

## Sammenhæng mellem tilførsel, udvaskning og optagelse af kvælstof i handelsgødede, kornrige sædskifter

J. Petersen og J. Djurhuus  
Forskningscenter Foulum  
Afdeling for Jordbrugsproduktion og Miljø  
Postboks 50  
8830 Tjele

DJF rapporter indeholder hovedsageligt forskningsresultater og forsøgsopgørelser rettet mod danske forhold. Endvidere kan rapporterne beskrive større samlede forskningsprojekter eller fungere som bilag til temamøder. DJF rapporter udkommer i serierne: Markbrug, Husdyrbrug og Havebrug.

Abonnenter opnår 25% rabat og abonnement kan tegnes ved henvendelse til:  
Danmarks JordbrugsForskning  
Postboks 50, 8830 Tjele  
Tlf. 8999 1010

Alle DJF's publikationer kan bestilles på nettet:  
[www.agrsci.dk](http://www.agrsci.dk)

Tryk: DigiSource Danmark A/S  
ISSN 1397-9884



## Forord

Myndighedsberedskabet ved Danmarks JordbrugsForskning (DJF) bliver, bl.a. i forbindelse med Vandmiljøhandlingsplaner (VMP), jævnligt bedt om at vurdere den miljømæssige effekt af ændret kvælstofgødskning. Til vurdering af hvorledes kvælstofudvaskningen påvirkes, anvendes dels empiriske modeller baseret på eksperimentelle data fra både DJF og Danmarks Miljøundersøgelser (DMU), f.eks. N-LES, dels deterministiske modeller, f.eks. DAISY. For at få så sikkert et grundlag som muligt for generaliserede antagelser om sammenhængen mellem ændret kvælstoftilførsel og effekten på kvælstofudvaskningen har vi i Afd. for Jordbrugsproduktion og Miljø sammenstillet data for alle posterne i kvælstofbalancen fra relevante forsøg.

Resultaterne blev i en foreløbig form præsenteret d. 7. august, 2002, på Forskningscenter Foulum ved et seminar arrangeret i fællesskab af DMU og DJF vedrørende *Landbrugets kvælstofoverskud og fordeling af overskuddet på forskellige tabsposter samt ændring i jordens kvælstofpulje*. Efterfølgende er der, sideløbende med opgaver i forbindelse med VMPII og VMPIII, foretaget en bearbejdning med henblik på præsentation af resultaterne i nærværende udredning.

Forskningschef  
Jesper Waagepetersen

## Forfatternes forord

Udredningen tager primært udgangspunkt i danske data publiceret nationalt og internationalt. Anden international litteratur er søgt inddraget, men der er kun fundet få referencer med relevans for denne rapport. Datakilderne er samlet af Jørgen Djurhuus, mens bearbejdning og sammenstilling er foretaget af Jens Petersen på grundlag af fælles diskussion.

Afsnittene 3-5 indeholder en konkretisering af problemstillingen og en beskrivelse af, hvordan den belyses i denne rapport. For læsere, der ønsker nærmere kendskab til de anvendte datakilder, findes der i afsnittene 6.1-6.2 en generel oversigt, mens afsnittene 6.3-6.17 indeholder en mere detaljeret beskrivelse af de enkelte datakilder. I afsnit 7 sammenstilles og diskuteres de fundne estimater.

Ingrid K. Thomsen, Afd. for Jordbrugsproduktion og Miljø, Johannes Ravn Jørgensen, Afd. for Plantebiologi, begge DJF, samt Leif Knudsen, Landskontoret for Planteavl, Dansk Landbrugsrådgivning/Landscentret, har venligst stillet data til rådighed for henholdsvis afsnittene 6.11, 6.12 og 6.14. Udover disse danske resultater, har Lennart Mattsson, Institutionen för markvetenskap, Sveriges Lantbruksuniversitet, stillet resultaterne omtalt i afsnit 6.16 til rådighed.

Rapporten er venligst gransket af Ruth Grant, DMU, Ingrid K. Thomsen og Leif Knudsen, som takkes for deres konstruktive kommentarer. Vi takker Margit Schacht for omhyggelig korrekturlæsning og opsætning af rapporten.

Jens Petersen  
Jørgen Djurhuus

Forskningscenter Foulum  
Januar 2004

## Indholdsfortegnelse

1.	Sammendrag.....	7
2.	English summary.....	8
3.	Indledning.....	10
4.	Kvælstofbalance.....	11
5.	Metode.....	12
5.1	Relativ kvælstofudvaskning.....	13
5.2	Ændring af poster i kvælstofbalancen ved ændring i kvælstoftilførslen.....	13
5.2.1	Kvælstofudvaskning.....	13
5.2.2	Afgrødens kvælstofoptagelse.....	14
5.2.3	Ændring i jordens kvælstofpulje.....	14
6.	Datakilder og resultater.....	15
6.1	Generel oversigt over datakilder.....	15
6.1.1	Forsøg med kvælstofudvaskning og kvælstofoptagelse.....	16
6.1.2	Markforsøg til belysning af afgrødens kvælstofoptagelse.....	19
6.1.3	Forsøg med bestemmelse af ændring i jordens kvælstofpulje.....	19
6.2	Generel oversigt over resultater.....	19
6.3	Drænvandsundersøgelserne ved Sdr. Stenderup og Agervig.....	20
6.4	Parallelforsøget.....	23
6.5	Belastningsforsøget med husdyrgødning (1974-1984).....	24
6.6	Slamforsøget (1974-81).....	24
6.7	NPK-forsøget (1974-83).....	24
6.8	Sædskifteforsøget (1985-88).....	25
6.9	Efterafgrødeforsøget på Jyndevad Forsøgsstation.....	25
6.10	De langvarige gødningsforsøg ved Askov Forsøgsstation.....	26
6.11	Rønhaveforsøget.....	27
6.12	Kvalitetskornforsøgene.....	31
6.13	Sandjordsforsøgene.....	32
6.14	Landsforsøgene.....	34
6.15	Organisk stof i jord.....	35
6.16	Bördighetsforsök i Sydsverige.....	36
7.	Diskussion.....	38
7.1	Kvælstofudvaskning.....	38
7.2	Afgrødens kvælstofoptagelse.....	40
7.3	Ændring i jordens kvælstofpulje og effekt af kvælstoftilførsel.....	43
7.4	Konsistens i kvælstofbalance ved ændring i kvælstoftilførsel.....	47
8.	Konklusion.....	49
9.	Referencer.....	50
10.	Appendiks A.....	54
11.	Appendiks B – Legends to figures and tables.....	55



## 1. Sammendrag

Kvælstofbalancer kan have forskellige formål og opstilles derfor i varierende skala og detaljeringsgrad, men ofte benyttes kvælstofbalancer til vurdering af, hvilken indflydelse landbrugets anvendelse af kvælstof (N) har på miljøet. Nedsættelse af afgrødernes normerede behov for kvælstof påvirker de øvrige poster i kvælstofbalancen, men hvorledes disse poster ændres ved ændret kvælstoftilførsel er ikke tidligere belyst. Formålet med denne rapport er at sammenstille estimater for ændringer i afgrødens kvælstofoptagelse, ændringer i kvælstofudvaskningen og ændringer i nedslidningsraten for jordens kvælstofpulje ved ændringer i kvælstoftilførslen, med henblik på at vurdere om der er en konsistent sammenhæng. Dette gøres her for en driftsform svarende til kornrige sædskifter, hvor der udelukkende gødes med kvælstof i form af handelsgødning. Hertil sammenstilles resultater fra forsøg udført i regi af Danmarks JordbrugsForskning i perioden 1973-2001, samt resultater fra forsøg udført af de lokale planteavlkontorer i perioden 1993-2001. Desuden har det været muligt at få adgang til data fra de langvarige *Bördighetsförsök* i Sydsverige, og resultaterne herfra er ligeledes inddraget i sammenstillingen. Forsøgene er forskellige med hensyn til formål, metode og præsentation af resultater, og derfor foretages der en omfattende beskrivelse af forsøgene.

Alle datakilder er kendetegnet ved at omfatte flere niveauer af kvælstoftilførsel i form af handelsgødning. For hver datakilde er der foretaget beregning af den relative kvælstofudvaskning, idet denne parameter er sat til 1 for normalgødskningsniveauet i det enkelte forsøg. Den på basis af forsøgene beregnede relative kvælstofudvaskning kan beskrives ved en tidligere opstillet relativ model for kvælstofudvaskningen som funktion af kvælstoftilførslen (Simelsgaard & Djurhuus, 1998; se ligning 4 i afsnit 5.1).

Til beskrivelse af udvaskningen og optagelsen er der opstillet absolutte funktioner for afhængigheden af kvælstoftilførslen, hvor differentialkvotienten (hældningen) udtrykker, hvorledes disse poster ændres ved ændringer i kvælstoftilførslen. For kvælstofudvaskningen tages der udgangspunkt i den relative udvaskningsfunktion og typetal for kvælstofudvaskningen ved normalgødskningsniveauet. Herved findes det for vårformer af kornafgrøder, at omkring et normalt kvælstofgødskningsniveau ændres kvælstofudvaskningen med 0.25-0.35 kg N pr. kg tilført N/ha, og ved gødskningsniveauer under det normale vil ændringen i kvælstofudvaskningen pr. kg tilført N/ha være mindre. En gennemsnitlig værdi på 0.30 kg N pr. kg tilført N benyttes efterfølgende.

For afgrødens kvælstofoptagelse foretages der forskellige regressioner med henblik på bestemmelse af hældningen. I enkelte forsøg foreligger der data for kvælstofoptagelsen i kerne og halm, mens der i langt de fleste forsøg, typisk de etårige, kun foreligger data for kerne. Almindeligvis kan en lineær regression beskrive disse variable, men inkludering af et kvadratisk led forbedrer ofte den statistiske model. En øvre grænse for hældningen i kernerne kvælstofoptagelse kan i de langvarige forsøg bestemmes til 0.50 kg N pr. kg tilført N/ha, mens en

nedre grænse kan bestemmes i de etårige forsøg til 0.30 i vårbyg og 0.40 i vinterhvede. Hældningen for kvælstofoptagelsen i halmen er estimeret til 0.15 kg N pr. kg tilført N/ha.

Således kan der redegøres for 75-95% af ændringen i kvælstoftilførslen. Ændring i denitrifikation ved ændring i kvælstoftilførslen vil kunne forklare yderligere 0.05 kg N/ha pr. kg tilført N/ha, hvorimod kvælstoftab fra afgrøden antages at være upåvirket af kvælstoftilførslen og derfor sættes lig nul. Spørgsmålet er da, hvorvidt ændringer i nedslidningsraten for jordens kvælstofpulje kan forklare resten, svarende til en ændring på maksimalt 0.20 kg N/ha pr. kg tilført N/ha. På grundlag af langvarige forsøg er det estimeret, at den generelle nedslidning af jordens kvælstofpulje, som ved normal gødskning og fjernelse af halmen er 20-40 kg N/ha/år, vil ændres med 0.08-0.14 kg N/ha pr. kg tilført N/ha. Dette estimat er indenfor det forventede maksimum, og det kan ikke forventes, at den generelle nedslidningsrate påvirkes målbart af ændringer i kvælstoftilførslen i et interval omkring det normale gødskningsniveau.

Ændringer i kvælstofbalancens poster: optagelse, udvaskning, denitrifikation og ændring i nedslidningsraten, kan således forklare ændringen i kvælstoftilførslen, og der kan ikke herske tvivl om hverken størrelsesordenen eller den indbyrdes fordeling af effekten på posterne. Ligning (14) kan derfor betragtes som konsistent for de her undersøgte handelsgødede, kornrige sædskifter.

## 2. English summary

Nitrogen (N) balances may have different purposes and are used to varying scale and degree of detail. However, N balances are often used in an assessment of the impact of N use in agriculture on the environment. Danish legislation on N norms for crops reduces the N application rate thus affecting the outputs in the N balance, but there has been no previous investigation into how N balance components change with a change in nitrogen fertilization rates. The aim of this report was to estimate the change in crop nitrogen off-take, nitrogen leaching as well as the decomposition rate of soil N with a change in the fertilizer N application rate in order to assess if there is a consistent relationship.

We examined a management system equivalent to a crop rotation dominated by cereal crops, with N applied exclusively as mineral fertilizer. The report collates results from lysimeter, field and long-term experiments carried out within the Danish Institute of Agricultural Sciences from 1973-2001 and results from one-year field experiments carried out by the Danish Agricultural Advisory Service from 1993-2001. In addition, the report includes results from the long-term *Bördighetsförsök* experiment in South Sweden. The experiments differ with respect to aim, method and presentation of the results, and therefore chapter 6 contains a detailed description of each of the experiments. The reviewed experiments are summarized in Table 3 stating the location, soil type (for JB number see Table 3a), type of experiment, experimental period, number of N rates, parameters measured (leaching, crop N off-take and



change in the soil N pool), and finally references. The experiments in section 6.3-6.9 are leaching experiments, mainly performed in lysimeters. Long-term field experiments on crop N off-take are described in sections 6.10-6.11 and 6.16. The long-term change in the soil N pool is reported in section 6.15, and the dependency on N application rate in sections 6.10 and 6.16. Sections 6.12-6.14 report on one-year experiments on N off-take in grain.

The data sources are all characterized by more than one application rate of mineral N. Based on N leaching at the normal rate (1N) in each leaching experiment, the relative leaching levels at the other N rates are calculated and shown in Figure 1. The empirical model for the relative N leaching level (Simmelsgaard & Djurhuus, 1998; see equation 4 in section 5.1) depending on the N application rate, is marked as the reference curve in Figure 1. We find that the model describes the experimental data in Figure 1b-g well.

