vad Sandjord	Græs uvandet	1975	285	364	0	- 1	80	-
		1976	217	230	0	- 49	62	-
		Gns.	251	297	0	- 25	71	-
Jynde- vad Sandjord	Korn vandet	1975	338	364	87	32	81	-
		1976	327	230	152	- 15	70	-
		Gns.	332	297	119	8	76	-
Jynde- vad Sandjord	Korn uvandet	1975	268	364	0	36	60	-
		1976	215	230	0	- 40	55	-
		Gns.	241	297	0	- 2	58	-
Åbenrå Lerjord	Korn uvandet	1975	323	321	0	- 82	47	33
		1976	270	212	0	-127	54	15
		Gns.	297	267	0	-105	51	24

et vandunderskud i jorden, idet septembernedbøren kun var 46 mm. At tabel 2 fremgår, at fra april til april er ændringen i jordens vandindhold ubetydelig, når det tages i betragtning, at ændringen gælder hele jordlaget fra jordoverfladen til grundvandsspejlet.

Afstrømningen vil altid være større fra vandede afgrøder end fra uvandede, fordi vandunderskuddet eller udtørringen i jorden er mindre i den vandede jord end i den uvandede. Endvidere er der en risiko for, at vandingen overskrider jordens markkapacitet og medfører afstrømning. Det fremgår af tabel 2 og 3, at afstrømningen både sommer og vinter har været størst fra de vandede forsøgsled.

I Åbenrå er afstrømningen fordelt mellem drænastrømning og underjordisk afstrømning. Afstrømningen har i de to anførte år været af samme størrelsesorden. Omkring 65 pct. af af-

strømningen er strømmet gennem drænsystemet. Det er en lidt større procentandel end man sædvanligvis forventer. Det skyldes, at åbenråmarken er en meget svær lerjord. Ved sammenligning af tabel 2 og 3 ses, at den underjordiske afstrømning har været lige så stor i sommerhalvåret som i vinterhalvåret. I 1974 var tendensen den samme, men drænastrømningen var næsten 3 gange så stor som i 1975 og 1976 på grund af en stor nedbørsmængde på næsten 1000 mm. Det betød, at drænastrømningen udgjorde godt 85 pct. af afstrømningen. 1974-resultaterne for åbenråarealet er ikke medtaget i tabellerne dels på grund af, at forsøgene først blev startet sidst i juni måned og dels på grund af nogle tekniske vanskeligheder i det ekstremt fugtige efterår 1974.

I figurerne 3-6 er vandbalancens led vist for sommerhalvåret plus 1. halvdel af oktober måned. Som eksempel er valgt de fire forsøgsled i

Jyndeved for 1975. Abcissen er en tidsakse og ordinaten mm pr. uge. Øverst i figurene er angivet nedbør og vanding. Mængden af vandingsvand er angivet med nogle små v'er i histogrammet. I venstre side af figuren er dybderne i jorden angivet. 0 svarer til jordoverfladen, 10 svarer til græselaget 10 cm o.s.v. Nettovandtransporten i mm pr. uge over græselagene 10, 50, 90 og 130 cm er anført. Det skraverede histogram over græselagene angiver den opadgående vandbevægelse, og histogrammet under græselagene angiver den nedadgående vandbevægelse. Histogrammet over 0-linien angiver fordampningen. Den skraverede del svarer til den del af det fordampede vand, som stammer fra jorden.

Af figur 3 og 4, som er henholdsvis vandet og uvandet græs, fremgår, at planterne ikke har fået

nogen nævneværdig vandforsyning fra jordlagene under 90 cm. Ved nogle af vandingerne, figur 3, er jorden blevet mættet til over markkapacitet, og der er foregået en afstrømning ned under rodzonen. Det er sket midt i maj, midt i juni og sidst i august måned. I maj og august er den primære årsag, at der er faldet nedbør i samme uge, som der er vandet i. Septembernedbøren er i den uvandede mark blevet tilbageholdt i jorden i den udtørrede rodzone. I den vandede mark har septembernedbøren givet anledning til afstrømning under rodzonen.

Figur 5 og 6 viser forholdene for vandet og uvandet korn. Største dybde, kornplanterne har hentet vand fra, er omkring 90 cm. Ingen af vandingerne har givet anledning til afstrømning. Også i den uvandede kornmark er det meste af septem-

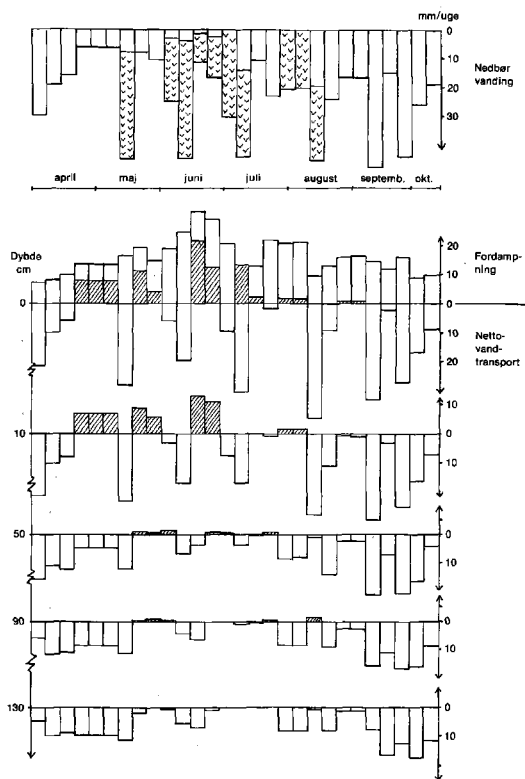


Fig. 3. Nedbør, vanding, fordampning og afstrømning. Vandet græs. Sandjord, Jyndeved 1975. Precipitation, irrigation, evapotranspiration and seepage, mm per week. Irrigated grass. Coarse sand, 1975

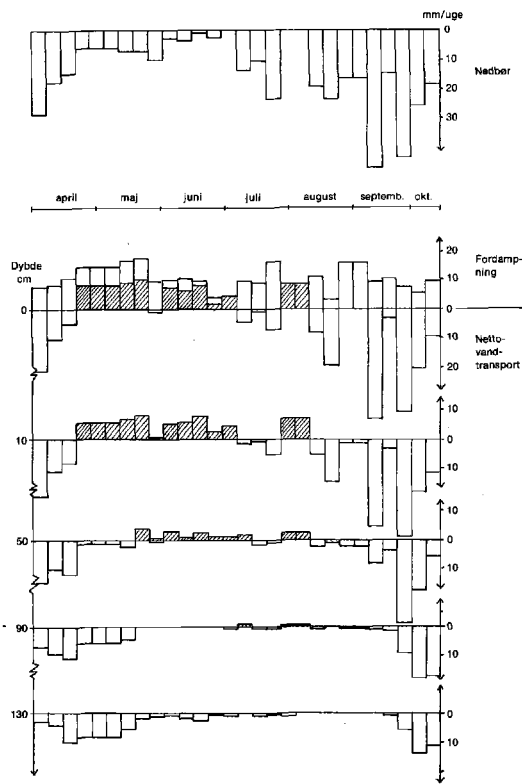


Fig. 4. Nedbør, fordampning og afstrømning. Uvandet græs. Sandjord, Jyndeved 1975. Precipitation, evapotranspiration and seepage, mm per week. Not irrigated grass. Coarse sand 1975

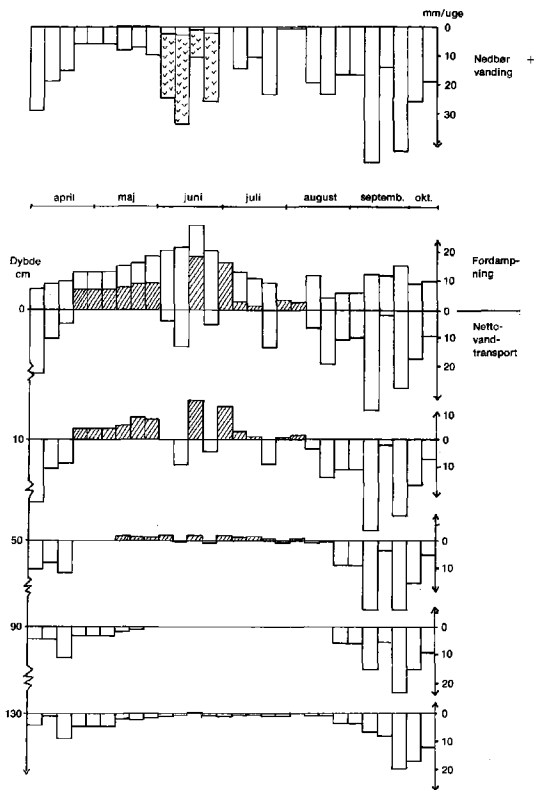


Fig. 5. Nedbør, vanding, fordampning og afstrømning. Vandet korn. Sandjord, Jyndevad 1975. *Precipitation, irrigation, evapotranspiration and seepage, mm per week. Irrigated cereal. Coarse sand, 1975.*

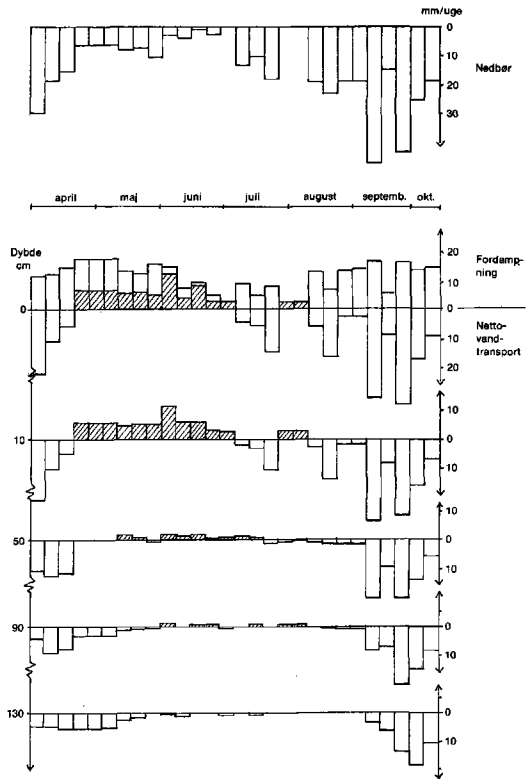


Fig. 6. Nedbør, fordampning og afstrømning. Uvandet korn. Sandjord, Jyndevad 1975. *Precipitation, evapotranspiration and seepage, mm per week. Not irrigated cereal. Coarse sand, 1975*

bernedbøren blevet tilbageholdt i planternes rodzone i modsætning til den vandede kornmark.

I figur 7 er som eksempel vist forholdene i vinterhalvåret 1975/76 for den vandede kornmark i Jyndevad. Eksemplet er repræsentativt for dette år, idet der ingen nævneværdig forskel er på forsøgsleddene. Det bemærkes, at ordinatværdierne er halveret i forhold til figurerne 3–6. I hele den viste periode ligger jordens vandindhold på markkapacitet eller derover. Alligevel virker jorden som en slags stødpude for overskudsnedbøren. Det gælder f.eks. de nedbørsmængder, der er faldet sidst i november og først i januar måned. I de øverste lag er vandet strømmet igennem, samme uge som nedbøren er faldet. Ved grænselaget 70 cm er afstrømningen forsinket en uge, og

ved 150 cm er en del af afstrømningen forsinket 2 uger.

5.3. Planternes vandforbrug

Planternes vandforbrug bestemmes bl.a. af klimaet og planternes vandforsyning i vækstperioden. Klimaet bestemmer den vandmængde, der maksimalt kan fordampe fra en afgrøde, der er velforsynet med vand. Vandforsyningen i vækstperioden bestemmer, hvor tæt forbruget ligger på det maksimale forbrug. Forholdet mellem aktuel, E_a og potentiel fordampning, E_p er et udtryk for, hvor godt planterne har været forsynet med vand. Er E_a lige så stor som E_p , har vandforsyningen været optimal. Vandforsyningen kan også være optimal, selv om E_a er mindre end E_p , hvis betin-

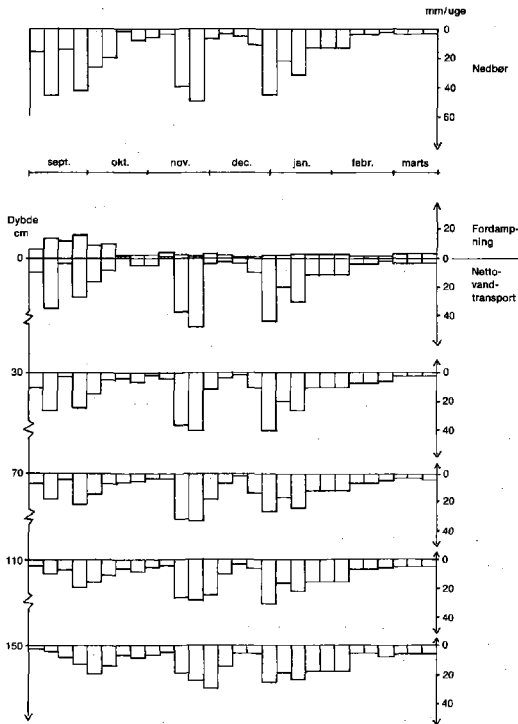


Fig. 7. Nedbør, fordampning og afstrømning i vinterhalvåret. Vandet korn. Sandjord, Jyndeved 1975/76. *Precipitation, evapotranspiration and seepage in winter, mm per week. Irrigated cereal. Coarse sand. 1975/76*

gelserne for potentiel fordampning ikke er til stede. Det er f.eks. tilfældet efter slæt i græsafgrøder og i begyndelsen og slutningen af en kornafgrødes vækstsæson.

I tabel 4 er givet en oversigt over planternes vandforbrug i 1975 og 1976. Bortset fra 1. slæt i græs i 1975 har aktuel fordampning i alle tilfælde været mindre end potentiel. Vækstperioden i 1975 og 1976 var varm og tør, og den potentielle fordampning var derfor høj. Beregnet for vækstperioden var aktuel fordampning i gennemsnit for vandet græs knap 90 pct. af potentiel både i 1975 og 1976. For vandet korn på sandjorden og uvandet på lerjorden var E_a omkring 70 pct. af E_p i perioden fra såning til høst. I de uvandede forsøgsled er fordampningen stærkt nedsat på grund af udtørring af jorden.

Yderst til højre i tabellen er vist en beregning af

den aktuelle fordampning i forhold til udbyttet. I vandet græs er der i gennemsnit brugt godt 3 mm pr. hkg græstørstof. I uvandet græs er kun 1. og 4. slæt høstet. Græsset var rigtignok i vækst både før 2. og 3. slæt, men på slættidspunktet var afgrøden tørret helt væk. Det har medført, at vandforbrug pr. hkg tørstof har været stort. – I vandet korn er der brugt 6,7 mm i 1975 og 5,7 mm i 1976 pr. hkg kerne. I uvandet korn har forbruget især været stort i 1975 på grund af en meget tørkeskadet afgrøde. På lerjorden i Åbenrå er der brugt 6,1 og 4,6 mm pr. hkg kerne i henholdsvis 1975 og 1976. I 1976 var der vinterhvede i Åbenrå. Det er formodentlig forklaringen på det relativt lave vandforbrug.

I tabel 5 er vist, hvor meget vand planterne maksimalt har været i stand til at bruge fra jorden. Tallene er angivet i mm for de øverste 10 cm og derunder i intervaller på 20 cm dybde. I tabellens højre halvdel er angivet, hvor stor en procentdel forbruget udgør af den plantetilgængelige vandmængde i den pågældende dybde. Resultaterne er angivet som gennemsnit af 1975 og 1976, idet der næsten ingen forskel var på tallene de to år. Kun i Åbenrå var der en lille forskel i vandforbruget på grund af en afgrødeforskel. I 1975 var afgrøden havre, og i 1976 var den vinterhvede. Vinterhveden brugte 16 mm vand mere fra jorden end havren.

Tallene for Jyndeved er fra de uvandede marker og svarer til den faktiske visnegrænse, idet afgrøderne begge år visnede væk. Udtørringen af jorden i Åbenrå var stærk, men afgrøderne visnede ikke. Det ses af tabellen, at jorden i Jyndeved har stillet 80 mm vand til rådighed for græs og 65 mm for korn. Den overvejende del er taget fra den øverste halve meter, men græsset har dog optaget 19 mm vand fra større dybde end 50 cm. Kornet har optaget ca. 10 mm under 50 cm dybde. I Åbenrå har afgrøden ialt optaget godt 130 mm fra jorden med den overvejende del fra de øverste 90 cm. Der er optaget 22 mm fra større dybde end 90 cm.

Det fremgår af tabellens højre halvdel, at planterne kun er i stand til at udnytte hele den plantetilgængelige vandmængde i de øverste 30–40 cm på sandjorden og 50–60 cm på lerjorden. Procent-

Tabel 4. Fordampning, mm, udbytte af græs, hkg tørstof/ha, udbytte af korn, hkg kerne/ha og vandforbrug i mm/hkg. 1975-76.

V - vandet UV - uvandet

Evapotranspiration, mm, yield of grass, hkg dry matter per hectare, yield of cereals, hkg grain per hectare and water consumption, mm per hkg. 1975-76. V - irrigated UV - not irrigated

Sted	Led	År	Slæt dato/ Periode	Antal dage	Potent. fordamp. Ep	Aktuel for-		Ea · 100		Ep mm/ dag	Ea		hkg/ha		mm/hkg		
						V	UV	V	UV		V	UV	V	UV	V	UV	
Jynde vad Sandjord	Græs	1975	27/5	55	110	110	109	100	99	2,0	2,0	2,0	46	34	2,4	3,2	
			15/7	49	174	154	57	89	33	3,6	3,1	1,2	47	0	3,3	-	
			26/8	42	129	105	57	81	44	3,1	2,5	1,4	33	0	3,2	-	
			15/10	50	110	95	77	86	70	2,2	1,9	1,5	23	31	4,1	2,5	
		1/4 ->	15/10	196	523	464	300	89	57	2,7	2,4	1,5	149	65	3,1	4,6	
Jynde vad Sandjord	Græs	1976	2/6	62	135	122	114	90	84	2,2	2,0	1,8	52	49	2,4	2,3	
			19/7	47	201	185	59	92	29	4,3	3,9	1,3	38	0	4,7	-	
			31/8	43	154	125	26	81	17	3,6	2,9	0,6	36	0	3,5	-	
			2/11	63	75	63	34	84	45	1,2	1,0	0,5	21	3	3,0	11,3	
		1/4 ->	2/11	215	565	495	233	88	41	2,6	2,3	1,1	147	52	3,4	4,5	
Jynde vad Sandjord	Korn	1975	22/4 ->	5/8	105	313	233	150	74	50	3,0	2,2	1,4	35	7	6,7	21,4
Jynde vad Sandjord	Korn	1976	16/4 ->	4/8	110	381	272	163	71	43	3,5	2,5	1,5	47	19	5,7	8,6
Åbenrå Lerjord	Korn	1975	22/4 ->	19/8	119	332	-	238	-	72	2,8	-	2,0	-	39	-	6,1
Åbenrå Lerjord	Korn	1976	1/4 ->	11/8	132	334	-	230	-	69	2,5	-	1,7	-	50	-	4,6

Tabel 5. Planternes maksimale vandforbrug i mm fra forskellige jordlag, og forbrug i procent af plantetilgængeligt vand. Gns. 1975-76

The plants water uptake from the soil. Maximum uptake in mm and uptake in per cent of plant available water. Average 1975-76

Dybde, cm	Max. forbrug fra jorden, mm			Forbrug i pct. af plantetilgængeligt vand		
	Jynde vad Græs	Jynde vad Korn	Åbenrå Korn	Jynde vad Græs	Jynde vad Korn	Åbenrå Korn
0- 10	14	14	22	100	100	100
10- 30	29	27	30	100	100	100
30- 50	18	14	23	86	74	100
50- 70	10	6	19	50	40	76
70- 90	6	4	15	27	27	60
90-110	3	< 1	11	14	0	38
110-130	0	0	6	0	0	24
130-150	0	0	4	0	0	17
150-170	0	0	1	0	0	4
Σrodzone	80	65	131	81	79	58

delen aftager med dybden på grund af aftagende rodtæthed. – Det skal bemærkes, at opgørelsen af forbruget i procent af plantetilgængeligt vand er behæftet med en vis usikkerhed, og de eksakte talværdier må derfor ikke tillægges for stor vægt. – Det blev iøvrigt fundet, at jorden i de øverste 30 cm blev udtørret til 2–3 volumen pct. under visnegrænsen (se figur 8).

Det var tilsigtet at vande i Jyndeved, når halvdelen af den tilgængelige vandmængde var brugt, svarende til et underskud på ca. 30 mm vand. I 1975 blev vandingstidspunktet bestemt ud fra fordampningen fra fordampningsmåler. Samtidig fulgtes det aktuelle vandforbrug fra jorden. I de fleste tilfælde var der rimelig overensstemmelse mellem fordampningen fra fordampningsmåleren og den aktuelle fordampning fra jorden. Men i nogle tilfælde var der ret stor uoverensstemmelse, og underskuddet i jorden blev over 50 mm.

I 1976 blev vandingstidspunktet bestemt ud fra det faktiske vandforbrug fra jorden målt med neutronspretningsmetoden. En simplere og mere let tilgængelig måde er at anvende tensiometermålinger, hvilket bliver omtalt kort i næste afsnit.

I tabel 6 er vist vandforbrugets fordeling i dybden i pct. af totalt forbrug. Samtidig er anført planterøddernes fordeling i jorden i vægtprocent af total rodmasse i det pågældende forsøgsled. Total rodmasse er i gennemsnit af 1975 og 1976 og alle afgrøder i Jyndeved og Åbenrå bestemt til 32 hkg tørstof pr. ha. Det fremgår af tallene, at langt

den overvejende del af rodmassen findes i de øverste 30 cm af jorden. Det skal erindres, at disse tal for vandforbruget kun omfatter den del, jorden stiller til rådighed. En større del af planternes totale vandforsyning kommer fra nedbør i vækstperioden. Denne del bliver hovedsagelig optaget fra jordens øverste 30 cm.

5.4. Jordens vandindhold og tension

Det kan være vanskeligt i praksis at bestemme det rigtige tidspunkt for vanding, især første vanding til korn og vanding efter slæt i græs.

I figur 8 er vist et eksempel fra kornafgrøden ved Jyndeved i 1975. Figuren viser jordprofilens vandindhold ved visnegrænsen, markkapacitet og på forskellige tidspunkter i vækstsæsonen. Desuden er vist tensionsprofiler på de samme tidspunkter i vækstsæsonen. Ved fremspiringen den 22. april var vandindholdet lidt over markkapacitet på grund af kraftig nedbør. På et tidspunkt mellem den 27.5. og 3.6. er halvdelen af den plantetilgængelige vandmængde i rodzonen brugt. Det svarer til, at tensionen i 20 cm dybde er ved at overskride tensiometerets måleområde, som er ca. 800 cm vandsøjle, og tensionen i 40 cm dybde ligger mellem 300 og 400 cm vandsøjle. Eksemplet er repræsentativt for den pågældende jordtype. – Maksimal udtørring blev målt den 8.7. Da var jorden i de øverste 30 cm udtørret mere end den fysisk bestemte visnegrænse.