The relative N leaching model (eqn. 4) is re-written and differentiated (eqn. 5). Inserting typical values for N leaching at rates of 1N for spring barley on a sandy soil (sandjord) and a sandy loam soil (lerjord) (Table 2), the response curve in Figure 5 may be constructed. The change in N leaching as read from Figure 5 is 0.25-0.35 kg N/ha for a spring cereal crop for a change in the application rate of 1 kg N/ha in the range 100-120 kg N/ha. A mean value of 0.30 is used for further calculations.

The crop N off-take is estimated using regressions (eqn. 6 and 7). The relations between the crop N off-take in grain is shown in Figure 2 and the estimated slopes are summarized in Table 19. Based on long-term experiments, the slope is estimated at 0.50 kg N/ha for a change in the N application rate of 1 kg N/ha, whereas the slope for the one-year experiments is lower at 0.30 for spring barley and 0.40 for winter wheat. Measurements of N off-take in the straw is not common in the one-year experiments, and based on the long-term experiments the N off-take in straw is estimated at 0.15. Thus, we find a change in the total N off-take within the range 0.45-0.65 kg N/ha for every 1 kg N/ha change in N application rate.

When using these estimates in eqn. 3, we find that with a change of 1 kg N/ha in the application rate, a change of 0.05-0.25 kg N/ha still remains unaccounted for. A change in denitrification may explain 0.05 kg N/ha (eqn. 12), and the remainder may be divided between a change in canopy N loss and a change in the general decomposition rate of soil N in agricultural systems dominated by cereals. We leave the canopy N loss un-estimated because several factors affect this pathway, and the relation between N application rate and canopy N loss is furthermore doubtful. Thus, the general decomposition rate of soil-N of 20-40 kg N/ha/year may change by a maximum of 0.20 kg N/ha with a change in the N rate of 1 kg/ha (eqn. 13). The estimates in Table 20 based on long-term experiments correspond to a change in the general decomposition rate of 0.08-0.14 kg N/ha. This estimate is within the suggested maximum.

Thus, the output components of the N balance (crop off-take, leaching, denitrification and change in the decomposition rate) explain the change in the fertilizer-N application rate. Equation 14 is therefore consistent for a cropping system dominated by cereal crops.

English legends to figures and tables appear from Appendix B.

### 3. Indledning

Stofbalancer er et ofte anvendt redskab til vurdering af økosystemer; specielt er balancer for kvælstof (N) anvendt til vurdering af, hvilken indflydelse landbrugets driftsform har på kvælstofab fra agerjorden. Imidlertid kan en kvælstofbalance opstilles med varierende skala og detaljeringsgrad, afhængig af hvilke poster for tilførsel og bortførsel, der findes væsentlige og kvantificerbare for det pågældende økosystem samt relevante for den pågældende opgave.

I forbindelse med Vandmiljøplan II (VMPII) blev der bl.a. sat fokus på, hvilken indflydelse mængden af tilført kvælstof har på størrelsen af kvælstofudvaskningen. Indtil gødningsplan-året 1997/98 var kvælstofnormerne for de enkelte afgrøder, jordtyper og klimaområder fastsat ud fra det økonomiske optimale niveau. I de efterfølgende planår blev kvælstofnormerne reduceret til 90% af det økonomiske optimale niveau (Anonym, 1998). I forbindelse med forbedelsen af VMPIII er der fortsat interesse for effekten af en yderligere reduktion af afgrødernes kvælstofnorm (Petersen & Sørensen, 2003). På markniveau vil en ændring i kvælstoftilførslen kvantitativt påvirke de øvrige poster i kvælstofbalancen. Særlig interesse knytter sig til posterne kvælstofudvaskning fra rodzonen og afgrødens kvælstofoptagelse. En eventuel ændring i jordens kvælstofpulje er imidlertid også interessant, idet denne på længere sigt kan påvirke både kvælstofudvaskningen og afgrødens kvælstofoptagelse.

Målet med denne rapport er at belyse, hvorledes en ændring i kvælstoftilførsel påvirker kvælstofudvaskningen inden for en tidshorisont på 5-15 år, specielt i hvilket omfang kvælstofudvaskningen reduceres ved reduceret kvælstoftilførsel i handelsgødning. Den valgte tidshorisont er på den ene side bestemt af et ønske om at belyse mere end blot etårig effekter, og på den anden side en begrænsning i data med hensyn til længden af måleserier.

Vi har begrænset problemstillingen til kornrige sædskifter gødsket med handelsgødning, primært fordi datagrundlaget for opgørelse af kvælstofbalancen på brug, der anvender husdyrgødning, er væsentlig mindre end for brug, der udelukkende anvender kvælstof i form af handelsgødning. Problemstillingen belyses ved en systematisk gennemgang af forsøgsresultater fra primært Danmarks JordbrugsForskning (DJF), dels ved resultater fra forsøg med kvælstofudvaskning og dels fra forsøg, der kan belyse afgrødens kvælstofoptagelse. Kriteriet for udvælgelse af datakilder har været, at forsøgene skulle omfatte mere end ét niveau for kvælstoftilførsel i handelsgødning. Dette betyder, at en lang række undersøgelser til belysning af

kvælstofbalancen ved f.eks. forskellige driftsformer er udeladt, idet disse er udført ved kun ét gødskningsniveau.

Estimater for, hvorledes de to primære poster (udvaskning og optagelse) afhænger af ændret kvælstoftilførsel i handelsgødning, sammenstilles og diskuteres. I diskussionen inddrages endvidere flere mindre og vanskeligt kvantificerbare kvælstofposter med henblik på en samlet vurdering af ændringer i kvælstofbalancen ved ændret kvælstoftilførsel.

#### 4. Kvælstofbalance

En samlet kvælstofbalance omfatter posterne i Tabel 1, som dog ikke er fuldstændigt udfyldt, idet nogle poster ikke er relevante for den valgte driftsform, mens andre poster er små og kan betragtes som ubetydelige og i visse tilfælde vanskelige at kvantificere. Ideelt set vil differencen mellem tilførsel og bortførsel give nul, men i landbrugsjord er dette sjældent pga. ændringer i jordens kvælstofpulje. En difference i balancen angives derfor med  $\Delta N_{\text{jord}}$  i ligning (1).

Sættes tilførsel minus bortførsel lig med ændring i jordens pulje, kan kvælstofbalancen, med henvisning til karakteriseringen af de enkelte poster i Tabel 1, reduceres til:

$$N_{\text{tilført}} + N_{\text{deposition}} - N_{\text{bortført(kerne+halm)}} - N_{\text{udvaskning}} - N_{\text{tab fra afgrøde}} - N_{\text{denitrifikation}} = \Delta N_{\text{jord}} \quad (1)$$

Imidlertid er det forbundet med væsentlige vanskeligheder at kvantificere flere af de poster i ligning (1), der generelt har en mere beskeden betydning for kvælstofbalancen, d.v.s. kvælstof tab fra afgrøde, denitrifikation, ændring i jordens kvælstofpulje, og i en vis grad også depositionen, jf. Tabel 1. Samles disse fire poster i en rest-post, og erstattes bortførsel med afgrødens kvælstofoptagelse, kan ligning (1) omskrives til:

$$N_{\text{tilført}} = N_{\text{optagelse (kerne+halm)}} + N_{\text{udvaskning}} + N_{\text{rest}} \quad (2)$$

Herved bliver  $N_{\text{rest}}$  et residual led, som indeholder ændringer, der ikke er indeholdt i de to væsentlige poster,  $N_{\text{optagelse}}$  og  $N_{\text{udvaskning}}$ . Med udgangspunkt i denne balance vil det – uanset gødskningsniveauet – være muligt at diskutere, om der er konsistens i data, idet der skal gælde at:

$$\Delta N_{\text{tilført}} = \Delta N_{\text{optagelse(kerne+halm)}} + \Delta N_{\text{udvaskning}} + \Delta N_{\text{rest}} \quad (3)$$

Ligning (3) udtrykker således ændringen i kvælstofbalancens poster ved ændret kvælstoftilførsel, og det er denne ligning, der gøres til genstand for diskussion. Derimod berøres selve kvælstofbalancen (2) ikke yderligere, og denne vil endvidere afhænge af afgrøde, forfrugt og jordtype.

Tabel 1. Gennemsnitlig årlig kvælstofbalance på markniveau med angivelse af typiske størrelsesordener, postens afhængighed af ændret kvælstoftilførsel og relevans for planteavlbrug, der udelukkende anvender kvælstof i form af handelsgødning. Posternes størrelse afhænger bl.a. af, hvorledes der foretages periodeafgrænsninger i forhold til afgrødens vækstperiode.

Post	Størrelsesorden [kg N/ha]	Postens afhængig af kvælstoftil- førsel	Relevans for plante- avlbrug, der ude- lukkende anvender handelsgødning
Tilførsel	Handelsgødning	100-200	+
	Husdyrgødning		+
	Afgrøderester	<5	
	Deposition	15-20	-
	Biologisk fiksering <sup>1)</sup>		-
Bortførsel og tab	Afgrøde (kerne)	100-180	+
	Afgrøde (halm) <sup>2)</sup>	20-40	(+)
	Ammoniaktab (gødning)	<2% af tilført	
	Ammoniaktab (afgrøde)	<10% af tilført	
	Denitrifikation	5% af tilført	+
	Udvaskning (under rodzonen)	5-75	+
	Kvælstof tab via pollen	~5	-
Differens	Ændring i jordens (rodzonens) kvælstofpulje	?	?

<sup>1)</sup> Balancen gælder for planteavlbrug, der udelukkende anvender kvælstof i form af handelsgødning, og kvælstoffikserende afgrøder er derfor ikke inddraget. Kvælstoffiksering af fritlevende bakterier anses for at være ubetydelig og uafhængig af kvælstoftilførslen.

<sup>2)</sup> Denne post kan også indgå som tilførsel i de tilfælde, hvor halmen ikke fjernes fra marken.

## 5. Metode

I afsnit 6.3-6.16 beskrives 14 eksperimentelle datakilder omfattende både lysimeter- og markforsøg. Der foreligger udvaskningsdata fra fem lysimeterforsøg og to markforsøg. Disse udvaskningsdata sammenlignes med en relativ udvaskningsmodel (afsnit 5.1), og denne omskrives (afsnit 5.2.1) for beregning af den absolutte ændring i kvælstofudvaskningen ved ændret kvælstoftilførsel, jf. ligning (3). Den tilsvarende sammenhæng mellem kvælstoftilførsel og afgrødens kvælstofoptagelse bestemmes i seks markforsøg ved benyttelse af regressionsmodeller (afsnit 5.2.2). På grundlag af to langvarige markforsøg beregnes ændringer i jordens kvælstofpulje ved ændret kvælstoftilførsel ligeledes ved regressionsmodeller (afsnit 5.2.3).

## 5.1 Relativ kvælstofudvaskning

Som reference for den relative kvælstofudvaskning ( $U_r$ ) er valgt følgende relative model (Simmelsgaard & Djurhuus, 1998):

$$U_r = U_x/U_1 = \exp[0.71((N_x/N_1)-1)] \quad (4)$$

hvor  $U_x$  og  $U_1$  er den absolutte kvælstofudvaskning ved henholdsvis et givent gødskningsniveau ( $N_x$ ) og normalgødskningsniveauet ( $N_1$ ). Denne model er valgt som reference, fordi den er baseret på de eneste data, hvor udvaskningen ved stigende kvælstofniveau er målt i fastliggende markforsøg i Danmark, og fordi modellen udelukkende inkluderer effekten af kvælstoftilførsel.

Modellen i ligning (4) bygger udelukkende på de eksperimentelle data fra Drænvandsundersøgelserne, som er omtalt i afsnit 6.3. Som alternativ kunne modellen N-LES<sub>1</sub> (Simmelsgaard *et al.*, 2000) være valgt som reference, idet denne model baserer sig på et større datagrundlag. N-LES<sub>1</sub> inkluderer imidlertid langt flere parametre med henblik på estimering af den absolutte kvælstofudvaskning på markniveau. Simmelsgaard *et al.* (2000) foretager på relativ basis en grafisk sammenligning af de to modeller, og da de to modeller ikke adskiller sig væsentlig fra hinanden mht. respons i kvælstofudvaskningen ved ændring i kvælstoftilførslen, er N-LES<sub>1</sub> fravalgt til fordel for den simple model i ligning (4).

## 5.2 Ændring af poster i kvælstofbalancen ved ændring i kvælstoftilførslen

### 5.2.1 Kvælstofudvaskning

Den absolutte ændring i kvælstofudvaskningen ( $U_x$ ) kan beregnes ved at omskrive den relative kvælstofudvaskningsmodel og differentiere:

$$dU_x / dN = U_1 (0.71/N_1) \exp[0.71((N_x/N_1)-1)] \quad (5)$$

Det ses af ligning (5), at differentialkvotienten både afhænger af niveauet for kvælstoftilførsel ( $N_x$ ) og typetallet for udvaskning ( $U_1$ ), som er en kvantificering af kvælstofudvaskningen ved normalgødskningsniveauet ( $N_1$ ). Til grafisk illustration af denne afhængighed er der opstillet fire scenarier for kombinationer af to afgrøder og to jordtyper. Typetallet for udvaskning fremgår af Tabel 2, mens normalgødskningsniveauet,  $N_1$ , er sat til 130 kg N/ha for vårbyg og til 350 kg N/ha for græs. Ved anvendelse af disse parametre fremkommer funktionerne vist i Figur 5, der diskuteres senere i afsnit 7.1.

Tabel 2. Typetal for kvælstofudvaskning ved normal gødskning for fire kombinationer af afgrøde og jordtype baseret på data fra *Drænvandsundersøgelserne* (Afsnit 6.3) (Simmelsgaard & Djurhuus, 1998).