Tabel 6. Planternes vandforbrug fra jorden. Forbrugets procentvise fordeling i dybden. Planterøddernes dybdefordeling i pct. af total rodmasse. Uvandede forsøgsled. Gns. 1975–76

The plants water-uptake from different soil layers in per cent of total uptake, and depth distribution of the plant roots in per cent of total root mass. Average 1975–76

Dybde, cm	Forbrugets fordeling i pct. af totalforbrug fra jorden			Røddernes fordeling i vægtprocent af total rodmasse		
	Jyndeved Græs	Jyndeved Korn	Åbenrå Korn	Jyndeved Græs	Jyndeved Korn	Åbenrå Korn
0– 10	18	22	17	43	42	45
10– 30	36	42	23	51	47	39
30– 50	23	21	18	2	5	7
50– 70	12	9	15	2	3	4
70– 90	7	6	11	1	3	3
90–110	4	< 1	8	1	0	1
110–150	0	0	8	0	0	1

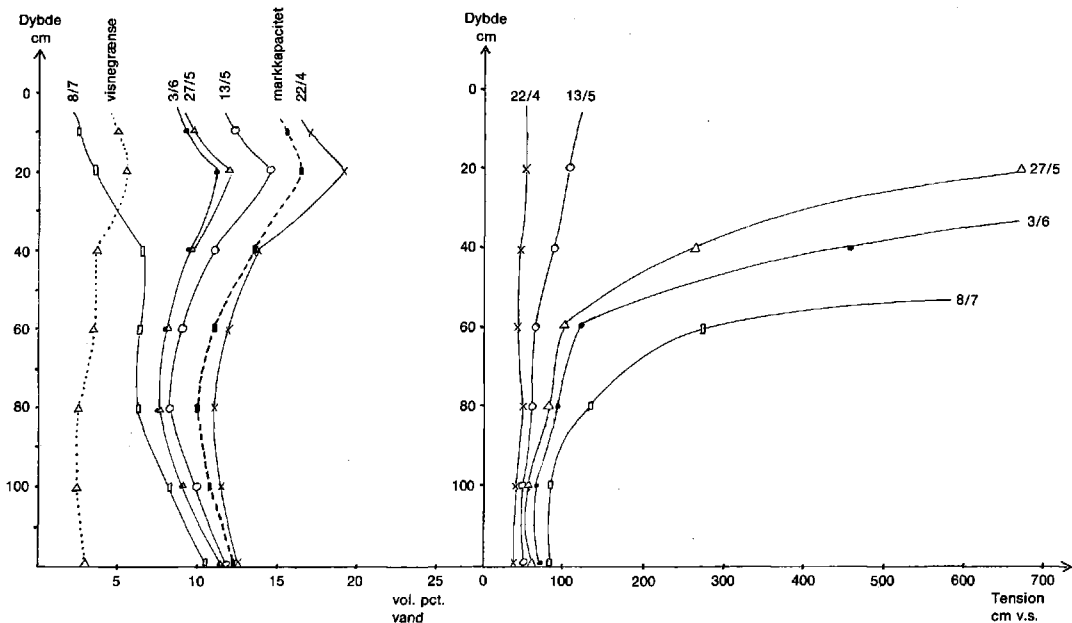


Fig. 8. Vandindhold i volumenprocent og tension i cm vandsøjle i jorden. Sandjord, Jyndeved. Uvandet korn, 1975. Water content by volume and tension in cm of water in the soil profile. Not irrigated cereal. Coarse sand, 1975.

5.5. Vandbevægelse i jorden

De fleste af de modeller, som findes for vandbevægelsens hastighed og retning i jorden er utilstrækkelige for en mark på grund af jordens heterogenitet. Hedeslettesandjorden i Jyndeved er lagdelt, men lagene er ikke vandrette og ikke lige tykke over alt. Ved udgravning af en profil er det konstateret, at vandet ikke strømmer lige hurtigt gennem hele tværsnitsarealet. Det iagttages ved, at de mørkfarvede, udfældede humussyrer nogle steder strækker sig langt i dybden som store kileformede spidser. I moræneleret på åbenråarealet ses tydeligt, at vandet følger rod- og regnormegange samt revner og sandfyldte sprækker i jorden.

5.5.1. Vandbevægelse over grundvandet

5.5.1.1. VANDETS BEVÆGELSE RETNING

Jyndeved: I figur 9 er vist et eksempel på jordprofilens hydrauliske potential på forskellige tidspunkter. I vinterhalvåret er potentialkurven parallel med linien for gradienten lig minus 1, og der foregår en nedadgående vandbevægelse fra jord-

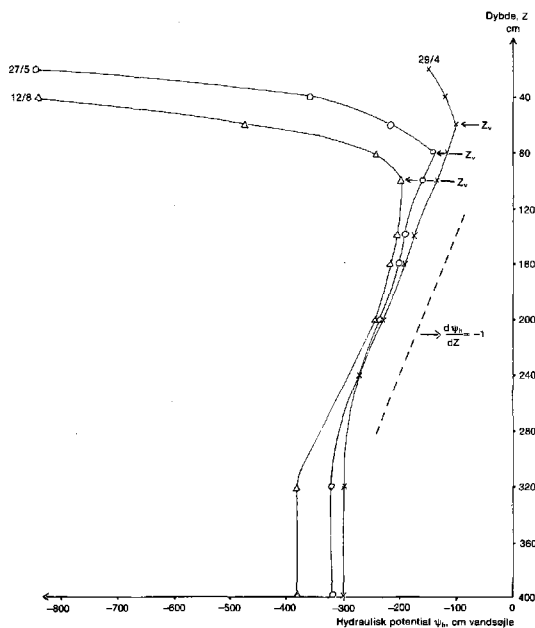


Fig. 9. Jordprofilens hydrauliske potential. Uvandet græs. Sandjord, Jyndeved 1975. $Z_v \sim$ »vandskel« under rodzonen.

Hydraulic potential profiles. Not irrigated grass. Coarse sand, 1975. $Z_v \sim$ »zero flux plane«

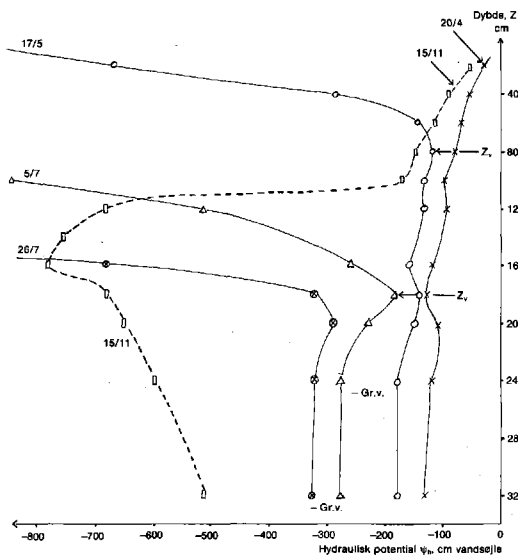


Fig. 10. Jordprofilens hydrauliske potential. Korn. Lerjord, Åbenrå 1976. $Z_v \sim$ »vandskel« under rodzonen.

Hydraulic potential profiles. Not irrigated cereal. Clay loam; 1976. $Z_v \sim$ »zero flux plane«

overfladen til grundvandet. Den 29.4. er planterne begyndt at bruge vand, og der er opstået et »vandskel«, Z_v mellem opadgående vandbevægelse til planterne og nedadgående vandbevægelse. Den 27.5. er »vandskellet« rykket ned til 80 cm og den 12.8. til ca. 100 cm dybde. I 320 og 400 cm dybde er potentialet ens, idet begge dybder er i grundvandet. – Kurverne er typiske for den pågældende jordtype, men tidspunkterne for de enkelte situationer afhænger af klima og afgrøde.

Åbenrå: I figur 10 er vist et eksempel på åbenråprofilens hydrauliske potential på forskellige tidspunkter i 1976. Den 20.4. er der en nedadgående vandbevægelse, og et eventuelt »vandskel« ligger over 20 cm dybde, som er det øverste målepunkt. Den 17.5. er »vandskellet« rykket ned til 80 cm, den 5.7. til 180 cm og den 26.7. til 200 cm dybde. Indtil den 15.11. er der faldet en del nedbør. Det har bevirket, at jordens øverste lag er

Tabel 7. Hydraulisk ledningsevne for vandfyldt jord. Gns. af 3–5 prøver
Hydraulic conductivity of saturated soil. Average of 3–5 soil samples

Dybde, cm	Jyndevad, sandjord, cm/time				Gns.	Åbenrå, lerjord, cm/uge	
	Græs vandet	Græs uvandet	Korn vandet	Korn uvandet		Dybde, cm	Korn uvandet
0– 25	14	35	41	29	30	0– 25	86
25– 50	28	91	43	86	62	25–100	2
50– 100	121	216	198	70	151	100–150	40
100– 150	177	126	106	99	127	150–200	37
150– 200	215	194	–	122	177	200–250	16
200– 250	27	68	58	36	47	250–300	11
250– 300	29	33	–	54	39	300–350	24
300– 350	96	–	–	10	53	350–400	20
350– 400	96	–	–	7	52	400–450	199
400– 450	84	–	–	10	47	500–550	58
450– 500	20	–	–	10	15	700	19
500– 550	17	–	–	14	16	800	597
550– 600	24	–	–	9	17	900	545
600– 650	30	–	–	26	28	1000	14
650– 700	45	–	–	34	40	1100	3
700– 750	31	–	–	48	40	1200	29
750– 800	67	–	–	50	59	1300	3
800– 850	49	–	–	73	61	1370	4
850– 900	54	–	–	181	118	1470	12
900– 950	26	–	–	101	64	1570	285
950–1000	47	–	–	–	47	1635	85
						1720	174
						1870	85
						1920	18
						2090	7

blevet fugtige, og der er en nedadgående vandbevægelse fra jordoverfladen og til 160 cm dybde, hvor jorden stadig er mere tør. Samtidig er der en opadgående vandbevægelse mod 160 cm dybde, idet potentialet falder opad i profilen. Ændringen under 180 cm er lille, kun 1–2 vol.pct. vand. Årsagen til, at kurverne rykker mod venstre under 240 cm dybde, er faldende grundvandstand. Den 5.7. er den sekundære grundvandstand 250 cm og den 26.7. 340 cm under jordoverfladen.

5.5.1.2. HYDRAULISK LEDNINGSEVNE

Jordens hydrauliske ledningsevne for vandfyldt jord er bestemt for begge jordtyper. Resultaterne er anført i tabel 7. Tallene er gennemsnit af 3–5 prøver.

Jynde vad: Som det fremgår af tabel 7, er der bestemt ledningsevne ned til ca. 10 m dybde i to

forsøgsled og kun til ca. 2 m dybde i de andre forsøgsled. Der er en stor variation i ledningsevnen både mellem forsøgsleddene og i dybden på denne lagdelte jord. Variationsområdet er fra mindre end 10 til over 200 cm pr. time. I gennemsnit for de øverste 7 m af grundvandet (3–10 m dybde) er ledningsevnen 47 cm pr. time.

Åbenrå: I tabel 7 er vist den hydrauliske ledningsevne i en jordprofil fra åbenråarealet. Jordprøverne er udtaget i en boring. Morænelerprofilen i Åbenrå er sammensat af et meget heterogent materiale, spændende fra næsten rent sand til meget finkornet ler. Denne heterogenitet er også kommet til udtryk i den hydrauliske ledningsevne, som varierer fra ca. 2 til omkring 600 cm pr. uge. De anførte tal er i de fleste tilfælde gennemsnit af 3 prøver og dækker over ret stor variation på enkeltprøverne. I en del af prøverne blev led-

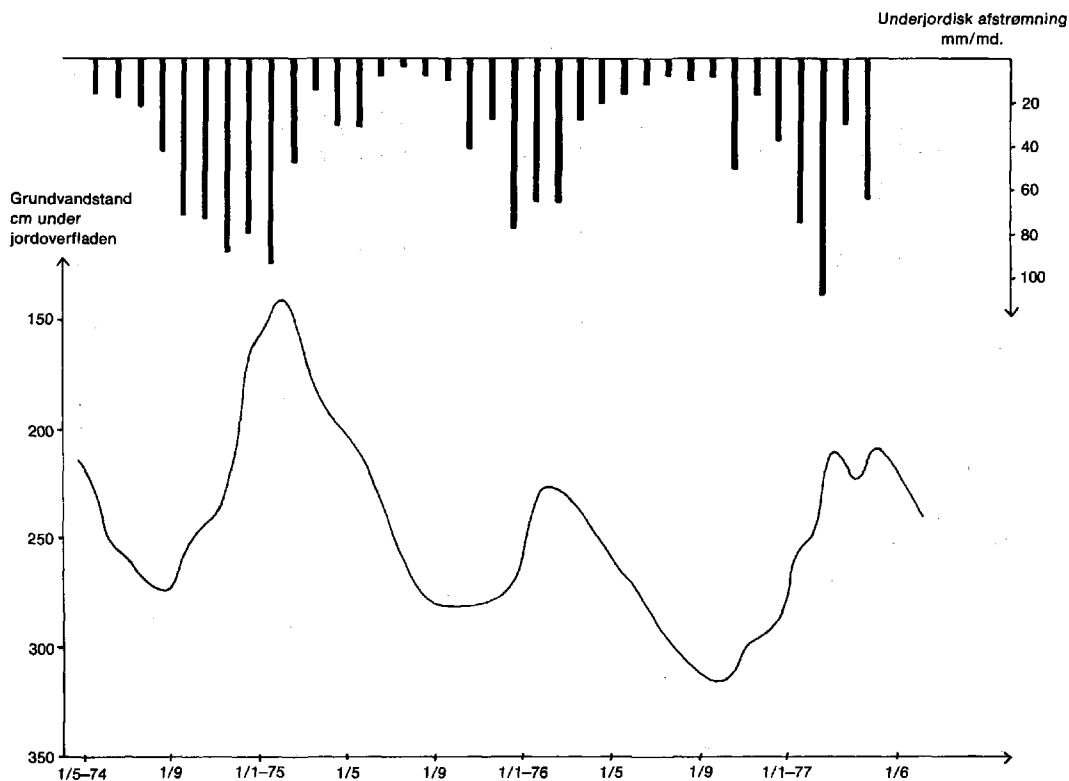


Fig. 11. Grundvandstand, cm under jordoverfladen, gns. pr. måned og underjordisk afstrømning, mm pr. måned. Sandjord, Jynde vad 1974–77.

Ground water level, cm under soil surface, average per month and seepage, mm per month. Coarse sand, 1974–77

ningsevnen målt til næsten 0. – Det er disse meget tætte jordlag, som bestemmer nedsvivningshastigheden.

I hedeslettesandet under moræneleret er ledningsevnen af samme størrelse, som i jyndevadprofilen.

5.5.2. Grundvandstand og grundvandsbevægelse

I figur 11 er vist grundvandstanden i cm under jordoverfladen i Jyndevad for perioden 1.5.74 til 1.7.77. Øverst i figuren er afsat den underjordiske afstrømning i mm pr. måned. I vinterhalvåret 1974–75 var grundvandstanden meget høj på grund af stort nedbørsoverskud. Det ses, at vel har grundvandstanden været lav de tørre somre 1975 og 1976, men vinter- og forårsgrundvandstanden har nået sit sædvanlige niveau, i hvert fald i 1977. Den lille top på kurven i maj 1977 skyldes den store nedbør og afstrømning i april måned.

I figur 12 er vist grundvandstanden for det egentlige, dybtliggende grundvand i Åbenrå for perioden 1.7.74 til 1.7.77. Grundvandstanden er korrigeret for barometereffekten. Den underjordiske afstrømning er ikke afsat, idet den er fundet at være nogenlunde konstant hele året. I stedet er afsat nettonedbør i mm pr. måned.

Afstrømningen fra forsøgsarealet foregår ved, at det sekundære grundvand afdrænes til det dybere liggende primære grundvand. Den sekundære grundvandstand varierer med tiden som vist i figur 13. Det bemærkes, at figur 13 har en anden tidsakse end figur 11 og 12. Pejlingen af den sekundære grundvandstand er begyndt i efteråret 1975. Det ses, at variationerne er pludselige og store.

Maksimum- og minimumpunkterne for den egentlige grundvandstand, figur 12, falder senere, end det var tilfældet i Jyndevad. Den ekstreme

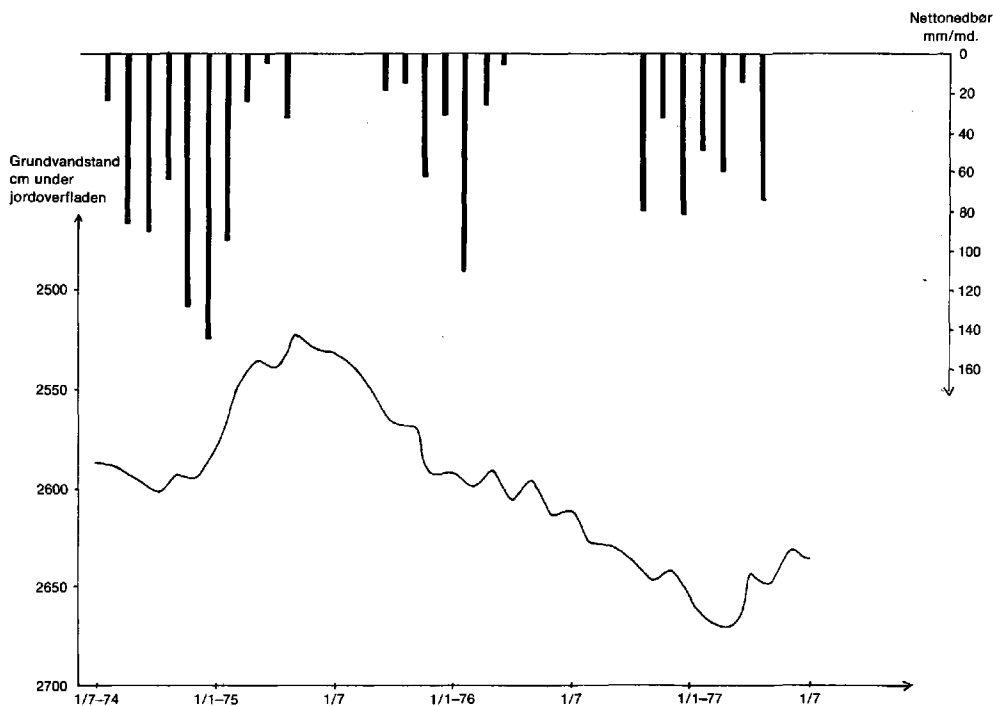


Fig. 12. Grundvandstand, cm under jordoverfladen, månedsgennemsnit og nettonedbør mm/måned. Lerjord, Åbenrå 1974–77.

Ground water level, cm under soil surface, average per month and rainfall excess mm per month. Clay loam, 1974–77

Grundvandstand
cm under
jordoverfladen

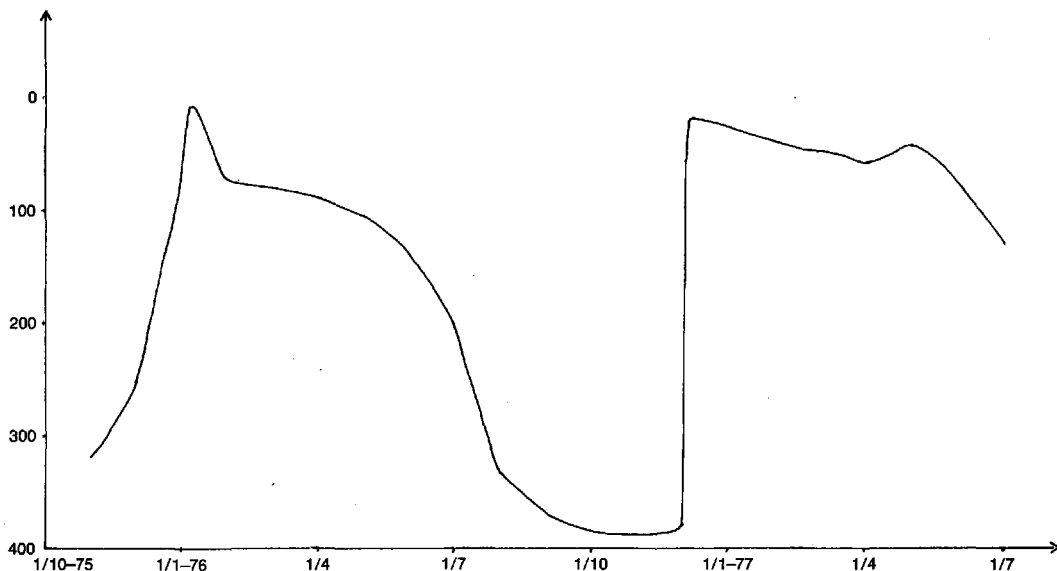


Fig. 13. Variationer i den sekundære grundvandstand i Åbenrå for perioden 1/12-75 til 1/7-77.
Temporary ground water table, cm under soil surface. Clay loam, 1/12-75 - 1/7-77

høje grundvandstand, som følge af den store nedbørsmængde i efteråret 1974, har nået sit maksimum i maj 1975. Maksimumpunktet, som følge af vinternedbøren 1975/76, er vanskelig at erkende, og minimum efter den tørre sommer i 1976 er konstateret i marts 1977.

Variationen i det primære grundvands højde må skyldes, at en stor del af grundvandsdannelsen foregår gennem mere porøse jorde end forsøgsarealet. – Eller den foregår gennem sandfyldte revner og sprækker, som forekommer i de fleste morænelerjorde.

Vandbevægelsen i det egentlige grundvand er overvejende horisontal, men der foregår også en vertikal bevægelse især på nedsivningssteder. Grundvandets bevægelsehastighed afhænger af den hydrauliske gradient og den hydrauliske ledningsevne i det vandførende lag. – I det følgende bliver kun forholdene i Jynde vad behandlet, idet bevægelsesforholdene i det primære grundvand i Åbenrå ligner forholdene i Jynde vad meget.

Ud fra grundvandstandspeglinger er der fremstillet kort over grundvandets højdeforhold. I figur 14 er vist et eksempel for den gennemsnitlige grundvandstand i vinterhalvåret 1976-77.