Gruppe for jordtype	Énsidig vårbyg <sup>1)</sup> [kg N/ha/år]	Græs <sup>2)</sup> [kg N/ha/år]
Sandjord (JB1-4)	68	42
Lerjord (JB5-7)	55	20

<sup>1)</sup> Uden efterafgrøde

<sup>2)</sup> Første-tredje års græs og kløvergræs i sædskifte

### 5.2.2 Afgrødens kvælstofoptagelse

For datakilder vedrørende markforsøg med afgrøderne vårbyg og vinterhvede er det undersøgt, om sammenhængen mellem kvælstoftilførslen,  $N_x$  [kg N/ha], og afgrødens kvælstofoptagelse,  $Y$  [kg N/ha], kan beskrives med en lineær (ligning 6) eller en kvadratisk (ligning 7) regressionsmodel (PROC REG, SAS, 1996). Estimererne  $\pm$ S.E. for parametrene  $a$ ,  $b$ , og  $c$  er givet i tabeller i tilknytning til beskrivelsen for enkelte datakilder. Regressionsberegningerne er primært udført for kvælstofoptagelsen i kerne (Figur 2), da de fleste data foreligger for denne variabel. Hvor der foreligger data for kvælstofoptagelsen i halm, er beregninger også foretaget for denne variabel (Figur 3).

$$Y = a + b N_x \quad (6)$$

$$Y = a + b N_x + c (N_x)^2 \quad (7)$$

For afgrødens kvælstofoptagelse kan differentialkvotienten bestemmes ud fra ligning (6) og (7) som hhv.  $b$  og  $b + 2cN_x$ . Dette betyder, at i de tilfælde, hvor kvælstofoptagelsen kan beskrives som en lineær funktion af kvælstofoptagelsen, bliver differentialkvotienten uafhængig af kvælstofniveauet. For den kvadratiske funktion er differentialkvotienten derimod afhængig af kvælstofniveauet.

### 5.2.3 Ændring i jordens kvælstofpulje

Ændring i jordens kvælstofpulje kan belyses i langvarige, fastliggende forsøg. Dyrkningssystemer med overvejende korn og intensiv jordbearbejdning bevirker ofte en nedgang i jordens organiske kvælstofpulje (nedslidning), men kan i en vis udstrækning modvirkes ved tilførsel af organisk stof, enten ved direkte tilførsel af organisk materiale eller mere effektivt via afgrødevalg. Hvorvidt nedslidningsraten påvirkes af niveauet for kvælstoftilførsel kan kun belyses i langvarige forsøg med flere niveauer af kvælstoftilførsel, jf. afsnit 6.10 og 6.16. Da mængden af jord i en hektar pløjelag er konstant, kan effekten af  $\Delta N_{\text{jord}}$  i ligning (1), og hvorledes den ændrer sig med ændret kvælstoftilførslen,  $\Delta(\Delta N_{\text{jord}})$ , estimeres med en generel lineær model (PROC GLM, SAS, 1996) med år og kvælstoftilførsel som kontinuerte variable, og med en klassevariabel til beskrivelse af den systematiske effekt af marker eller sædskifter:

$$Y = a \text{ Mark}_i + b \text{ År} + c (\text{År} \times \text{N-niveau}), \text{ hvor} \quad (8)$$

$Y$  er kvælstofkoncentrationen i jorden,

$a$  er forskydning i afskæring som følge af forskelle i mellem marker, sædskifter eller tilsvarende systematiske faktorer. Indeks  $i \in \{1, \dots, n\}$ , hvor  $n$  afhænger af niveauerne i det enkelte forsøg.

$b$  udtrykker den generelle nedslidning af jordens kvælstofpulje,  $\Delta N_{\text{jord}}$ , ved dyrkning uden tilførsel af kvælstofgødning ( $0N$ ), og

$c$  er effekten af kvælstoftilførsel på den generelle nedslidning,  $\Delta(\Delta N_{\text{jord}})$ , dvs. ændring i den generelle nedslidning ved ændring i kvælstoftilførslen.

Nedslidningsraten ved et givent kvælstofniveau kan således beregnes ud fra  $\Delta N_{\text{jord}}$  plus  $\Delta(\Delta N_{\text{jord}})$  multipliceret med den tilførte kvæstofmængde. Som udgangspunkt omfatter  $\Delta N_{\text{jord}}$  og  $\Delta(\Delta N_{\text{jord}})$  hele rodzonen, men i forsøgene er jordprøverne udtaget fra pløjelaget, og resultaterne gælder således for  $\Delta N_{\text{pløjelag}}$  og  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$ . I afsnit 7.3 sammenstilles resultater for  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$  med henblik på kvantificering af  $\Delta(\Delta N_{\text{jord}})$ .

## 6. Datakilder og resultater

Der er ikke udført forsøg, der samtidig belyser, hvorledes alle poster i kvælstofbalancen ændres ved vedvarende ændringer i kvælstoftilførslen. Dette skyldes dels, at sådanne undersøgelser er dyre og dels, at flere poster er vanskelige at bestemme, enten fordi der kræves en længere række af forsøgsår, eller der forekommer en stor rumlig og tidsmæssig variation. Problemet må derfor angribes indirekte ved at sammenstille resultater fra forsøg, hvor der primært er målt enten kvælstofudvaskning eller afgrødens kvælstofoptagelse ved stigende kvælstoftilførsel i handelsgødning. Enkelte forsøg giver endvidere mulighed for at belyse ændringen i den generelle nedslidning af jordens kvælstofpulje ved varierende kvælstoftilførsel i handelsgødning.

### 6.1 Generel oversigt over datakilder

I Tabel 3 gives en skematisk oversigt over de anvendte datakilder, som kan opdeles i: udvaskningsforsøg med samtidig bestemmelse af afgrødens kvælstofoptagelse (afsnit 6.1.1); markforsøg, hvor kun afgrødens kvælstofoptagelse er bestemt (afsnit 6.1.2); og forsøg til belysning af ændringer i jordens kvælstofpulje (afsnit 6.1.3). Forsøgsbetingelserne for de enkelte datakilder gennemgås i afsnit 6.3-6.16 med særlig vægt på forsøgsled med tilførsel af kvælstof i form af handelsgødning, idet kun de handelsgødede led i de refererede forsøg er inddraget i denne fremstilling. Generelt refereres forsøgsresultaterne ikke, idet hovedformålet i flere af forsøgene ikke har relation til målet med denne rapport, og der henvises i stedet til de pågældende publikationer. Kun hvor det er fundet relevant for denne rapport, refereres forsøgsresultaterne.

tater. Betegnelserne i Tabel 3 benyttes som kort kendetegn for datakilder og er angivet med kursiv i teksten.

I forsøgene er afgrøderne tildelt forskellige niveauer af kvælstof i handelsgødning, typisk 0N, ½N, 1N, 1½N eller 2N, hvor 1N som udgangspunkt svarede til det normale gødskningsniveau for den pågældende afgrøde og lokalitet i de respektive dyrkningsår. De aktuelle tilførselsrater, udbytter og kvælstofudvaskning ved 1N fremgår af Appendiks A.

### **6.1.1 Forsøg med kvælstofudvaskning og kvælstofoptagelse**

Forsøg til belysning af kvælstofudvaskningen fra landbrugsafgrøder gennemførtes i 1973-97 af Jyndevad/Højer og Askov Forsøgsstationer under det daværende Statens Planteavl-forsøg. Forsøgene havde forskellige formål, og flere af forsøgene fokuserede på kvælstofudvaskning i forbindelse med anvendelsen af organiske gødninger. Imidlertid indgik der i forsøgene altid handelsgødning som referenceled, og det er resultaterne fra disse led, som anvendes til belysning af, hvorledes kvælstofudvaskningen og afgrødens kvælstofoptagelse påvirkes af ændret kvælstof-tilførsel.

Flere af forsøgene blev gennemført i det i 1973 nyetablerede lysimeteranlæg ved Askov Forsøgsstation. Lysimeterne er cirkulære med et overfladeareal på 0.83 m<sup>2</sup> og indeholder jord til 1 m dybde, hvorunder der er 0.25 m filtersand (Kjellerup & Kofoed, 1983). Nogle lysimetre blev etableret med en JB3 jord fra en mark nær Askov, mens andre blev etableret med jord fra Lundgård (JB1) eller Rønhave (JB7). Der blev igangsat et *Belastningsforsøg* (afsnit 6.5), et *Slamforsøg* (afsnit 6.6) og et *NPK-forsøg* (afsnit 6.7) i disse lysimetre i foråret 1974 (Tabel 3). Et mindre antal lysimetre blev samtidigt etableret med jord fra Sdr. Stenderup til brug for det såkaldte *Parallelforsøg* (afsnit 6.4, Tabel 3). Selvom disse fire lysimeterforsøg blev gennemført tidsmæssigt parallelt, vil de her blive behandlet hver for sig, idet der har været forskelle i afgrødevalg og afgrødefølge. Efter et års egalisering blev et *Sædskifteforsøg* (afsnit 6.8) anlagt i de samme lysimetre som *NPK-forsøget*.



Tabel 3. Oversigt over datakilder.

Af- smit ne rapport	Betegnelse for data- kilde anvendt i den- ne rapport	Lokalitet/jordtype	Forsøgs- type	Forsøgs- periode	Kvælstof- niveauer <sup>1)</sup>	Bestemmelse af		Referencer
						Udvaask- ning	Ændring i jor- dens N-pulje	
6.3	Drænvands-undersøgelse	Sdr. Stenderup (JB7) og Agervig (JB4)	Mark med dræn	1973-95	0, 1/2, 1, 1 1/2	+	(+)	Kjellerup & Kofoed (1979); Kjellerup (1983, 1995); Simmelsgaard (1980, 1985b, 1985c); Simmelsgaard & Djurhuus (1998); Olesen (1995) Kjellerup & Kofoed (1983)
6.4	Parallelforsøg <sup>2)</sup>	Askov med Sdr. Stenderup-jord (JB7)	Lysimeter	1974-81	0, 1/4, 1/2, 1, 1 1/2, 2	+	+	Larsen & Kjellerup (1989) Larsen & Petersen (1993) Hansen <i>et al.</i> (1989); Klausen & Hansen (1988)
6.5	Belastningsforsøg	Askov (JB1 og JB7)	Lysimeter	1974-84	1/2, 1, 2	+	+	Klausen (1987); Hansen (1991); Thom- sen <i>et al.</i> (1993)
6.6	Slamforsøg	Askov (JB1 og JB7)	Lysimeter	1974-81	1/2, 1, 2	+	+	Hansen & Djurhuus (1996, 1997); Han- sen <i>et al.</i> (2000a, 2000b)
6.7	NPK-forsøg	Askov (JB3)	Lysimeter	1974-81	0, 1, 2	+	+	Christensen <i>et al.</i> (1994)
6.8	Sædskifteforsøg	Askov (JB3)	Lysimeter	1983-88	0, 1, 1 1/2	+	+	Thomsen <i>et al.</i> (2003)
6.9	Efterafgrøde	Jydevad (JB1)	Mark med sugeceller	1987-97	1/2, 1	+	+	Jørgensen (pers. komm.)
6.10	De langvarige gød- ningsforsøg	Askov (JB5)	Mark	1973-92 <sup>4)</sup>	0, 1/2, 1, 1 1/2	-	+	Jørgensen (pers. komm.)
6.11	Rønhaveforsøget	Rønhave (JB7)	Mark	1999-2001	0, 1/2, 1, 1 1/2, 2	-	+	Jørgensen (pers. komm.)
6.12	Kvalitetskom- forsøgene	Roskilde (JB5) Flækkebjerg (JB6) Rønhave (JB7)	Mark	1993-95 1998-2000	ca. 0.6; 1; 1.4 ca. 0.8; 1; 1.2	-	+ <sup>3)</sup>	Simmelsgaard (1986)
6.13	Sandjordsforsøg	JB1-4	Mark	1970-84	4-5 niveauer	-	+ <sup>3)</sup>	Knudsen (pers. komm.)
6.14	Landsforsøgene	JB1-11	Mark	1993-2001	0, 1/4, 1/2, 3/4, 1, 1 1/4	-	+ <sup>3)</sup>	Christensen (1988)
6.15	Organisk stof i jord	Askov (JB4) (JB5)	Ramme Mark	1956-88 1956-85	1 1	-	+	Christensen (1990)
6.16	Børdighetsforsøg	Skåne, 8-17% ler	Mark	1957-96 <sup>4)</sup>	0, 1/2, 1, 1 1/2	-	+ <sup>3)</sup>	Carligen & Mattsson (2001)

<sup>1)</sup> Niveau 1 svarer til normal kvælstoftilførsel på tidspunktet for forsøgets gennemførelse.

<sup>2)</sup> Parallelforsøget blev udført med samme sædskifte som *Drænvandsundersøgelsen* ved Sdr. Stenderup.

<sup>3)</sup> Kvælstofoptagelsen blev kun bestemt i kerne.

<sup>4)</sup> Forsøgene fortsætter.

*Parallelforsøget* (afsnit 6.4) i lysimetre blev gennemført i samme periode og med samme sædskifte som forsøget på det drænedet lerjordsareal ved Sdr. Stenderup. Det drænedet areal på sandjorden ved Agervig blev etableret 5 år senere uden et tilsvarende parallelforsøg i lysimetrene. I første halvdel af perioden blev der udelukkende anvendt kvælstof i form af handelsgødning, mens der i den sidste halvdel af forsøgsperioden udelukkende blev anvendt husdyrgødning på disse to arealer, der her betegnes *Drænvandsundersøgelserne* (afsnit 6.3). En del af resultaterne fra *Drænvandsundersøgelserne* benyttede Simmelsgaard & Djurhuus (1998) i øvrigt til opstilling af den relative udvaskningsmodel, ligning (4).