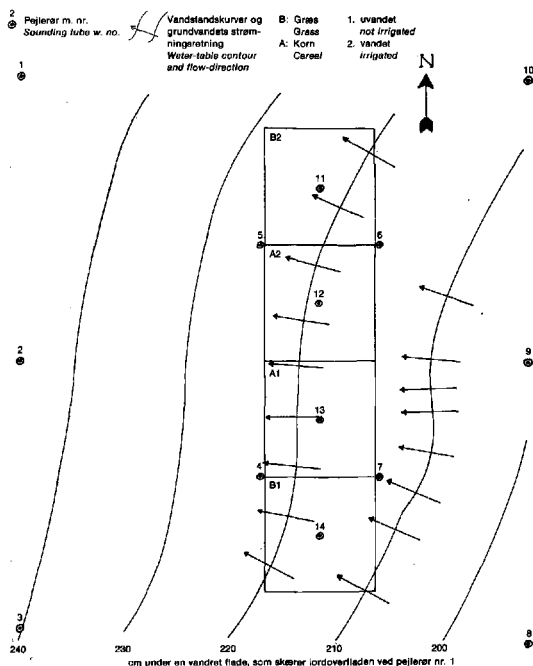


Fig. 14. Grundvandets højdeforhold under forsøgsmarken i Jynde vad. Vinteren 1976-77.
Water-table contour under the experimental field on coarse sand. Average 1976-77

Kurverne i figuren viser grundvandstanden i cm under et vandret plan, som skærer jordoverfladen ved pejlerør nr. 1. Kurverne betegnes ækvipotentialkurver. Grundvandets strømningsretning går altid vinkelret på ækvipotentialkurverne. Retningen er angivet ved pile på figuren. Pejlerør nr. 4-7 og 11-14 er anbragt i kanten af og i forsøgsarealet. De øvrige rør er anbragt mellem 100 og 200 m fra forsøgsarealet. Det fremgår af figuren, at grundvandet strømmer på tværs af marken. Vandprøverne til kemisk analyse udtages tæt ved pejlerørene 11 til 14. Der er altså ikke mulighed for, at en eventuel stor kvælstofnedvaskning i et forsøgsled efter en tid kan konstateres i grundvandet i et andet forsøgsled.

Det er fundet, at den hydrauliske gradient varierer noget med grundvandstanden. Variationsområdet er 1 til 1,3 promille og 1,14 promille i gennemsnit. Regnes der med en hydraulisk ledningsevne på 50 cm/time og et vandindhold (porevolumen) på 37 vol.pct., kan grundvandshastigheden beregnes efter følgende ligning:

$$V = K_m \cdot I \cdot \frac{100}{W}$$

hvor V = strømningshastighed, cm/time
 K_m = hydraulisk ledningsevne for vandfyldt jord, cm/time
 I = hydraulisk gradient, dimensionsløs
 W = volumenprocent vand i jorden

Indsættes ovennævnte størrelser i ligningen, fås en hastighed på 0,15 cm/time svarende til 13,5 m/år. I de grovkornede lag bliver hastigheden omkring 50 m/år og i de finkornede lag omkring 2 m/år. Det vandførende lag er kun undersøgt ned til 10 m dybde. Forsøgsmarken ligger omtrent midt imellem to vandløb, som strømmer mod vest. Grundvandets strømretning er her parallel med vandløbene, og strømningshastigheden er lavest. - Nærmere vandløbene er hastigheden større og vandstrømmen mere direkte mod vandløbet.

5.6. Kvælstofbalancen

I tabel 8 er anført kvælstofbalancen for 3 år i Jynde vad og 2 år i Åbenrå. Balancen er opgjort fra april til april og angivet i kg N pr. ha pr. år. Kvælstoffet til græs er tilført i NPK-gødning. Den er udbragt til 1. slæt i første halvdel af april med 90 kg N pr. ha. Umiddelbart efter 1. og 2. slæt er der tilført ca. 75 kg N pr. ha, og efter 3. slæt er der tilført 60 kg N pr. ha.

Kvælstoffet til korn er tilført i NPK først i april i Jynde vad og sidst i april i Åbenrå. - Der er regnet med, at der er tilført 12 kg N pr. ha i nedbør (Jørgensen, 1974). N-tilførsel med vandingsvandet er beregnet ud fra analyser af vandet. Der er regnet med en koncentration på 10,8 ppm $\text{NO}_3\text{-N}$. Tilførsel ved biologisk N-binding, ammoniakfordampning og kvælstoftab ved denitrifikationsprocesser i jorden er ikke bestemt og indgår i »ændringen i lageret af organisk bundet N i jorden«, som bestemmes som differens.

Udvaskningen fra det vandede græs har været lille, i gennemsnit 23 kg N pr. ha. I gennemsnit af årene er der i græsmarkerne ikke sket en ændring af uorganisk kvælstof i jordvandet. De negative tal under »ændring i org. N-lager« for græsmarkerne er dels et udtryk for, at der er foregået en kvælstofbinding ved hjælp af græsmarksbælgplanternes knoldbakterier, dels er der i 1975 og 1976 på grund af varmen givetvis sket en stor mineralisering af organisk bundet kvælstof. Af tallene yderst til højre i tabellen fremgår, at der i den vandede græsmark er optaget mere kvælstof, end der er tilført i gødning.

I uvandet græs har udvaskningen været stor, idet afgrøden ikke har været i stand til at udnytte det tilførte kvælstof. Det gælder især i 1975, hvor der er tilført samme mængde N som til vandet græs. Så stor udvaskning ville man selvfølgelig ikke få i praksis. Den store mængde er tilført, dels for at kunne sammenligne vandet med uvandet ved samme forsøgsbehandling, og dels for at undersøge, hvor stor en stødpude der var i jorden for tilførsel af uorganisk kvælstof.

I kornet i Jynde vad er der udvasket mere i det vandede forsøgsled end i det uvandede, skønt der er optaget væsentlig mindre kvælstof i det uvandede korn end i det vandede korn. Forklaringen

Tabel 8. Kvælstofbalance i kg N pr. ha pr. år fra april til april. Græs 1974/75 er rug med græsudlæg
Nitrogen-balance in kg N per hectare per year. From April to April. Grass 1974/75 is rye as cover crop undersown with grass

Sted	Led	År	Tilført			Høstet	Ud- vasket	Ændring i uorg. N-lager	Ændring i org. N-lager	Høstet · 100 Gødning
			Gød- ning	Nedbør + vanding	I alt					
Jynde- Sandjor-	Græs vandet	1974/75	78	22	100	104	20	- 7	-17	133
		1975/76	302	39	341	361	20	0	-40	120
		1976/77*	301	50	351	352	29	11	-41	100
Gns.		1974/77	227	37	264	272	23	1	-32	120
Jynde- Sandjor-	Græs uvandet	1974/75	78	12	90	76	30	- 8	- 8	97
		1975/76	302	12	314	169	148	17	-20	56
		1976/77	165	12	177	129	80	-11	-21	78
Gns.		1974/77	182	12	194	125	86	- 1	-16	69
Jynde- Sandjor-	Korn vandet	1974/75	78	22	100	76	50	18	-44	97
		1975/76	110	21	131	90	66	-11	-14	82
		1976/77	110	29	139	107	61	-10	-19	97
Gns.		1974/77	99	24	123	91	59	- 1	-26	92
Jynde- Sandjor-	Korn uvandet	1974/75	78	12	90	70	37	7	-24	90
		1975/76	110	12	122	33	66	-10	33	30
		1976/77	110	12	122	66	42	- 2	16	60
Gns.		1974/77	99	12	111	56	48	- 2	9	57
Åbenrå Lerjord	Korn uvandet	1975/76	50	12	62	87	26	0	-51	174
		1976/77	125	12	137	151	40	53	-107	121
Gns.		1975/77	88	12	100	119	33	27	-79	135

* I september 1976 er der tilført 52 kg N for meget, som er fradraget i beregningerne.

ligger sandsynligvis i, at betingelserne for N-frigørelse ved mineralisering af organisk stof har været gode i det vandede forsøgsled på grund af det varme klima og passende fugtighed. I det uvandede forsøgsled har mineraliseringen efter afgrødehøsten været hæmmet af tørke. En del af det overskydende N i den uvandede kornmark er oven i købet blevet bundet i organisk form, formentlig i mikroorganismer. Lageret af organisk bundet N er gået tilbage i den vandede mark og frem i den uvandede mark.

Fra kornmarken i Åbenrå er der udvasket 26 kg N i 1975/76 og 40 kg N i 1976/77. Heraf er hen-

holdsvis 24 og 33 kg udvasket med drænvand. De 2 og 7 kg er vasket under 200 cm dybde i jorden. I begge år er der optaget mere N i afgrøden, end der er tilført i gødning. Der har været en stor nedgang i den organisk bundne N-mængde, især i 1976, hvor der samtidig har været en ophobning af uorganisk N. Årsagen til den store omsætning af organisk stof er, at marken indtil efteråret 1974 lå i græs.

5.7. Kvælstofudvaskning

Som det blev vist i tabel 8 udvaskes der forskellige N-mængder fra forskellige jordtyper og afgrø-

der. I det følgende vises nogle figurer, som anskueliggør hele udvaskningsforløbet ved dyrkning af græs og korn.

Åbenrå: I figur 15 er vist jordprofilens nitratkoncentration på forskellige tidspunkter. Koncentrationerne er beregnet som gennemsnit pr. måned. – Det fremgår af figuren, at i marts 76 er der en høj koncentration af nitratkvælstof i den nederste del af rodzonen fra 60–100 cm dybde. Vinternedbøren har altså ikke udvasket hele nitratmængden på denne svære lerjord. Omkring 1. april blev mængden bestemt til knap 70 kg NO₃-N i de øverste 90 cm af jorden. I april måned er nitrattoppen forskudt lidt nedad, og samtidig er der sket en koncentrationsstigning i de øverste jordlag på grund af gødningstilførsel. I juni måned er næsten alt kvælstoffet i de øverste jordlag brugt, men der er endnu en del NO₃ tilbage i den nederste del af rodzonen. I oktober er der sket en stærk stigning i de øverste jordlag på grund af

N-frigørelse ved mineralisering. Kvantitativt svarer koncentrationerne i de øverste 90 cm af jorden til knap 40 kg NO₃-N pr. ha i juni og over 100 kg NO₃-N i oktober-november. I februar 1977 er en del af den mineraliserede N-mængde vasket ned til ca. 3 m dybde. I denne dybde må der foregå en omdannelse af nitrat, idet der i hele forsøgsperioden ikke er fundet nitratkoncentrationer over 1 til 2 ppm NO₃-N i dybderne under 320 cm. Det gælder såvel i lerlaget ned til 9 m dybde som i det egentlige grundvand i 26 til 30 m dybde, som er største prøveudtagningsdybde.

Jyndeved: I figur 16 er vist nitratkoncentrationen i jordvandet i forskellige dybder i jyndevadprofilen for den vandede kornmark. Den stiplede linie gennem figuren angiver grundvandstandens beliggenhed. I april 1975 er NO₃-koncentrationen høj i de øverste jordlag på grund af gødningstilførsel. Der er desuden en top på kurven i 320 cm dybde. Den stammer sand-

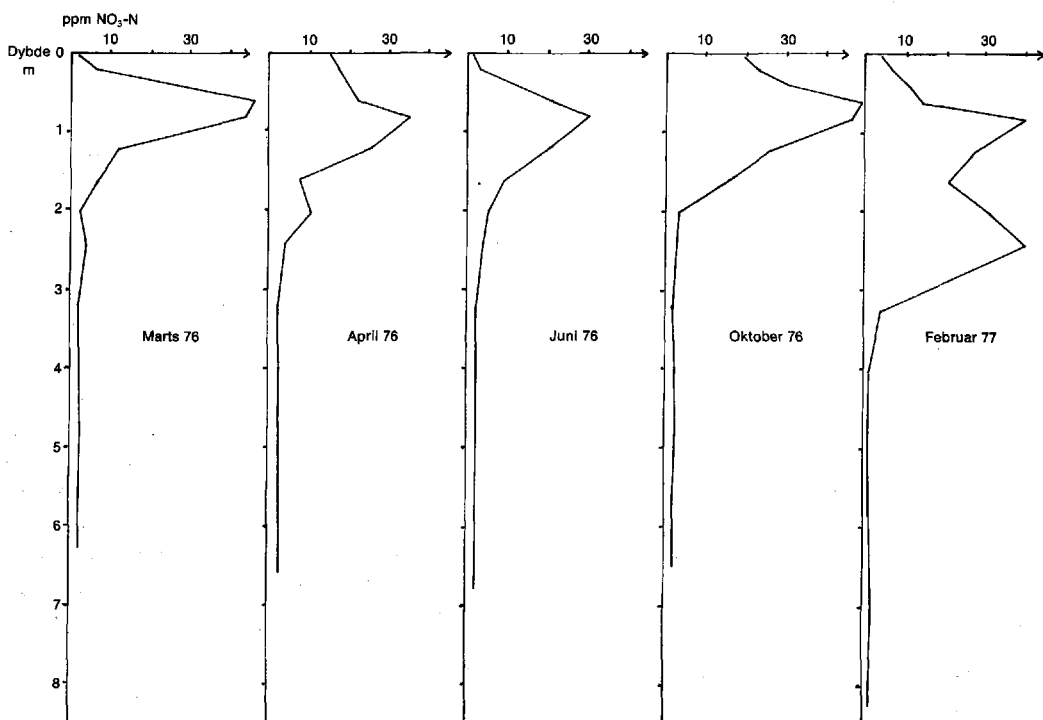


Fig. 15. Nitratkoncentration i jordvandet i forskellige dybder, månedsgennemsnit. Korn. Lerjord, Åbenrå. Concentration of nitrate in soil water in different depths. Average per month. Cereal. Clay loam