Ved kvælstofudvaskning forstås i denne sammenhæng tab af kvælstof ved afstrømning fra rodzonen. For de omtalte lysimeterforsøg og *Efterafgrødeforsøget* på Jyndevad Forsøgsstation (afsnit 6.9, Tabel 3) er perioden 1. april-31. marts anvendt som opgørelsesperiode, mens det hydrologiske år, 1. juli-30. juni, er anvendt for *Drænvandsundersøgelserne*. Tabet ved kvælstofudvaskning forekommer imidlertid hovedsageligt i efterårs- og vintermånederne efter bjærgning af afgrøderne, og opgørelsesperioden er derfor kun væsentlig under specielle forhold. F.eks. kan der som følge af store nedbørshændelser efter gødskning forekomme forårs- og sommerudvaskning, især på lettere jorde. Således forekom der i lysimeterforsøgene sommerudvaskning i 1980 og 1987 i forbindelse med gødskning af slætgræs (Hansen *et al.*, 1989; Thomsen *et al.*, 1993). Som udgangspunkt er der dog ikke skelnet mellem disse enkeltstående hændelser og den normale opgørelsesperiode, idet al udvaskning er betragtet som efterårs- og vinterudvaskning.

Kvælstofudvaskningen beregnes som den afstrømmende vandmængde fra rodzonen multipliceret med nitratkoncentrationen. Disse to faktorer bestemmes på forskellig vis ved de i Tabel 3 tre nævnte forsøgstyper. Ved *Drænvandsundersøgelserne* var drænene ikke hydrologisk adskilte, og der forekom samtidig afstrømning til grundvandet. Det sidste kan der tages højde for ved at anvende modelberegninger for den afstrømmende vandmængde, hvorved den totale kvælstofudvaskning fra rodzonen kan estimeres. Også ved anvendelse af sugeceller baseres den afstrømmende vandmængde på modelberegninger, samt en antagelse om, at prøvetagningen til bestemmelse af nitrat i jordvandet er repræsentativ. I modsætning hertil er begge faktorer direkte målt i lysimeterforsøg. Her kan selve konstruktionen af lysimetrene dog have indflydelse på bestemmelse af kvælstofudvaskningen, idet betingelserne for kvælstoftab ved denitrifikation kan fremmes af iltfrie forhold i lysimetrenes bund. Ved alle tre målemetoder må prøvetagningsintensiteten (og tilhørende registrering af den afstrømmende vandmængde) afpasses efter den anvendte målemetode, så repræsentative prøver sikres, hvorefter produktet af de to faktorer kan summeres over hele opgørelsesperioden.

I de refererede forsøg er kvælstofudvaskningen bestemt i forsøgsperioder strækkende sig over 4-10 år, men i flere tilfælde efter flere års dyrkning ved samme kvælstofniveau, f.eks. *Efterafgrødeforsøget*. Resultaterne skønnes derfor at være repræsentative for ændringer i kvælstoftilførslen over en 5-15 års horisont.

### 6.1.2 *Markforsøg til belysning af afgrødens kvælstofoptagelse*

Udover lysimeterforsøgene inddrages også markforsøg med stigende kvælstofmængde. I DJF-regi er denne type forsøg bl.a. gennemført på arealer med langvarige fastliggende forsøg med forskellige forfrugtsniveauer, der kan være etableret ved forskelle i tilførslen af handelsgødning (*Rønhaveforsøget*, afsnit 6.11; *De langvarige gødningsforsøg* ved Askov Forsøgsstation, afsnit 6.10) eller ved forskellige kombinationer af efterafgrøde og pløjetidspunkt (*Efterafgrødeforsøget*, afsnit 6.9) (Tabel 3).

I 1970'erne var etårige forsøg med stigende mængde kvælstof mere almindelige i regi af Statens Planteavlsvforsøg, og der er foretaget en sammenstilling af disse forsøg udført på lettere jorde (*Sandjordsforsøgene*, afsnit 6.13). I forbindelse med belysning af kvælstofgødskningens indflydelse på kvalitetsparametre i maltbyg og hvede til kikse-mel, er der gennemført enkelte nyere, etårige markforsøg med tre kvælstofniveauer (*Kvalitetskornforsøgene*, afsnit 6.12). Desuden gennemfører Landskontoret for Planteavl i samarbejde med de lokale planteavlkontorer hvert år omkring 30 etårige forsøg med stigende kvælstofmængde, og data herfra er inddraget (*Landsforsøgene*, afsnit 6.14).

I de langvarige forsøg bestemmes typisk kvælstofbortførsel med både kerne og halm, mens der i de etårige forsøg typisk kun bestemmes kvælstofbortførsel med kerne. For de langvarige fastliggende forsøg er de beregnede regressioner for kerne og halm additive, hvorved den samlede kvælstofbortførsel med afgrøden let kan beregnes ud fra tabel estimerterne.

### 6.1.3 *Forsøg med bestemmelse af ændring i jordens kvælstofpulje*

Årlige ændringer i jordens kvælstofpulje er meget vanskelige at bestemme, idet ændringer er relativt små i forhold til jordens totale kvælstofindhold. Estimering af ændringer kan kun ske i meget langvarige forsøg (>10 år), som allerede ved forsøgets anlæggelse skal have haft dette som formål. Et sådant forsøg er gennemført både som rammeforsøg og markforsøg ved Askov Forsøgsstation (*Organisk stof i jord*, afsnit 6.15). Desuden inddrages data fra fire langvarige forsøg i Sydsvrige (*Bördighetsförsök*, afsnit 6.16), ligesom der foretages beregninger på grundlag af *De langvarige gødningsforsøg* (afsnit 6.10).

## 6.2 **Generel oversigt over resultater**

Den ud fra forsøgene beregnede relative udvaskning er vist i Figur 1, hvor den relative udvaskningsmodel (ligning 4) er indtegnet som reference. Figur 1a-g er nærmere omtalt i afsnit 6.3-6.9.

Ved omregning til relative værdier vil alle data for gødskningsniveauet 1N få koordinatet (1,1), hvilket er årsagen til, at der ikke er markeret observationer for gødskningsniveauet 1N, selvom dette forefindes i alle de refererede datakilder. De benyttede symboler angiver forskellige forsøgsled. Hvor fundet påkrævet, er der under datakilde afsnittene givet kort beskrivelse af de enkelte symboler, som repræsenterer forskellige afgrøder og år, afhængig af de publice-

rede data for den enkelte kilde. En fuldstændig symbolforklaring er derfor ikke nødvendig for en vurdering af, hvorledes data stemmer overens med den relative udvaskningsmodel.

I lysimeterforsøgene har der været anvendt flere forskellige afgrøder, og resultaterne er i de refererede kilder ofte angivet dels som kvælstofoptagelse i total afgrøde og dels i gennemsnit af sædskifte. Desuden kan afgrødernes vækst i lysimetre være påvirket af randeffekter. Disse forhold vanskeliggør en realistisk hektar-relateret bestemmelse af kvælstofoptagelsen i kornafgrøderne alene. Det kan dog konstateres, at kvælstofoptagelsen i lysimeterforsøgene var ligefrem proportional med kvælstoftilførslen (data ikke vist). Sammenhængen mellem kvælstoftilførsel og kvælstofoptagelse er i stedet bestemt ud fra markforsøg og vist i Figur 2a-h. Figuren er baseret på resultaterne, der er givet i tabelform og nærmere omtalt i afsnittene 6.11-6.14.

### **6.3 Drænvandsundersøgelserne ved Sdr. Stenderup og Agervig**

På to systematisk drænedede marker (Tabel 4) blev der i afstrømningsperioderne udtaget vandprøver fra hver af de otte dræn. Hver mark blev delt i to blokke, hvor kvælstofgødning randomiseret blev tildelt i fire niveauer, 0N, ½N, 1N og 1½N. Afgrødefølgen på hver af de to marker var afstemt efter lokalitet og jordtype.

Indtil 1989 passerede drænvandet en automatisk prøvesamler, og en proportional mængde af drænvandet blev kontinuert udtaget. Med 1-2 ugers mellemrum i afdræningsperioden blev nitratkoncentrationen bestemt i vandprøver, og den totalt afdrænende vandmængde aflæst på vandur. Forsøgsarealerne og metode er beskrevet af Kjellerup & Kofoed (1979) og Simmelsgaard (1985a).

Den kontinuerte prøvetagning har to ulemper: det udtagne vand kan stå i prøvebeholderen i op til 14 dage, og ved store nedbørshændelser kan der være risiko for overløb, hvorved prøven ikke er repræsentativ over tid. Omkring 1989 ophørte funktionen af den kontinuerte prøvetagning, og i stedet blev der udtaget ugentlige stikprøver i forbindelse med aflæsning af vandur. Derfor har Simmelsgaard & Djurhuus (1998) i beregningerne anvendt nitratkoncentrationen før og efter en afdræningsperiode og multipliceret den gennemsnitlige nitratkoncentrationen med den afdrænede vandmængde i perioden, jf. Lord & Shepherd (1993). Det vurderes, at dette kun giver en lille fejl på den samlede kvælstofudvaskning. Drænbrøndene blev demonteret og forsøgsarealerne nedlagt i 1995.

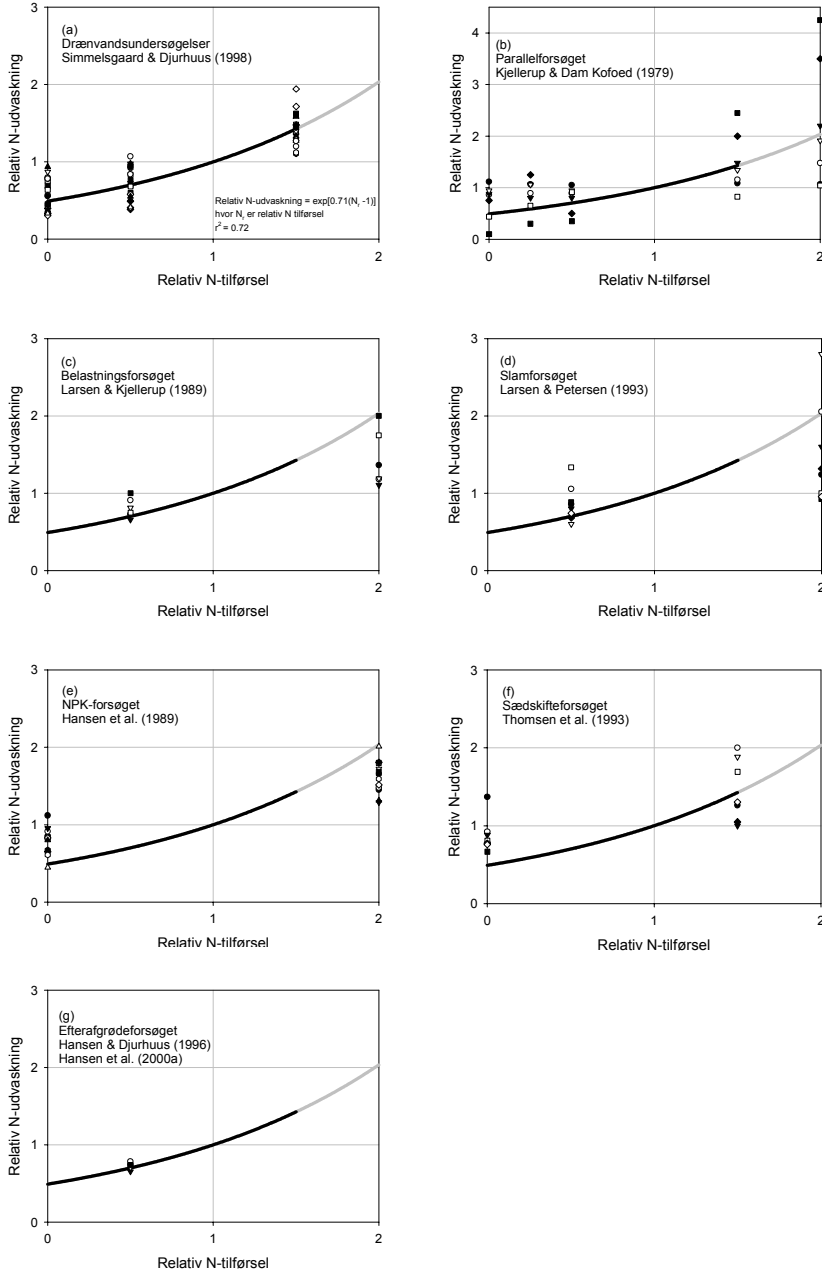
På baggrund af den målte kvælstofudvaskning formulerede Simmelsgaard & Djurhuus (1998) en model til beskrivelse af den relative kvælstofudvaskning som funktion af den relative kvælstoftilførsel. Modellen, ligning (4), er gældende for korn, rodfrugter og græsmarker gødet med handelsgødning og er baseret på 12 (1973/74-1985/86, eksklusiv 1982/83) og 6 (1982/83-1988/89, eksklusiv 1982/83) afstrømningsperioder ved hhv. Sdr. Stenderup og Agervig, idet de fire første afstrømningsperioder (1978/79-1981/82) ved Agervig er atypiske pga. den biologiske kvælstoffiksering i kløvergræsset (Simmelsgaard & Djurhuus, 1998).

Tabel 4. Karakterisering af forsøgsarealer, der er anvendt til formulering af den relative udvaskningsmodel (Simmelsgaard & Djurhuus, 1998).

	Agervig (Varde)		Sdr. Stenderup (Kolding)		
Jordtype	Fin lerblandet sandjord (JB4)		Lerjord (JB7)		
Geologisk oprindelse	Bakkeø		Moræneler		
Markkapacitet i 1 m dybde [mm]	225		315		
Drændybde [m]	1.25		1		
Drænlængde [m]	154		180		
Drænafstand [m]	25		18		
Afgrøder (typiske)	Kvægbrug		Planteavlbrug (østdansk)		
Afstrømningsperiode	1978/79- 1986/87	1987/88- 1993/94	1973/74- 1982/83	1983/84- 1985/86	1988/89- 1993/94
Handelsgødning	+	-	+	-	+
Husdyrgødning (gylle)	-	+	-	+	-

Tabel 5. Referencer vedrørende *Drænvandsundersøgelserne* ved Sdr. Stenderup og Agervig, samt Parallelforsøget i lysimetre ved Askov Forsøgsstation.

Reference	Lokalitet	Periode	Emne i relation til denne rapport
Kjellerup & Kofoed (1979)	Sdr. Stenderup	1973-78	Afgrødens kvælstofoptagelse kan beregnes
Simmelsgaard (1980)	Sdr. Stenderup Agervig	1978-80	Kvælstofbalance for de to første sæsoner
Kjellerup (1983)	Sdr. Stenderup Agervig	1978-81	Kvælstofoptagelse og kvælstofudvaskning
Kjellerup & Kofoed (1983)	Sdr. Stenderup (Askov)	1974-82	Parallelt lysimeterforsøg på Askov Forsøgsstation
Simmelsgaard (1985b)	Sdr. Stenderup Agervig	1978-82	Vandbalance
Simmelsgaard (1985c)	Sdr. Stenderup Agervig	1978-82	Kvælstofudvaskning og opstilling af kvælstofbalancer for 0N, 1N og 1½N
Simmelsgaard & Djurhuus (1998)	Sdr. Stenderup Agervig	1973-86 1978-89	Opstiller den relative udvaskningsmodel
Kjellerup (1995)	Agervig	1978-94	Kvælstofudvaskning ved anvendelse af handelsgødning (1978-1986) og husdyrgødning (1987-1994)
Olsen (1995)	Sdr. Stenderup Agervig	1988-94 1991-94	Kvælstofbalance, men kun for 1N



Figur 1. Relativ kvælstofudvaskning ( $N_{udvaskning}$ ) mod relativ kvælstoftilførsel ( $N_{tilførsel}$ ) for de syv datakilder med udvaskningsdata, med den relative udvaskningsmodel indtegnet som reference (fuldt optrukken linie, dog er ekstrapolationer vist med grå). Bemærk, at ordinaten i figur b afviger fra de øvrige. (Forklaring på til de enkelte figurer findes på næste side).

- (a) *Drænvandsundersøgelserne* ved Sdr. Stenderup (1973/74-1985/86) og Agervig (1983/83-1988/89), i alt 20 udvaskningssæsoner.
- (b) *Parallelforsøget* 1974/75-1981/82 i lysimetre dyrket med samme afgrøder som drænvandsarealet ved Sdr. Stenderup. Symbolerne repræsenterer de enkelte udvaskningssæsoner, dog er udvaskningssæsonen 1979/80 udeladt (se tekst).
- (c) *Belastningsforsøget*, hvor symbolerne repræsenterer seks kombinationer af tre afgrøder (vårbyg, græs og roer) og to jordtyper (JB1 og JB7).
- (d) *Slamforsøget*, hvor symbolerne repræsenterer otte kombinationer af fire afgrøder (vårbyg, havre, græs og roer) og to jordtyper (JB1 og JB7).
- (e) *NPK-forsøget*, hvor symbolerne repræsenterer 12 kombinationer af fire to-års perioder (1.+2., 3.+4., 5.+6. og 7.+8. forsøgsår) og tre kaliumniveauer (0, 1 og 2 gange normal kaliumgødskning).
- (f) *Sædskifteforsøget*, hvor de otte symboler repræsenterer forskellige kombinationer af vårbyg, vinterhvede, græs og roer i sædskifte eller monokultur.
- (g) *Efterafgrødeforsøget*, hvor de fem symboler repræsenterer dels de fire kombinationer af pløjetidspunkt og efterafgrøde i perioden 1987-92 og dels gennemsnittet af fire behandlinger i perioden 1993-97.

De tilhørende udbytteresultater og værdier for afgrødens samlede kvælstofoptagelse er kun delvist publiceret (Tabel 5). På baggrund af Kjellerup og Kofoed (1979) kan afgrødens kvælstofoptagelse ved Sdr. Stenderup beregnes for perioden 1974-77, mens Kjellerup (1983) angiver afgrødens kvælstofoptagelse for både Sdr. Stenderup og Agervig i perioden 1978-81. Det bemærkes, at data for kvælstofoptagelse ved Agervig netop – og desværre – svarer til de afstrømningsperioder, hvor kvælstofudvaskningsdata ikke er inddraget i den relative udvaskningsmodel (Simmelsgaard & Djurhuus, 1998). De øvrige data for udbytte og kvælstofoptagelse er ikke publiceret.

#### 6.4 Parallelforsøget

Som et Parallelforsøg til Drænvandsundersøgelserne blev der i efteråret 1973 etableret lysimetre med jord fra Sdr. Stenderup, og Kjellerup & Kofoed (1983) gennemførte i 1974-1982 forsøg, hvor afgrødens optagelse og drænvandets indhold af kvælstof blev bestemt. Afgrødefølgen var den samme som på forsøgsarealet ved Sdr. Stenderup. Der blev tilført 0, ¼N, ½N, 1N, 1½N eller 2N. I vårbyg og rød svingel svarede 1N til 11 g N/m<sup>2</sup>, mens 1N i vinterhvede og vårraps svarede til 15 g N/m<sup>2</sup>. Den relative kvælstofudvaskning er vist i Figur 1b, hvor symbolerne angiver de enkelte forsøgsår, dog er 1979 udeladt, idet udvaskningen fra førsteårs rødsvinglen var meget lav, hvorved beregning af den relative udvaskning bliver usikker. For en gennemsnitsbetragtning synes den relative udvaskningsmodel at passe godt med data, men der er betydelige variationer, som skyldes kombinationer af år og afgrøde (sammenlign f.eks. åbne og lukkede kvadratiske symboler i Figur 1b).

I 1974 (første forsøgsår) blev en opløsning af <sup>15</sup>N-mærket ammoniumnitrat udvandet ved niveauerne ½N, 1N og 1½N, og genfindelse af tilført <sup>15</sup>N blev bestemt i afgrøde og drænvand i de følgende tre sæsoner. Uanset gødskningsniveau blev 58% af det tilførte kvælstof genfundet i afgrøden høstet samme år, 21% kunne genfindes i jorden efter 3 år, og kun 5% blev genfundet i drænvandet med 3, 1.5 og 0.5% i henholdsvis 1., 2. og 3. udvaskningssæsoner efter tilførslen (Kjellerup & Kofoed, 1983). De resterende 16% blev antaget tabt ved denitrifikation.

## 6.5 Belastningsforsøget med husdyrgødning (1974-1984)

I 1974-1984 gennemførte Larsen & Kjellerup (1989) lysimeterforsøg på Askov Forsøgsstation til belysning af kvælstofudvaskning fra stigende mængde husdyrgødning. I forsøget indgik  $\frac{1}{2}N$ , 1N og 2N i handelsgødning som reference, og det er resultaterne fra disse referenceled, der skal fremdrages her. I sommeren 1973 etableredes lysimetrene med jord fra Lundgård (JB1) og Rønhave (JB7), og i den 10-årige forsøgsperiode dyrkedes  $2\frac{1}{2}$  rotation af et sædskifte med afgrøderne: bederoer; byg med udlæg; græs og byg. Der var kun en afgrøde repræsenteret hvert år.

Indhøstet kvælstof og kvælstofudvaskning er opgjort for hver enkelt afgrøde, dog er der ikke skelnet mellem byg og byg med udlæg. For hver afgrøde og jordtype, i alt seks kombinationer, er den relative kvælstofudvaskning beregnet og vist i Figur 1c. Data fra dette forsøg ligger under den relative udvaskningsfunktion ved høje gødskningsniveauer.

## 6.6 Slamforsøget (1974-81)

Larsen & Petersen (1993) beskriver et lysimeterforsøg med to slamtyper, hvor  $\frac{1}{2}N$ , 1N og 2N i handelsgødning indgik som reference. Lysimetrene blev etableret i sommeren 1973 med jord fra Lundgård (JB1) og Rønhave (JB7). I perioden 1974-81 dyrkedes afgrøderne byg; bederoer; ital. rajrgræs; havre; bederoer; byg m. udlæg; ital. rajrgræs og havre. Der var kun en afgrøde repræsenteret hvert år.

For hver afgrøde er der foretaget opgørelse af indhøstet kvælstof og kvælstofudvaskning. For hver afgrøde og jordtype, i alt otte kombinationer, er den relative kvælstofudvaskning beregnet og vist i Figur 1d. Data for den relative udvaskning afviger ikke væsentlig fra modellen.

## 6.7 NPK-forsøget (1974-83)

Hansen *et al.* (1989) beskriver, hvorledes gødskningsniveauet for kvælstof (N), fosfor (P) og kalium (K) påvirker udvaskningen af næringsstoffer. Forsøget omfatter alle kombinationer af (0N, 1N og 2N)  $\times$  (0P og 1P)  $\times$  (0K, 1K og 2K), i alt 18 forsøgsled. Forsøget blev gennemført i lysimetre på Askov Forsøgsstation i årene 1974-83 i et 4-marks sædskifte: vinterhvede; bederoer; vårbyg med udlæg og græs, og alle afgrøderne blev dyrket hvert år. Hver kombination af forsøgsled og afgrøde fandtes i én gentagelse, og i alt 72 lysimetre indgik i forsøget. I løbet af forsøgsperioden fik udpining af jorden for K stor betydning for kvælstofudvaskningen, mens P-niveauet havde langt mindre indflydelse. Hansen *et al.* (1989) har for hver 2-års periode anført kvælstofudvaskningen for hver af de ni kombinationer af N og K niveau, hvorved relative værdier for kvælstofudvaskning er beregnet for hvert af de tre K-niveauer i de fire del-perioder, i alt 12 kombinationer. Den relative kvælstofudvaskning er vist i Figur 1e, som antyder, at den relative udvaskningsmodel responderer for kraftigt på kvælstoftilførslen i forhold til dette forsøg.



De tilsvarende udbytter og afgrødernes optagelse af næringsstoffer er beskrevet af Klausen & Hansen (1988). Efter et års egalisering blev lysimetrene anvendt til Sædskifteforsøget (afsnit 6.8).

### 6.8 Sædskifteforsøget (1985-88)

Kalkammonsalpeter blev tilført i tre mængder, 0N, 1N eller 1½N. Disse tilførselsrater blev gennemført i otte afgrødefølger, hvoraf de fire repræsenterede et sædskifte, mens fire andre var kontinuert dyrkning af samme afgrøde (Tabel 6). Hver kombination blev gennemført i to gentagelser, dog blev de to forsøgsled med kontinuert byg gennemført uden gentagelser. Desuden var der to lysimetre med sort brak som reference.

Tabel 6. Dyrkningssystemer (afgrødefølger) for *Sædskifteforsøget* udført i lysimetre 1985-89 (Thomsen *et al.*, 1993)

Høstår		Sædskifte			Kontinuert				
1985	Byg med udlæg	Græs	Vinterhvede	Sukkerroer	Vinterhvede	Byg med efterafgrøde	Vårbyg	Vedvarende græs	Sort brak
1986	Græs	Vinterhvede	Sukkerroer	Byg med udlæg	Vinterhvede	Byg med efterafgrøde	Vårbyg	Vedvarende græs	Sort brak
1987	Vinterhvede	Sukkerroer	Byg med udlæg	Græs	Vinterhvede	Byg med efterafgrøde	Vårbyg	Vedvarende græs	Sort brak
1988	Sukkerroer	Byg med udlæg	Græs	Vinterhvede	Vinterhvede	Byg med efterafgrøde	Vårbyg	Vedvarende græs	Sort brak

Der blev foretaget udbyttebestemmelse og bestemmelse af afgrødens totale kvælstofoptagelse. Mængden af drænvand, og nitratkoncentrationen i dette, blev bestemt hver 14. dag, eller når opsamlingsbeholderne var fulde. Den relative kvælstofudvaskning for de fire afgrøder i sædskifte og de fire kontinuert dyrkede afgrøder er vist som gennemsnit i Figur 1f. Det skal bemærkes, store nedbørsmængder i sommeren 1987 i forbindelse med kvælstoftilførsel efter slæt medførte øget udvaskning, specielt for 1½N målttes en meget høj udvaskning. Derfor er dette gødskningsniveau udeladt fra beregningerne af den relative udvaskning for denne afgrøde. Bortset fra byg med udlæg (symbol lukket cirkel) passer data med den relative udvaskningsmodel, dog synes udvaskningsmodellen at underestimere ved lave gødskningsniveauer. Referencer til resultater fra dette forsøg fremgår af Tabel 7.

Tabel 7. Referencer vedrørende Sædskifteforsøget

Reference	Periode	Emne
Klausen (1987)	1985/86-1986/87	Kvælstofudvaskning
Hansen (1991)	1985/86-1988/89	Kvælstofudvaskning
Thomsen <i>et al.</i> (1993)	1985/86-1988/89	Kvælstofoptagelse og kvælstofudvaskning

### 6.9 Efterafgrødeforsøget på Jyndeved Forsøgsstation

Forsøget blev anlagt i 1968. Der blev udelukkende dyrket vårbyg, halvdelen af forsøget med og den anden halvdel uden græsudlæg, og indtil 1986 blev alle afgrødedele bortført fra mar-

ken. Siden 1987 blev bygghalmen fjernet, mens udlægget blev indarbejdet ved jordbearbejdning. Forsøget blev indtil 1986 gennemført ved tre kvælstofniveauer: 70, 110 og 150 kg N/ha. Fra 1987 blev kvælstofniveauerne reduceret til 60, 90 og 120 kg N/ha, hvor det lave og høje kvælstofniveau blev kombineret med  $\pm$ efterafgrøde nedpløjet enten efterår eller forår. Ved de i alt otte forsøgsled (2 kvælstofniveauer  $\times$   $\pm$ efterafgrøde  $\times$  pløjning efterår/forår) målt kvælstofudvaskning (Hansen & Djurhuus, 1996), kerneudbytte og total kvælstofoptagelse i byggen (Hansen & Djurhuus, 1997). Der blev benyttet sugeceller til måling af kvælstofudvaskningen. I perioden 1987-92 blev sugecellerne fjernet fra parcellerne i forbindelse med den årlige pløjning, mens sugecellerne i 1993 blev installeret permanent i parcellerne. Hansen *et al.* (1995) giver et sammendrag af resultaterne.