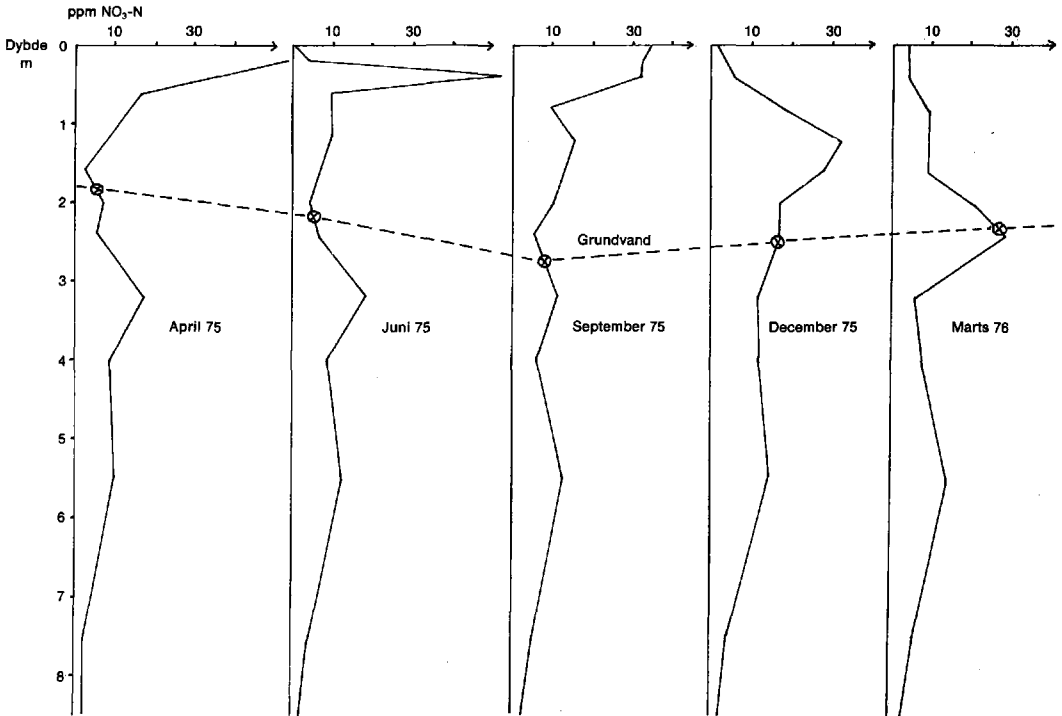


Fig. 16. Nitratkoncentration i jordvandet i forskellige dybder, månedsgennemsnit. Vandetkorn. Sandjord, Jynde vad. Concentration of nitrate in soil water in different depths. Average per month. Irrigated cereal. Coarse sand.

synligvis fra året før. I juni måned er det meste kvælstof brugt. Der er dog stadig en høj koncentration i 40 cm dybde, men den svarer kun til ca. 10 kg $\text{NO}_3\text{-N}$ pr. ha. I september måned er der sket en koncentrationsstigning i de øverste jordlag. Stigningen må skyldes mineraliseringsprocesser på grund af passende varme og fugtighed. Stigningen i efteråret 1976 var væsentlig større, i gennemsnit 50 ppm, end den her viste for 1975. – Da der ingen afgrøde er til at forbruge det frigjorte kvælstof, bliver det udvasket i løbet af efterårs- og vintermånederne, som det fremgår af kurverne for december 1975 og marts 1976.

I figur 17 er vist koncentrationsprofilerne for den vandede græsmark i Jynde vad. I maj og august måned er $\text{NO}_3\text{-N}$ -koncentrationen høj i de øverste jordlag på grund af gødningstilførsel. I august er der en lille top på kurven i 120 cm dybde. Årsagen er, at der ved vandingen sidst i maj måned foregik en lille afstrømning ud af rod-

zonen. I november er toppen nede i 160 cm. Den er blevet lidt større på grund af N-mineralisering, men der er ikke konstateret nogen nævneværdig koncentrationsstigning i de øverste lag. Enten mineraliseres der mindre i græsmarken eller den mineraliserede mængde bliver optaget af afgrøden. Udvaskningen fra græsmarken bliver lille. Det ses af kurven for marts 1976, at den koncentrationstop, som når grundvandet, er lille. I juni 1976 er processen begyndt forfra igen.

Koncentrationstoppe kan spores et stykke ned i grundvandet, men de udviskes mere og mere. Nitratkoncentrationen i vandprøverne fra 10 m dybde ligger sædvanligvis på nogle få ppm og varierer kun lidt i løbet af året.

I figur 18 og 19 er vist en kvantitativ opgørelse af udvaskningsforløbet fra henholdsvis korn og græs i Jynde vad. Kurven i den øverste halvdel af figurene angiver lageret af $\text{NO}_3\text{-N}$ i kg pr. ha fra 0–90 cm jorddybde. Histogrammet under linien

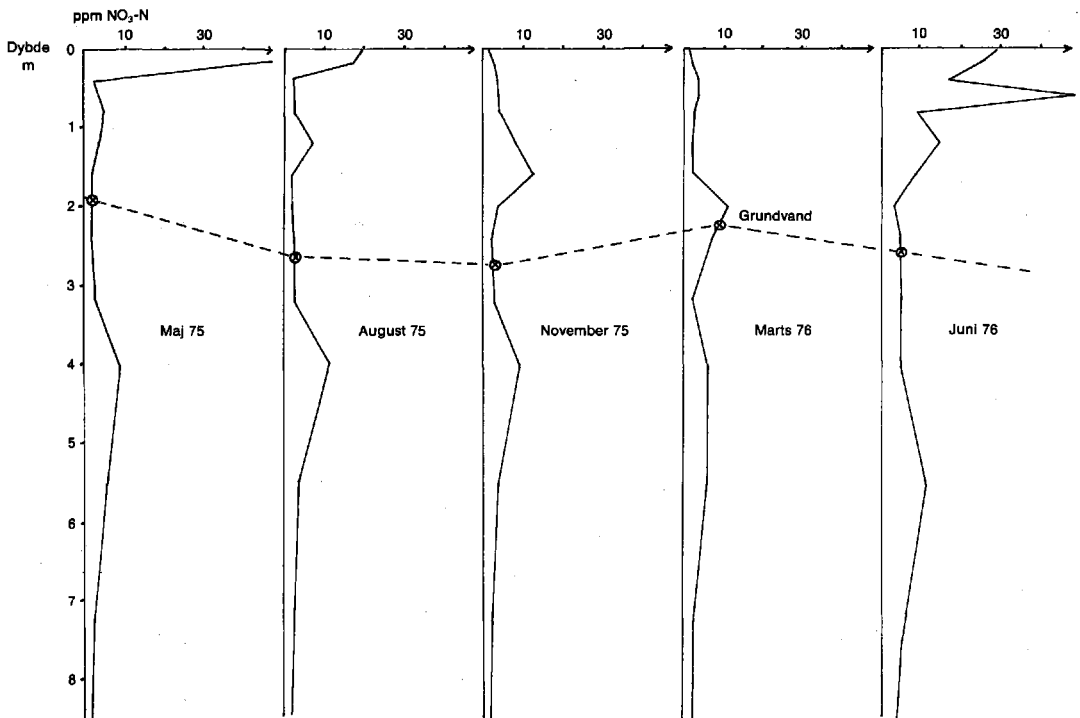


Fig. 17. Nitratkoncentration i jordvandet i forskellige dybder, månedsgennemsnit. Vandet græs. Sandjord, Jyde-
vad.

Concentration of nitrate in soil water in different depths. Average per month. Irrigated grass. Coarse sand

angiver NO_3 -udvaskningen i kg pr. ha pr. måned under 90 cm dybde. I den nederste halvdel af figuren angiver kurven lageret af $\text{NO}_3\text{-N}$ fra 90–190 cm dybde i jorden. Histogrammet angiver nitratudvaskningen i kg $\text{NO}_3\text{-N}$ pr. ha pr. måned under 190 cm dybde. Beregningerne er foretaget på grundlag af nitratkoncentrationen i vandprøver. Der er en vis usikkerhed på opgørelsen af nitratlageret, idet vandprøverne udtages punktvis i dybden, og der integreres for hele jordprofilen. Usikkerheden er størst i de øverste 10 cm af jorden, idet øverste prøveudtagningsdybde er 20 cm. Især efter gødningstilførsel kan der i de øverste jordlag findes noget $\text{NO}_3\text{-N}$, som ikke kommer med i lageropgørelsen.

Af figur 18 fremgår, at gødningstilførslen på 110 kg i april 1975 har medført en lagerstigning i rodzonen til 92 kg $\text{NO}_3\text{-N}$ i maj måned. Der har i marts, april og maj været en lille udvaskning under 90 cm dybde. Den kan spores i lageret fra

90–190 cm og giver en lille udvaskning under 190 cm dybde. I juni-juli er det meste NO_3 i rodzonen brugt, der er kun omkring 15 kg tilbage. I september, oktober og november stiger lageret igen, samtidig med, at der er en betydelig udvaskning under 90 cm dybde. Årsagen må være N-frigørelse ved mineralisering. Det medfører en stærk stigning i lageret fra 90–190 cm dybde og en udvaskning under 190 cm. I marts 1976 er det meste NO_3 udvasket af rodzonen, og lageret er igen nede på ca. 10 kg $\text{NO}_3\text{-N}$.

I figur 19 er vist udvaskningsforløbet for den vandede græsmark for 1975/76. Græsset er gødet den 9.4., 2.6., 15.7. og 21.8. med henholdsvis 90, 78, 75 og 60 kg N pr. ha. Det fremgår af figuren, at kun en lille del af den tilførte gødning er med i lageropgørelsen. Det hænger dels sammen med, at en del af gødningen er optaget af planterne fra de allerøverste jordlag, dels at lageret er beregnet som månedsgennemsnit. Der har været en lille

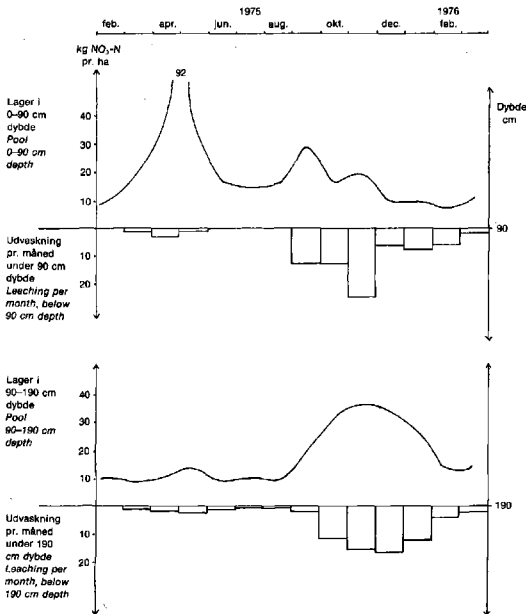


Fig. 18. Jordens kvælstoflager i kg $\text{NO}_3\text{-N}$ pr. ha og kvælstofudvaskning i kg $\text{NO}_3\text{-N}$ pr. ha pr. måned. Vandet korn. Sandjord, Jyndeved.