I 1993-97 blev hvert af de tidligere gødskningsniveauer på 60 og 120 kg N/ha opdelt i fire del-parceller, der blev gødet med henholdsvis 0, 60, 90 eller 120 kg N/ha. Måling af kvælstofudvaskningen fortsatte i de parceller, der havde samme gødskningsniveau som i perioden 1987-92 (dvs. 60/60, og 120/120 kg N/ha, for perioderne 1987-92/1993-97). Samtidig blev der ændret på efterafgrøden i forhold til perioden 1987-92, hvilket fremgår af Tabel 8.

Tabel 8. Kombinationer af efterafgrøde i de to forsøgsperioder i *Efterafgrødeforsøget* (Hansen & Djurhuus, 1996; Hansen *et al.*, 2000a, 2000b).

Forsøgsledsbetegnelse	Pløjetidspunkt	Efterafgrøde	
		1987-92	1993-97
Pl(A)-+	Efterår	-	+
Pl(A)++	Efterår	+	+
Pl(S)+-	Forår	+	-
Pl(S)--	Forår	-	-

Den gennemsnitlige udvaskning ved de to kvælstofniveauer i 1993-97 er beskrevet af Hansen *et al.* (2000a), mens udbytter for alle fire kvælstofniveauer i perioden 1993-97 er beskrevet af Hansen *et al.* (2000b). Den relative kvælstofudvaskning er, for de fire forsøgsled i 1987-92 og for gennemsnittet i 1993-97 (i alt fem observationer), vist i Figur 1g, og svarer til den relative udvaskningsfunktion.

### 6.10 De langvarige gødningsforsøg ved Askov Forsøgsstation

Disse forsøg har været fastliggende siden 1894, og Christensen *et al.* (1994) giver en samlet beskrivelse af forsøgsdesignet i de første 100 år. På Lermarken er forsøget gennemført med kvælstofniveauerne 0N,  $\frac{1}{2}$ N, 1N og  $1\frac{1}{2}$ N, hvor 1N siden 1973 har svaret til 75 og 100 kg N/ha i henholdsvis vårbyg og vinterhvede. I dette forsøg bestemmes næringsstofkoncentrationen hvert fjerde år i sammenvejede prøver af kerne og halm fra de fire marker i sædskiftet svarende til en rotation. For de fire rotationer i perioden 1973-88 er kvælstofoptagelsen i kerne og halm af vårbyg og vinterhvede beregnet og sat i relation til kvælstoftilførslen for de pågældende afgrøder (Tabel 9).

Tabel 9. Kvælstofoptagelse i kerne og halm som funktion af kvælstoftilførsel i *De langvarige gødningsforsøg* ved Askov Forsøgsstation. Estimerer ( $\pm$ S.E.) for parametre i ligning (6). Baseret på data fra perioden 1973-88.

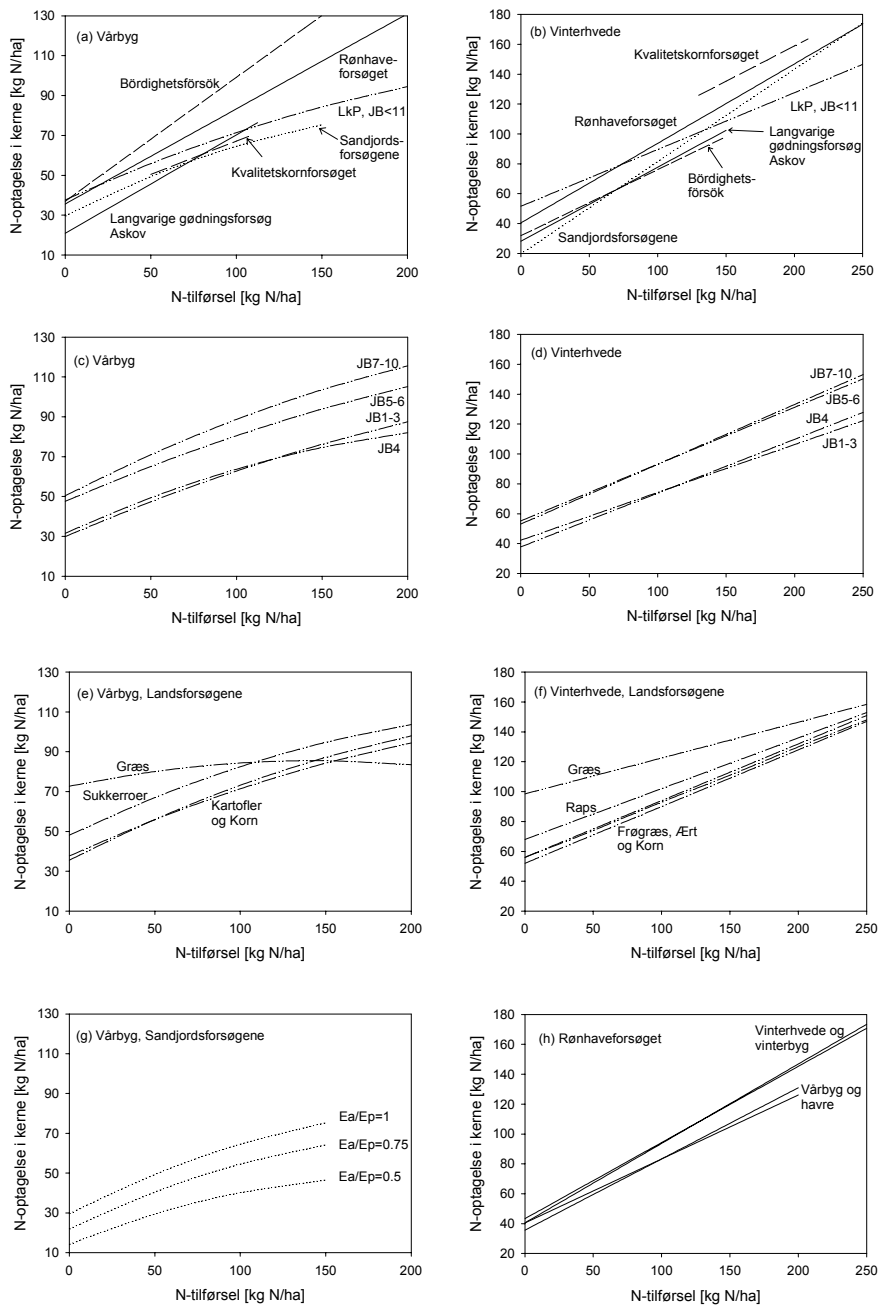
Afgroede	Kerne			Halm		
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
	[kg N/ha]	[kg N/ha pr. kg N/ha]		[kg N/ha]	[kg N/ha pr. kg N/ha]	
Vinterhvede	28.2 $\pm$ 3.24	0.495 $\pm$ 0.035	0.76	6.7 $\pm$ 0.86	0.158 $\pm$ 0.009	0.82
Vårbyg	20.9 $\pm$ 2.06	0.494 $\pm$ 0.030	0.81	10.7 $\pm$ 1.77	0.195 $\pm$ 0.025	0.47

For sammenligning med andre datakilder er relationerne for kvælstofoptagelse i kerne i Tabel 9 vist i Figur 2a (vårbyg) og Figur 2b (vinterhvede). I Figur 3 vises relationerne for kvælstofoptagelsen i halm af vårbyg og vinterhvede.

Hvert fjerde år udtages jordprøver til bestemmelse af bl.a. kvælstofkoncentrationen i jorden. Disse data har ikke tidligere været offentliggjort, men en foreløbig analyse af målingerne for perioden 1972-2000, i alt otte prøvetagninger, tyder på, at kvælstofkoncentrationen i pløjelaget ændres med omkring  $-0.00068$  pct.-point N pr. år, og at denne ændring ikke påvirkes væsentligt af gødningsniveauet i intervallet  $\frac{1}{2}N - 1\frac{1}{2}N$ , idet  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$  med ligning (8) kunne estimeres til  $2.9 \times 10^{-6}$  pct.-point/år pr. kg N/ha. Dette betyder, at der skal tilføres mere end 200 kg N/ha/år for at neutralisere den generelle nedslidning af pløjelagets kvælstofpulje.

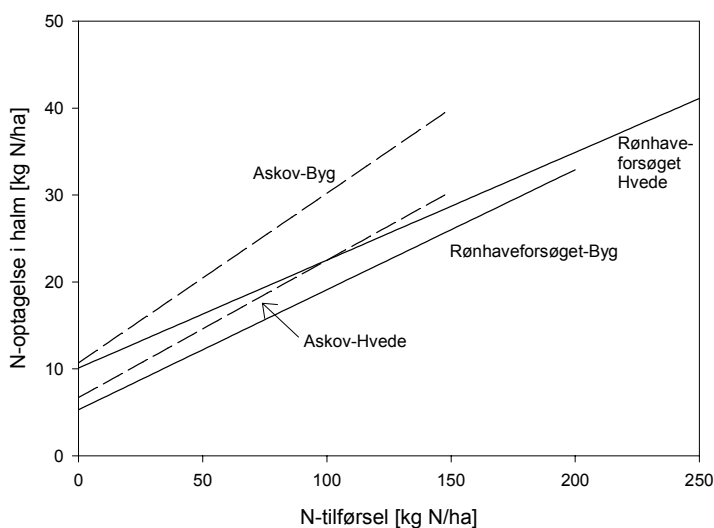
### 6.11 Rønhaveforsøget

På Rønhave forsøgsstation (JB7) er der siden 1972 gennemført et forsøg med tre niveauer af handelsgødning (Tabel 10) i afgrøderne vinterhvede, vårbyg, vinterbyg (fra 1980) og havre, med fire gentagelser af hver kombination (Thomsen *et al.*, 2000, 2001, 2003). Halmen blev fjernet fra marken. I 1999-2001 blev hver parcel underinddelt i fem mindre parceller for tilførsel af stigende mængde kvælstof med det formål at undersøge effekten af de tidligere kvælstofniveauer. De fem kvælstofniveauer var 0, 50, 100, 150 og 200 kg N/ha i vårsæd og 0, 60, 120, 180 og 240 kg N/ha i vintersæd. Kombinationen af forsøgsår for ændret kvælstofniveau og afgrøde fremgår af Tabel 11, og det bemærkes, at første- og anden-årsvirkningen af ændret kvælstofniveau er koblet til både år og afgrøde. Der blev bestemt tørstofudbytte og kvælstofoptagelse i både kerne og halm. Desuden blev der i 2000/2001 i hver parcel udtaget jordprøver fra 0-20 cm dybde til analyse for koncentrationen af total N, men der fandtes ingen signifikante effekter af tidligere niveau for kvælstofgødning (Thomsen *et al.*, 2003).



Figur 2. Kvælstofoptagelse ( $N_{\text{optagelse}}$ ) i kerne af vårbyg og vinterhvede som funktion af kvælstoftilførslen ( $N_{\text{tilførsel}}$ ) vist for forskellige datakilder. Bemærk forskellige skalaer på de to akser for vårbyg og vinterhvede. (Forklaring til de enkelte figurer findes på næste side).

- (a) Vårbyg og (b) vinterhvede for *De langvarige gødningsforsøg* på Askov, *Rønhaveforsøget*, *Sandjordsforsøgene*, *Kvalitetskornforsøgene*, samt for forsøg udført i regi af Landskontoret for Planteavl (LkP) med kornafgrøder som forfrugt (*Landsforsøgene*). Desuden det svenske *Bördighetsförsök* med kornafgrøder.
- (c) Effekt af jordtype på kvælstofoptagelse i byg i *Landsforsøgene*, hvor forfrugten var forskellige kornafgrøder.
- (d) Effekt af jordtype på kvælstofoptagelse i vinterhvede i *Landsforsøgene*, hvor forfrugten var forskellige kornafgrøder.
- (e) Effekt af forfrugt på kvælstofoptagelse i vårbyg i *Landsforsøgene*.
- (f) Effekt af forfrugt på kvælstofoptagelse i vinterhvede i *Landsforsøgene*.
- (g) Kvælstofoptagelse vårbyg ved aftagende forhold mellem aktuel fordampning og potentiel fordampning (jf. Tabel 15) (*Sandjordsforsøgene*).
- (h) Kvælstofoptagelse i kerne i de fire kornafgrøder i *Rønhaveforsøget*.



Figur 3. Kvælstofoptagelse ( $N_{\text{optagelse}}$ , [kg N/ha]) i halm som funktion af kvælstoftilførsel ( $N_{\text{tilførsel}}$ , [kg N/ha]). Forsøgsresultater fra *De langvarige gødningsforsøg* på Askov (jf. Tabel 9) og *Rønhaveforsøget* (jf. Tabel 12).

Tabel 10. Niveau for tilførsel af handelsgødningskvælstof i *Rønhaveforsøget*, 1972-98/99.

	N1-30%	N1	N1+30%
	[kg N/ha]	[kg N/ha]	[kg N/ha]
Vintersæd	124	172	202
Vårsæd	93	132	171

Tabel 11. Forsøgsår med underinddeling af parcellerne i det oprindelige forsøg, samt antal forudgående forsøgsår med kvælstofgødskning som i Tabel 10.

	1999	2000	2001	Antal forudgående forsøgsår
Vinterhvede	+	+		27
Vårbyg	+	+		27
Vinterbyg		+	+	20
Havre		+	+	28

Kun for vinterhvede, og kun i det første år efter ændring i kvælstofniveaue, fandtes signifikant effekt af de foregående knap 30 års forskel i kvælstofniveaue (Thomsen *et al.*, 2001). Uanset niveaue for kvælstofgødskning i 1999 gav det tidligere kvælstofniveau N1+30% et merudbytte på 4 hkg/ha kerne og en mer-optagelse af kvælstof på 10 kg N/ha i forhold til N1-30%. Tilsvarende var mer-optagelsen af kvælstof for N1 6 kg N/ha i forhold til N1-30%.

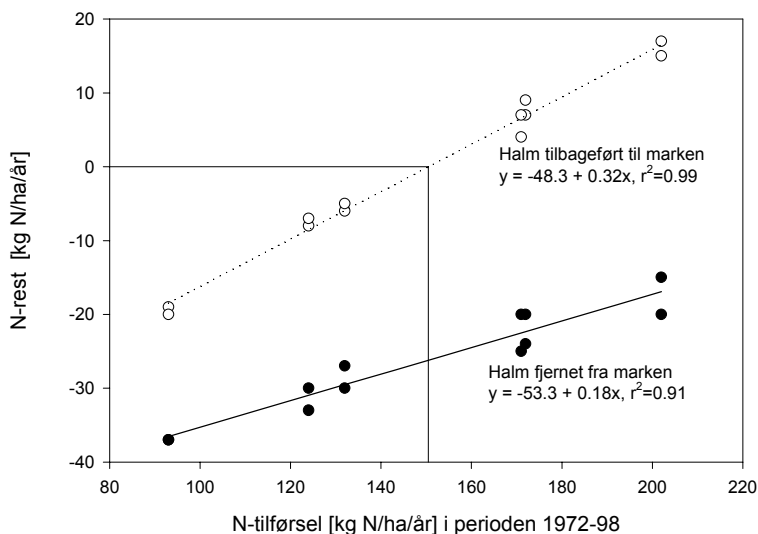
Uanset afgrøde og forsøgsår kunne kvælstofoptagelsen beskrives som en lineær funktion af kvælstoftilførslen (testet mod kvadratisk model, F-test er ikke vist). For kerne fandtes en kvælstofoptagelse på omkring 0.50 kg N/ha pr. tilført kg N/ha, mens kvælstofoptagelsen i halmen var 0.13 kg N/ha pr. tilført kg N/ha (jf. parameteren *b* i Tabel 12). Kvælstofoptagelsen ved ugødet (parameteren *a* i Tabel 12) var gennemsnitlig 40 kg N/ha i kerne, og kun knap 7 kg N/ha i halmen. De i Tabel 12 beregnede regressioner for kvælstofoptagelse i kerne er vist i Figur 2h, og det ses, at der kun er en lille forskel mellem efterårs- og forårssåede afgrøder.

Tabel 12. Kvælstofoptagelse som funktion af kvælstoftilførsel i *Rønhaveforsøget* beregnet med ligning (6). Estimerer ( $\pm$ S.E.) for 8 kombinationer af afgrøde og afgrødedel. (Beregnet på data fra I.K. Thomsen, pers. komm.)

Afgrøde	Kerne			Halm		
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
	[kg N/ha]	[kg N/ha pr. kg N/ha]		[kg N/ha]	[kg N/ha pr. kg N/ha]	
Vinterhvede	40.5 $\pm$ 1.49	0.532 $\pm$ 0.010	0.95	10.1 $\pm$ 0.62	0.124 $\pm$ 0.004	0.88
Vårbyg	35.6 $\pm$ 1.23	0.477 $\pm$ 0.010	0.95	5.3 $\pm$ 0.64	0.138 $\pm$ 0.005	0.86
Vinterbyg	43.3 $\pm$ 1.03	0.510 $\pm$ 0.007	0.97	6.5 $\pm$ 0.36	0.129 $\pm$ 0.002	0.96
Havre	40.8 $\pm$ 1.49	0.432 $\pm$ 0.012	0.92	4.9 $\pm$ 0.53	0.126 $\pm$ 0.004	0.89

Idet det antages, at kvælstofoptagelsen i afgrøderne dyrket i de foregående knap 30 år kan beskrives på samme måde, kan kvælstofoptagelsen i kerne og halm beregnes for de tre tidligere kvælstofniveauer (N1-30%, N1 og N1+30% jf. Tabel 10). Endvidere har Thomsen *et al.* (2003) estimeret den årlige kvælstofudvaskning, og angiver på denne baggrund en kvælstofbalance baseret på differencen mellem tilført med handelsgødning, bortført med afgrøden og udvasket. I Figur 4 er den beregnede kvælstofbalance ( $N_{rest}$ ) vist for de 12 kombinationer af

afgrøde og tidligere kvælstofniveau, både med og uden tilbageførsel af halmen. Tillige er de lineære regression mellem  $N_{\text{tilførsel}}$  og  $N_{\text{rest}}$  indtegnet. Ved tilbageførsel af halmen fandtes, at  $N_{\text{rest}} = 0$  ved en kvælstoftilførsel på 150 kg N/ha og, at ændringen ( $dN_{\text{rest}}/dN$ ) var 0.32 kg N/ha/år pr. kg  $N_{\text{tilførsel}}$ /ha (Figur 4). Ved fjernelse af halmen blev der ikke opnået balance indenfor det normale interval for kvælstoftilførsel. Det bemærkes, at  $N_{\text{rest}}$  dels omfatter hele rodzonen og ikke alene pløjelaget, og dels omfatter mere end ændringer i jordens kvælstofpulje alene.



Figur 4. Beregnet restkvælstof ( $N_{\text{rest}}$ ) ved stigende kvælstoftilførslen ( $N_{\text{tilførsel}}$ ) i *Rønhaveforsøget*. Beregninger er foretaget på grundlag af de af Thomsen *et al.* (2003) ekstrapolerede værdier for afgrødens kvælstofoptagelse og modelberegne værdier for kvælstofudvaskningen ( $N_{\text{rest}} = N_{\text{tilførsel}} - N_{\text{optagelse}} - N_{\text{udvaskning}}$ ). Hver regression er foretaget på 12 punkter, repræsenterende kombinationer af fire afgrøder og tre tidligere gødskningsniveauer (se tekst). Ved tilbageførsel af halmen er der balance mellem tilførsel og bortførsel ved en kvælstoftilførsel på 150 kg N/ha.

For sammenligning med andre datakilder er relationerne for kvælstofoptagelse i kerne i Tabel 12 vist i Figur 2a (vårbyg) og Figur 2b (vinterhvede). Tilsvarende er relationerne for kvælstofoptagelsen i halm af vårbyg og vinterhvede vist i Figur 3.

## 6.12 Kvalitetskornforsøgene

I projektet *Produktion af øl ud fra pesticidfri, danskavlet malbyg* blev der i 1993-95 udført forsøg i vårbyg med to sorter og tre sortsblandinger, som blev tilført 50, 80 eller 110 kg N/ha (Jørgensen & Schultz, 1997; J.R. Jørgensen, pers. komm.). Forsøgene blev gennemført på Roskilde forsøgsstation (JB5) med kornafgrøder som forfrugt.

I projektet *Dyrkning af hvede til kikse-mel* blev der i 1998-2000 udført forsøg på Flakkebjerg (JB6) og Rønhave (JB7) med tre vinterhvedesorter, der blev tilført 130, 170 eller 210 kg N/ha (J.R. Jørgensen, pers. komm.). På Flakkebjerg var forfrugterne: vårraps, vinterbyg og vårbyg; mens forfrugten på Rønhave i alle tre år var raps (vinter-, vinter- og vårraps).

I begge forsøgsserier blev kvælstofkoncentrationen i kernerne bestemt, hvorved kvælstofoptagelsen kan beregnes. Den lineære sammenhæng mellem kvælstoftilførsel og kvælstofoptagelse i kerne fremgår af Tabel 13, som for vårbyg og vinterhvede er indtegnet i henholdsvis Figur 2a og Figur 2b.

Tabel 13. Kvælstofoptagelse som funktion af kvælstoftilførsel i *Kvalitetskornforsøgene* beregnet med ligning (6). Estimerer ( $\pm$ S.E.) for parametre i ligning (6) (Beregnet på data fra J.R. Jørgensen, pers. komm.).

Afgørde og lokalitet	Parametre		
	a	b	R <sup>2</sup>
	[kg N/ha]	[kg N/ha pr. kg N/ha]	
Vårbyg	33.8 $\pm$ 1.79	0.333 $\pm$ 0.0214	0.85
Vinterhvede	64.5 $\pm$ 3.34	0.472 $\pm$ 0.0192	0.49
Vinterhvede, Flakkebjerg	78.0 $\pm$ 4.32	0.444 $\pm$ 0.0249	0.51
Vinterhvede, Rønhave	50.8 $\pm$ 3.53	0.502 $\pm$ 0.0203	0.66

Anvendelsen af en kvadratisk model for kvælstofoptagelsen kunne ikke forbedre beskrivelsen af data i forhold til en lineær model (F-test for modeller er udført, men ikke vist). Hverken for vårbyg og vinterhvede fandtes der ingen effekt af sorter eller dyrkningssæsoner, men i vinterhvedeforsøgene kunne en opdeling i de to lokaliteter forbedre beskrivelsen (Tabel 13). Den estimerede høje kvælstofoptagelse for ugødet (parameteren a i Tabel 13) på Flakkebjerg kan imidlertid ikke forklares med en forskel i forfrugt og jordtype på de to lokaliteter. Den manglende effekt af sorter kan skyldes, at de i forsøgene indgående sorter tilhører udvalgte grupper, hhv. maltbygssorter og kiksemelsorter, og derfor ikke kan udtrykke den potentielle sortsvariation.

### 6.13 Sandjordsforsøgene

Med henblik på at klarlægge, hvor stor en kvælstofoptagelse der i gennemsnit af en årrække kan forventes for forskellige afgrøder ved forskellig kvælstoftilførsel, har Simmelsgaard (1986) foretaget en sammenstilling af en række forsøg udført på sandjord (JB1-4) ved Statens Planteavlsvforsøgs Forsøgsstationer. Forsøgene blev udelukkende gødet med kvælstof i form af handelsgødning og udført i perioden 1970-84.

Kun i vårbyg foreligger der tilstrækkelig mange forsøg, hvor kvælstofkoncentrationen er målt i både kerne og halm. I alt foreligger der 236 kombinationer af kvælstoftilførsel, sted, år og



vanding. Simmelsgaard (1986) fandt, at den samlede kvælstofoptagelse,  $Y$  [kg N/ha], i vårbyg kunne estimeres ved:

$$Y = -8.07 - 0.178 N - 0.000744 N^2 + 42.91 E + 1.527 NE - 0.764 NE^2, \text{ hvor} \quad (10)$$

$N$  er tilført kvælstof [kg N/ha], og

$E$  er den relative fordampning (aktuel fordampning/potentiel fordampning,  $E_a/E_p$ ).

Den relative fordampning har stor betydning for, hvorledes afgrødens kvælstofoptagelse afhænger af kvælstoftilførslen, idet marginaloptagelsen falder kraftigt under tørre forhold (parameteren  $b$  i Tabel 14). Ligeledes falder den kvælstofmængde, som jorden kan stille til rådighed for afgrøden (parameteren  $a$  i Tabel 14).

Tabel 14. Parametre for den samlede kvælstofoptagelse [kg N/ha] i vårbyg,  $Y = a + bN + cN^2$ , ved indsætning af værdierne 0.5; 0.75 og 1 for den relative fordampning,  $E$ , i ligning (10). Efter Simmelsgaard (1986).

Relativ fordampning $E_a/E_p$	Parametre		
	$a$ [kg N/ha]	$b$ [kg N/ha pr. kg N/ha]	$c$ [kg N/ha (kg N/ha) <sup>2</sup> ]
1	34.8	0.59	-0.000744
0.75	24.1	0.54	-0.000744
0.5	13.4	0.40	-0.000744

Tabel 15. Parametre for kvælstofoptagelse i kerne af vårbyg og vinterhvede,  $Y = a + bN + cN^2$ , ved indsætning af værdierne 0.5; 0.75 og 1 for den relative fordampning,  $E$ , i en ligning svarende til ligning (10). Efter Simmelsgaard (1986).

Afgørde (kerne)	Relativ for- dampning $E_a/E_p$	Parametre		
		$a$ [kg N/ha]	$b$ [kg N/ha pr. kg N/ha]	$c$ [kg N/ha (kg N/ha) <sup>2</sup> ]
Vårbyg	1	29.7	0.438	-0.000889
	0.75	22.0	0.415	-0.000889
	0.5	14.3	0.348	-0.000889
Vinterhvede	>0.88	19.8	0.618	-

Med hensyn til kvælstofoptagelse i kerne af vårbyg og vinterhvede kan der ud fra Simmelsgaard (1986) beregnes parametrene vist i Tabel 15. I alt 598 observationer i vårbyg viste, at både kvælstofoptagelsen i kerne og marginaloptagelse faldt kraftigt under tørre forhold (Tabel 14 og Figur 2g). For vinterhvede kunne det ikke bestemmes, i hvilken grad kvælstofoptagelsen afhæng af den relative fordampning, idet samtlige 54 observationer var målt ved

$Ea/Ep > 0.88$ . Desuden kunne det kvadratiske led udelades. For sammenligning med andre datakilder er relationerne i Tabel 15, Figur 2a (vårbyg,  $Ea/Ep=1$ ) og Figur 2b (vinterhvede).