Nitrate pool in the soil, kg $\text{NO}_3\text{-N}$ per hectare and leaching of nitrate in kg $\text{NO}_3\text{-N}$ per hectare per month. Irrigated cereals. Coarse sand

udvaskning i april og maj måned, men kun på nogle få kg N. Der er ikke konstateret nogen væsentlig lagerændring i planternes rodzone i efteråret. Det hænger sandsynligvis sammen med, at græsmarken har været i vækst helt hen i november måned, og en eventuel kvælstofmængde frigjort ved mineralisering er blevet brugt af planterne. Lagerstigningen fra 90–190 cm dybde og udvaskningen i efterårsmånederne har været lille. Der har været en lidt større udvaskning under 90 cm end under 90 cm. Årsagen til uoverensstemmelsen er sandsynligvis, at der er for langt mellem målepunkter under 80 cm dybde. Det betyder, at der mellem to målepunkter kan findes lidt nitrat, som ikke kommer med i lageropgørelsen.

I figur 20 er vist nitratudvaskning som funktion af nettonedbør fra september 1975 til 1. april 1976 for den vandede kornmark i Jyndeved. Der er en kurve for udvaskningen under 90 cm og en for udvaskningen under 170 cm dybde. Kurverne er

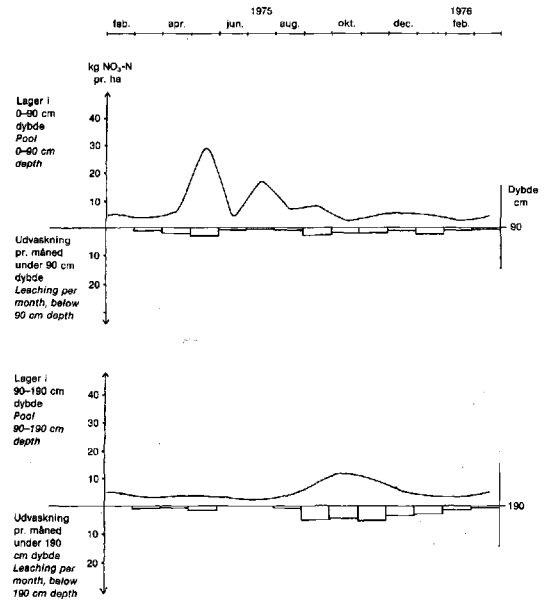


Fig. 19. Jordens kvælstoflager i kg $\text{NO}_3\text{-N}$ pr. ha og kvælstofudvaskning i kg $\text{NO}_3\text{-N}$ pr. ha pr. måned. Vandet græs. Sandjord, Jyndeved.

Nitrate pool in the soil, kg $\text{NO}_3\text{-N}$ per hectare and leaching of nitrate in kg $\text{NO}_3\text{-N}$ per hectare per month. Irrigated grass. Coarse sand

vist som sumkurver. Der er vasket 72 kg N under 90 cm og 66 kg under 170 cm dybde. For at udvaske 50 pct. af disse mængder er der faldet henholdsvis 140 og 206 mm nettonedbør. Det svarer omtrent til markkapacitet, som for de to dybder er henholdsvis 122 mm og 218 mm. De 140 mm er rigtignok noget mere end de 122 mm, jorden indeholder ved markkapacitet i de øverste 90 cm. Forklaringen er sandsynligvis, at mineraliseringsprocessen har strakt sig over flere måneder.

6. Beregning af nitratudvaskning

I planternes rodzone og lidt derunder er det fundet, at nitratkoncentrationen under nedvaskning gennem jorden er fordelt som en nogenlunde symmetrisk top. Det er i overensstemmelse med, hvad *Jensen (1976)* og *Burns (1976)* har fundet. Regnes der med, at nitrat og vand bevæger sig med samme hastighed, kan nitratoppens dybde, og dermed den dybde, hvorunder 50 pct. af en given nitratmængde er udvasket efter en given

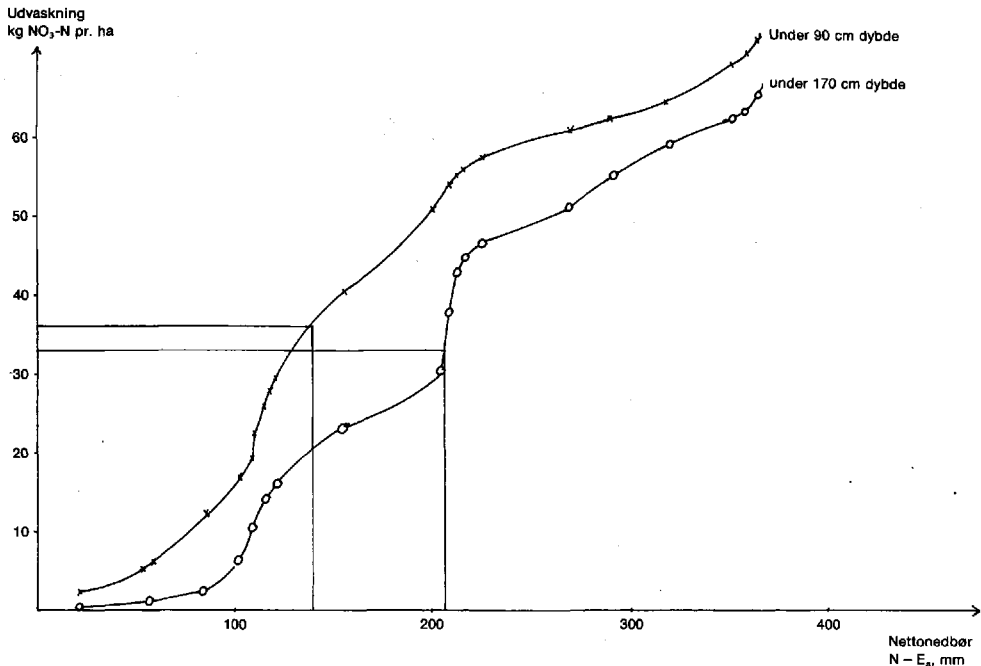


Fig. 20. Nitratudvaskning i kg $\text{NO}_3\text{-N}$ pr. ha som funktion af nettonedbør, mm. Sumkurver for perioden 1.9.75-1.3.76. Vandet korn. Sandjord, Jyndeved.

Sum of nitrate-leaching in kg $\text{NO}_3\text{-N}$ per hectare as function of sum rainfall excess, mm, 1.9.75-1.3.76. Irrigated cereals. Coarse sand

afstrømningsmængde, beregnes efter følgende ligning:

$$D = \frac{10 \cdot A_u}{V_m} + Z_t$$

hvor D = nitratoppens dybde, cm (svarende til den dybde, hvorunder 50 pct. af NO_3 er vasket)

A_u = afstrømning, mm

V_m = volumenprocent vand ved markkapacitet

Z_t = nitratoppens dybde ved begyndelsen, cm

Afstrømningen, A_u er i perioder, hvor jordens vandindhold er omkring markkapacitet, lig med nettonedbøren. – Som eksempel kan indsættes værdierne for sandjorden i Jyndeved. Vandindholdet ved markkapacitet er ca. 15 vol.pct. Nitratoppen ligger f.eks. i 10 cm dybde. Efter 100

mm nettonedbør (nedbør – fordampning) er ca. 50 pct. af nitratmængden vasket under 77 cm dybde i jorden.

Beregninger af denne art kan f.eks. anvendes til at vurdere, hvor meget af en tilført kvælstofgødning i form af nitrat, der er vasket under planternes rodzone efter en periode med megen nedbør. – I figur 21 er vist et eksempel for forårstilført nitratgødning på forskellige jordtyper. Der er regnet med, at jordens vandindhold er omkring markkapacitet. – Er der f.eks. faldet 100 mm nettonedbør efter gødningstilførslen, vil halvdelen af nitratmængden været vasket under 67 cm dybde på en grov sandjord og under 33 cm dybde på en lerjord.

7. Afsluttende diskussion

Vanding af jorden forøger fordampningen, men den vil også forøge afstrømningen, idet jorden er mindre udtørret efter vækstsæsonens afslutning. Den større afstrømning vil imidlertid ikke altid

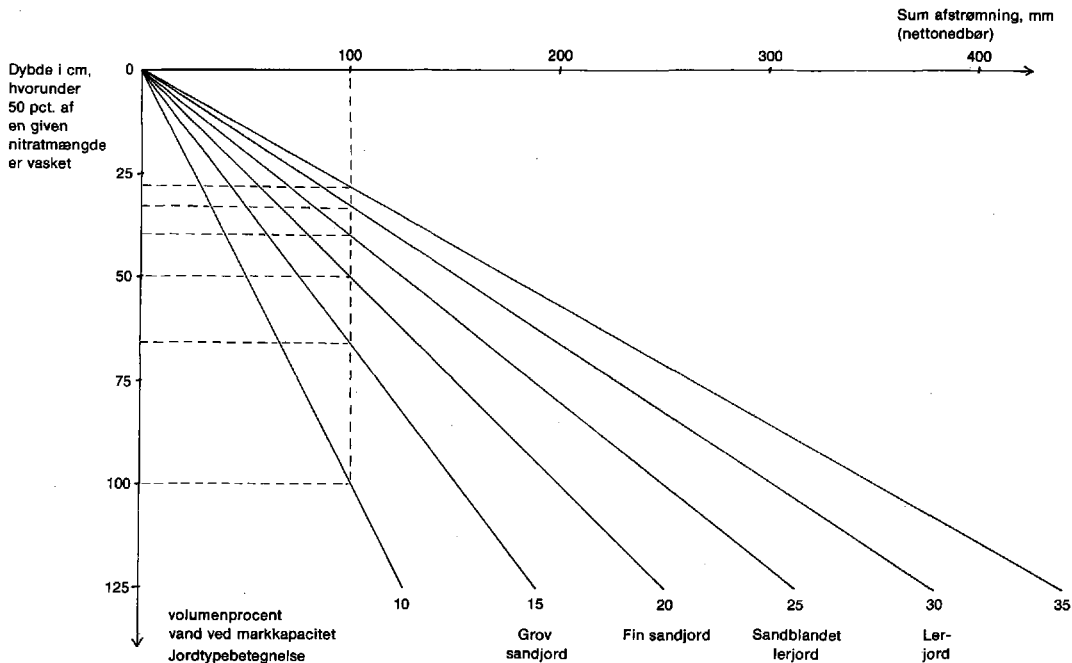


Fig. 21. Sammenhæng mellem afstrømning (nettonedbør) og udvaskning af nitrat efter tilførsel af nitratgødning om foråret på forskellige jordtyper.

Relation between discharge and leaching of nitrate after supply of nitrate-fertilizer in the spring on different soil types

medføre større udvaskning af næringsstoffer, da der er en bedre kvælstofudnyttelse fra den vandede jord.

På morænelerjorden i Åbenrå er den underjordiske afstrømning fundet at være nogenlunde konstant hele året. Variationer i nedbørens størrelse ses overvejende på størrelsen af drænastrømningen. Den underjordiske afstrømning er bestemt til knap 100 mm pr. år. Det svarer til knap 2 mm pr. uge.

Underjordisk afstrømning sker tilsyneladende ved, at et højtliggende sekundært grundvand afdrænes til det dybere liggende egentlige grundvand. Afstrømningshastigheden bliver derfor bestemt af de hydrauliske forhold i jordlagene i det sekundære grundvandsmagasin og ikke af nettonedbøren i forskellige perioder.

I den vandede græsmark er der brugt godt 3 mm vand pr. hkg tørstof høstet. Mindst i 1. slæt. – I vandet korn er der brugt godt 6 mm vand pr. hkg kerne høstet pr. ha. På lerjorden har havren i 1975

brugt 6 mm pr. hkg kerne og vinterhveden 4,6 mm pr. hkg kerne. En af årsagerne til vinterhvedens lave vandforbrug er, at vandforbruget i efteråret ikke er medregnet. Resultaterne er i overensstemmelse med, hvad *Aslyng* (1976a) anfører.

Ved beregning af vandbalancen er det fundet særdeles vigtigt at bestemme det niveau i jorden, som adskiller den opadgående vandbevægelse til planterne og den nedadgående afstrømning. Niveaulet benævnes »vandskellet« og defineres som det niveau under planternes rodzone, hvor den hydrauliske potentialgradient er lig 0.

De udvaskningstal, som er anført i denne beretning, gælder nitrat udvasket af planternes rodzone. Kun den del, som er udvasket gennem drænsystemet fortæller direkte, hvor meget modtageren – vandløbet – belastes. Nitratet i den del af afstrømningen, som strømmer til grundvandet, vil for en del blive omdannet til luftformigt N. Det ses bl.a. af, at grundvandet og jordvandet under 3–4 m dybde på lerjorden er næsten

nitratfrit, og nitratkoncentrationen i grundvandet på sandjorden aftager med dybden. Det er i harmoni med *Lind og Pedersens* (1976a og b) angivelse af, at der i jorden kan foregå en kemisk reduktion af nitrat til luftformigt kvælstof.

Det meste af det foreliggende materiale er fra 1975 og 1976. Vækstbetingelserne var begge år meget specielle med høje temperaturer og gode betingelser for kvælstoffrigørelse ved mineralisering, især i de vandede marker. Det betyder, at udvaskningstillene sandsynligvis er højere end i normale år, og der må derfor ikke generaliseres ud fra de eksakte talværdier, men kun fra tendensen i talmaterialet.

Det fremgår klart af de anførte resultater, at det er den kortvarige afgrøde, som frembyder den største risiko for forurening af vore vandressourcer fra dyrkede arealer.

Gødskningens indflydelse på udvaskningen er overvejende indirekte, idet afgrøderne under normale vækstbetingelser optager næsten lige så meget kvælstof, som der tilføres med gødningen. Kun hvor plantevæksten er standset f.eks. på grund af ekstrem tørke, har der været en gødningsrest, som er blevet udvasket. Under gode vækstbetingelser er jordens nitratlager udtømt ved vækstsæsonens afslutning. Når kornet høstes i august, begynder nedbrydningen af rod og stub. Herved frigøres en del kvælstof, og da der ingen plantevækst er til at udnytte kvælstoffet, bliver det udvasket. – Gødskningens indirekte virkning består i, at en velgødet afgrøde efterlader en stor mængde letnedbrydeligt organisk stof i jorden.

De senere års afgrødestruktur med øget korn dyrkning har sandsynligvis givet en forøgelse af den totale nitratudvaskning, især på lette sandjorde.

Udvaskningen af kvælstof betyder dels et direkte tab af et værdifuldt plantenæringsstof, og dels kan det påvirke vore vandressourcer i uheldig retning. – Plantedyrkerens og det øvrige samfunds interesse omkring udvaskningen er derfor sammenfaldende og går i retning af at begrænse udvaskningen mest mulig og samtidig opretholde en rimelig stor produktion af sunde planteprodukter.

En nærliggende metode til nedbringelse af ud-

vaskningen er såning af en efterafgrøde efter kornhøsten eller nedmuldning af overskudshalmen. Herved opnås, at den kvælstofmængde, som frigøres ved mineralisering i efteråret, bliver bundet på organisk form vinteren over, for igen at blive frigjort til planterne i den efterfølgende vækstsæson.

8. Konklusion

1. Vandbalancen er bestemt af nedbør, fordampning, jordtype og afgrødevalg. – Vækstsæsonerne i 1975 og 1976 var mere varme og tørre end normalt. Der kan derfor ikke generaliseres ud fra de eksakte talværdier, men kun fra tendensen i talmaterialet.
2. På sandjorden strømmer vandet hurtigt til grundvandet. Efter stærk nedbør i vinterhalvåret stiger grundvandet efter 1–2 uger. Grundvandsstrømmens hastighed under forsøgsarealet i Jyndevad er ca. 14 m pr. år.

På lerjorden er stigningen i grundvandet forsinket 2–5 måneder i forhold til nedbøren. Den underjordiske afstrømning på forsøgsstedet er nogenlunde konstant året rundt. Variationer i nedbørens størrelse ses overvejende på drænastrømningens størrelse.

3. Vanding giver både større fordampning og større afstrømning. Af vandingsvandet er 70 pct. fordampet i græs og 80 pct. i korn. Resten er afstrømmet.

Planternes vandforbrug pr. afgrødeenhed er mindre i vandede end i uvandede afgrøder. I vandet korn på sandjorden er der brugt godt 6 mm pr. hkg kerne pr. ha, og i vandet græs på sandjorden er der brugt godt 3 mm pr. hkg tørstof pr. ha. På lerjorden har vårsæden brugt 6 mm og vinterhveden knap 5 mm pr. hkg kerne pr. ha.

4. Maksimal roddybde på sandjorden var 100 cm og på lerjorden 170 cm. Planternes maksimale vandforbrug fra sandjorden var 80 mm i græs og 65 mm i korn og fra lerjorden 130 mm i korn. Planterne formår kun at udtørre jorden til visnegrænsen i de øverste 30–40 cm på sandjorden og de øverste 50–60 cm på lerjorden.
5. Udvasning af nitrat fra planternes rodzone er større på sandjord end på lerjord.

Nitratudvaskningen er væsentlig større fra kornafgrøder end fra græsafgrøder. Den primære årsag hertil er, at der frigøres kvælstof ved mineralisering af rod og stub efter kornhøsten, hvor der ingen plantevækst er til at udnytte den frigjorte kvælstofmængde.

6. Under normale vækstbetingelser er næsten alt nitrat i jorden brugt ved vækstperiodens afslutning, og gødskningens indflydelse på udvaskningen af nitrat er derfor overvejende indirekte og består i, at en velgødet afgrøde efterlader en stor mængde letnedbrydeligt organisk stof.
7. Vanding reducerer kvælstofudvaskningen i græs på grund af bedre kvælstofudnyttelse. I korn kan vanding medføre forøget nitratudvaskning på grund af større jordfugtighed efter høst og dermed gode betingelser for kvælstofrigørelse ved mineralisering.
8. Udvasning af kvælstof betyder dels tab af et værdifuldt plantenæringsstof, og dels kan det påvirke vore vandressourcer i uheldig retning. – Plantedyrkerens og det øvrige samfunds interesser med hensyn til kvælstofudvaskning er derfor sammenfaldende. Det gælder om at tilrettelægge produktionen således, at kvælstoftabet ved udvasning holdes nede.
9. Udvasningens størrelse på lerjord og udvaskningen fra vandet græs på sandjord kan næppe give uheldige miljømæssige konsekvenser. – Udvasningen fra kornafgrøder – specielt på lette sandjorde – har i de tørre år 1975 og 1976 været stor. Den bør nedbringes, ved at der sås en efterafgrøde eller ved nedpløjning af overskudshalm.

9. Erkendtlighed

Der skal her bringes en tak til landbrugstekniker *Viggo Andersen*, der med omhu har gennemført de meget omfattende målinger i marken.

En særlig tak rettes til forsøgsværterne, gård-ejer *Friis Møller*, Årslev og Jyndeved forsøgsstation, fordi de har stillet arealer til rådighed og med tålmodighed har gennemført markarbejdet uden om de mange instrumenter.

En række personer har gennem samtaler og diskussioner medvirket til projektets gennemfø-

relse. De bringes her min bedste tak for den udviste interesse.

Projektet er gennemført med økonomisk støtte fra Statens jordbrugs- og veterinærvidenskabelige Forskningsråd.

10. Litteratur

- Andersen, L.J. og Haman, Z.*, (1970): Nye metoder for prøvepumpning af borer og grundvandsreservoirs. Danmarks Geologiske Undersøgelser. III. række nr. 38, pp 91.
- Aslyng, H.C.*, (1976): Klima, jord og planter. DSR forlag KVL, København, pp 368.
- Aslyng, H.C.*, (1976a): Jordklassificering og høstudbytte i Danmark. Tidsskr. for Landøkonomi 163: 345–358.
- Bennetzen, F.*, (1978a): Vandbalance og kvælstofbalance ved optimal planteproduktion. 1. Introduktion om plantenæringsstoffer og vandforurening med beskrivelse af forsøgsarealerne. Tidsskr. for Planteavl, 82, 81–99.
- Bennetzen, F.*, (1978b): Vandbalance og kvælstofbalance ved optimal planteproduktion. 2. Teknik og metoder. Tidsskr. for Planteavl, 82, 173–189.
- Burns, I.G.*, (1975): Simple methods of predicting the leaching of nitrate from the root zone. Conference on nitrogen as a water pollutant, vol.1.
- Burns, I.G.*, (1976): Equations to predict the leaching of nitrate uniformly incorporated to a known depth or uniformly distributed throughout a soil profile. J. agric. Sci., Camb., 86: 305–313.
- Engmann, S.*, (1963): Tillämpning av radiometriska metoder inom vägbyggnadstekniken. Grundförbättring 16: 260–271.
- Haahr, V.*, (1963): Anvendelse af neutronspreddning til måling af jordens vandindhold. Grundförbättring 16: 295–315.
- Hansen, B.S.*, (1974): Nitrat- og klorid-iontransport ved vandbevægelse i jord. Licentiatafhandling. KVL, København, pp 84.
- Jensen, H.*, (1976): Nitrogen movement and leaching in soil. Lysimeter Experiment. Nordic Hydrology 7: 19–30.
- Jørgensen, V.*, (1974): Nedbørens indhold af plantenæringsstoffer, 1970–74. 1168. meddelelse fra Statens Planteavlsvorsøg.
- Kristensen, K.J.*, (1973): Depth intervals and topsoil moisture measurement with the neutron depth probe. Nordic Hydrology, 4: 77–85.
- Kristensen, K.J.*, (1974): Actual evapotranspiration in relation to leaf area. Nordic Hydrology, 5: 173–182.
- Lind, A.M. og Pedersen, M.B.*, (1976a): Nitrate reduction in the subsoil. II. General description of boring profiles and chemical investigations on the profile cores. Tidsskr. for Planteavl, 80: 82–99.

- Lind, A.M. og Pedersen, M.B.*, (1976b): Nitrate reduction in the subsoil. III. Nitrate reduction experiments with subsoil samples. *Tidsskr. for Planteavl*, 80: 100-106.
- McGowan, M.*, (1974): Depths of water extraction by roots. Application to soil-water balance studies. IAEA-AM-176/17: 435-445.
- Pedersen, M.B. og Lind, A.M.*, (1976): Nitrate reduction in the subsoil. IV. Some physical properties of the subsoil, their influence on chemical interchange in the soil, and on ground water quality. *Tidsskr. for Planteavl*, 80: 107-118.
- Rasmussen, K.J.*, (1976): Jordpakning ved færdsel om foråret. II. Jordfysiske målinger. *Tidsskr. for Planteavl*, 80: 835-856.
- Thomas, G.W. and Swoboda, A.R.*, (1970): Anion exclusion effects on chloride movement in soils. *Soil Science*, 110: 163-166.

Manuskript modtaget den 20. januar 1978.