#### 6.14 Landsforsøgene

Hvert år udfører de lokale planteavlskontorer et stort antal forsøg med stigende mængde kvælstofgødsning. Forsøgene dækker over variation i bl.a. jordtype, forfrugtsvirkning samt eftervirkning af husdyrgødning. Da brugstypen i denne rapport er kornrige sædskeer uden husdyrgødning, udvalgte forsøg med ingen eller kun beskeden tilførsel af husdyrgødning i årene forud for forsøgsåret. For perioden 1993-2001 blev der således udvalgt 101 forsøg i vårbyg og 199 forsøg i vinterhvede. I vårbygforsøgene blev der tilført op til 200 kg N/ha i intervaller af 40 kg N/ha, mens vinterhvedeforsøgene blev tilført op til 250 kg N/ha i intervaller af 50 kg N/ha, i alt seks kvælstofniveauer for hver afgrøde. Forsøgene med vinterhvede er omtalt af Knudsen (2001). I udtræk fra forsøgsdatabasen ved Landskontoret for Planteavl (L. Knudsen, pers. komm.) blev de udvalgte forsøg grupperet efter jordtype og forfrugt (Tabel 16). I udtrækket fra forsøgsdatabasen angives den gennemsnitlige kvælstofoptagelse for hvert kvælstofniveau i hver afgrøde-forfrugt-jordtype gruppe. Baseret på de seks observationer i hver gruppe, blev parametrene for en lineær og kvadratisk funktion beregnet (Tabel 16).

For vinterhvede kunne data for kvælstofoptagelsen beskrives ligeså godt med en simpel lineær funktion som med en kvadratisk funktion (F-test er foretaget, men ikke vist), mens dette ikke var tilfældet for vårbyg (Jtabel 16). Tilsvarende beregninger er foretaget for kerneudbyttet som funktion af kvælstoftilførslen, men her kunne beskrivelsen af data ikke reduceres til en lineær funktion, hverken for vårbyg eller vinterhvede (data ikke vist).

For sammenligning med andre datakilder er relationerne i Tabel 16 vist i Figur 2a (vårbyg) og Figur 2b (vinterhvede). Endvidere giver det omfattende forsøgsmateriale mulighed for at belyse, hvorledes jordtype og forfrugt påvirker kvælstofoptagelsen i kerne. For vårbyg øgedes kvælstofoptagelsen jo højere JB-nr., dog fandtes der ingen forskel mellem JB1-3 og JB4, hvilket sandsynligvis skyldes, at JB1-3 typisk vandes (Figur 2c). Kvælstofoptagelsen i kerne af vinterhvede fandtes at være omkring 15 kg N/ha højere på lerjord (JB5-10) end på sandjord (JB1-4) uanset gødskningsniveauet (Tabel 16 og Figur 2d). Hverken for vårbyg og vinterhvede fandtes der væsentlig effekt af jordtype på hældningen,  $dN_{\text{optagelse}}/dN_{\text{tilførsel}}$  (Figur 2c og Figur 2d). De fleste forfrugter havde samme hældning på kvælstofoptagelseskurven, og kun hvor forfrugten var græs var hældningen reduceret (Figur 2e og Figur 2f), formentlig en følge af denne forfrugts gode kvælstofeftervirkning.

Tabel 16. Kvælstofoptagelse i kerne som funktion af kvælstoftilførsel i *Landsforsøgene*. Estimer ( $\pm$ S.E.) for parametre i ligning (6) og (7) for hhv. vinterhvede og vårbyg. (Beregnet på data fra L. Knudsen, pers. komm.). De benyttede søgekriterier for Afgrøde, Forfrugt og JBnr ved udtræk fra Landscentrets forsøgsdatabase er angivet. For korn som forfrugt har det været muligt, at underopdele datamaterialet i fire grupper af jordtype (vist med gråtone)

Afgrøde	Forfrugt	Jordtype (JBnr)	Antal forsøg	a [kg N/ha]	b [kg N/ha pr. kg N/ha]	c $\times 10^{-3}$ [kg N/ha (kg N/ha) <sup>-2</sup> ]	R <sup>2</sup>
Vårbyg	Korn	<11	55	37.7 $\pm$ 0.52	0.39 $\pm$ 0.012	-0.53 $\pm$ 0.06	0.999
	Korn	7-10	10	50.4 $\pm$ 0.83	0.44 $\pm$ 0.020	-0.57 $\pm$ 0.09	0.999
	Korn	5-6	11	47.6 $\pm$ 0.52	0.37 $\pm$ 0.012	-0.41 $\pm$ 0.06	0.999
	Korn	4	17	31.6 $\pm$ 0.81	0.39 $\pm$ 0.019	-0.69 $\pm$ 0.09	0.998
	Korn	1-3	17	29.9 $\pm$ 0.18	0.37 $\pm$ 0.004	-0.41 $\pm$ 0.02	0.999
	Sukkerroer	<11	19	48.1 $\pm$ 1.11	0.41 $\pm$ 0.026	-0.66 $\pm$ 0.12	0.997
	Kartofler	<11	10	35.6 $\pm$ 0.83	0.44 $\pm$ 0.020	-0.64 $\pm$ 0.09	0.999
	Græs *	<11	16	72.7 $\pm$ 1.31	0.18 $\pm$ 0.053	-0.63 $\pm$ 0.42	0.95
Vinter- hvede	Korn	11	3	81.4 $\pm$ 2.80	0.11 $\pm$ 0.018	-	0.88
	Korn	<11	114	51.6 $\pm$ 3.65	0.38 $\pm$ 0.024	-	0.98
	Korn	7-10	59	53.1 $\pm$ 4.04	0.40 $\pm$ 0.027	-	0.98
	Korn	5-6	38	55.2 $\pm$ 3.63	0.38 $\pm$ 0.024	-	0.98
	Korn	4	12	37.8 $\pm$ 2.14	0.36 $\pm$ 0.014	-	0.99
	Korn	1-3	5	42.3 $\pm$ 3.16	0.32 $\pm$ 0.021	-	0.98
	Ært	<11	40	55.6 $\pm$ 3.04	0.37 $\pm$ 0.020	-	0.98
	Raps	<11	24	67.7 $\pm$ 4.00	0.34 $\pm$ 0.026	-	0.97
	Frøgræs	<11	12	55.5 $\pm$ 3.66	0.38 $\pm$ 0.024	-	0.98
Græs *	<11	6	98.5 $\pm$ 3.49	0.24 $\pm$ 0.023	-	0.96	

\* Græs og kløvergræs blandinger.

### 6.15 Organisk stof i jord

I 1956 blev der ved Askov Forsøgsstation anlagt fastliggende ramme- og markforsøg til belysning af sædskiftets indflydelse på jordens indhold af kulstof og kvælstof. I begge forsøg indgik forsøgsled, hvor der udelukkende blev anvendt kvælstof i form af handelsgødning.

I markforsøget drejede det sig om tre forsøgsled, og sædskiftet var typisk: vinterhvede, roer/majs, vårbyg og kløvergræs/hør. I gennemsnit af sædskiftet blev der tilført 70 kg N/ha, dog 100 kg N/ha i perioden 1973-85, og al overjordisk plantemateriale blev fjernet fra forsøgsparcellerne ved høst (Christensen, 1990).

I rammeforsøget (70 cm diameter, 50 cm dybe uden fast bund) (Christensen, 1988) indgik et forsøgsled med samme sædskifte som i markforsøget, også med bortførelse af al overjordisk plantemateriale. Dette led blev gødet med 70 kg N/ha i hele forsøgsperioden. Desuden indgik to forsøgsled med vedvarende dyrkning af kornafgrøder. Begge disse forsøgsled blev tilført 85 kg N/ha, men i det ene blev halmen nedmuldet. høst.

I rammeforsøget blev der hvert fjerde år udtaget jordprøver til bestemmelse af pløjelagets (0-25 cm) kvælstofkoncentration, i alt ni prøvetagninger, mens der i markforsøget blev udtaget jordprøver i 0-20 cm dybde hvert år i den 30-årige forsøgsperiode.

Tabel 17. Estimeret årlig ændring i pløjelagets kvælstofindhold (Christensen, 1988, 1990).

Forsøgstype	Afgrøde	Kvælstofkoncentration i pløjelag ved anlæg [%]	Ændring i pløjelagets kvælstofkoncentration [pct.-point pr. år]
Rammeforsøg (JB4)	Sædskifte	0.228	-0.0010
	Korn, halm fjernet	0.234	-0.0017
	Korn, halm nedmuldet	0.230	-0.0009
Markforsøg (JB5)	Sædskifte	0.139	-0.000717
	Sædskifte	0.147	-0.000949
	Sædskifte	0.151	-0.001074

De estimerede ændringer i Tabel 17 svarer til et fald i jordens kvælstofpulje på omkring 25 kg N/ha/år, hvilket kan sammenholdes med et gennemsnitligt indhold i pløjelaget på 8 t N/ha (Heidmann *et al.*, 2001). I øvrigt fandt Heidmann *et al.* (2001) i 66 handelsgødede KVADRATNETspunkter på forskellige jordtyper en gennemsnitlig årlig ændring på -0.001 pct.-point N i pløjelagets kvælstofkoncentration, hvilket er i samme størrelsesorden som resultaterne i Tabel 17. Der foreligger imidlertid kun indirekte oplysninger om, hvorvidt afgrøderester er fjernet fra eller tilbageført til markerne i KVADRATNETspunkterne, men antallet af år med halmnedmuldning fandtes ikke at have indflydelse på nedslidningsraten Heidmann *et al.* (2001).

### 6.16 Bördighetsförsök i Sydsverige

I 1957 blev der i Sverige påbegyndt en række forsøg til belysning af jordens frugtbarhed afhængig af dyrkningssystem og gødningstilførelse. Resultaterne vedrørende effekt på jordens kulstofpulje indtil 1996 er publiceret af Carlgren & Mattsson (2001). Forsøgene blev gennemført med to fire-markssædskifter: Et kornrigt sædskifte (byg; korsblomstret olieafgrøde; vinterhvede; sukkerroer) med tilbageførelse af halm, og et kvægbrugssædskifte (byg; græs; vinterhvede; sukkerroer), hvor halmen i første omgang blev fjernet, og derfor medtaget i opgørelsen af kvælstofbortførelse med afgrøden. Halmen blev efterfølgende tilbageført sammen med husdyrgødningen (20 t/ha fast staldgødning til alle parceller hver fjerde år forud for roer). I gennemsnit blev afgrøderne i sædskiftet tilført 0, 50, 100 og 150 kg N/ha/år. Fire af

forsøgene blev gennemført i Skåne (Fjärdingslöv, Orup, S. Ugglarp og Ekebo), og her er betingelserne meget lig østdanske forhold, bl.a. var jorden på de fire forsøgslokaliteter karakteriseret ved 8-17% ler og 1.4-3.1% organisk kulstof (Ivarsson & Bjarnason, 1988). I 1968 og 1988 blev der udtaget jordprøver til bestemmelse af kvælstofkoncentrationen i 0-20 cm dybde (L. Mattsson, pers. komm.). På dette grundlag er ændringen i pløjelagets kvælstofpulje ( $\Delta N_{\text{pløjelag}}$ ) med ligning (8) estimeret til  $-0.27 \times 10^{-3}$  pct.-point for det kornrige sædskifte og en størrelsesorden mindre,  $-0.047 \times 10^{-3}$  pct.-point, i kvægbrugssædskiftet. Ændring i nedslidningsraten ved ændring i kvælstoftilførslen,  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$ , er ligeledes med ligning (8) estimeret til henholdsvis 4.1 og  $1.7 \times 10^{-6}$  pct.-point/år pr. kg N/ha, hvilket betyder, at den generelle nedslidning af pløjelagets kvælstofpulje kan neutraliseres ved tilførsel af 70 henholdsvis 30 kg N/ha/år i de to sædskifter.

Afgrødens kvælstofoptagelse som funktion af kvælstoftilførslen kan i disse forsøg beregnes på grundlag af data, der venligst er stillet til rådighed af L. Mattsson (pers. komm.). For at beregne den langsigtede virkning af forskellige gødskningsniveauer, benyttes kun data efter gennemførelse af syv rotationer, dvs. efter 28 forsøgsår. I beregningerne var vårbyg repræsenteret med årene 1985, 1989, 1993 og 1997, mens vinterhvede var repræsenteret med årene 1987, 1991 og 1995. Forsøgene omfattede desuden fire niveauer af PK-gødskning, hvoraf det ene ikke blev gødet med PK. Mangel på PK vil påvirke kvælstofoptagelsen, og derfor er beregninger gennemført på de tre øvrige led, hvor PK-mangel ikke forekom.

Tabel 18. Kvælstofoptagelse som funktion af kvælstoftilførsel i *Bördighetsförsökene* beregnet med ligning (6). Estimerer ( $\pm$ S.E.) for parametre i ligning (6) (Beregnet på data fra L. Mattsson, pers. komm.). I sidste kolonne er vist variationsbredden for hældningen for 16 og 12 kombinationer af år×sted for henholdsvis vårbyg og vinterhvede

Afgørde	Sædskifte	Parametre			
		a [kg N/ha]	b (gennemsnit) [kg N/ha pr. kg N/ha]	R <sup>2</sup>	b (år×sted) [kg N/ha pr. kg N/ha]
Vårbyg	Kvægbrug <sup>1)</sup>	59.8 ±2.31	0.528 ±0.0412	0.46	0.24-0.82
Vårbyg	Planteavl <sup>2)</sup>	37.0 ±1.69	0.621 ±0.0302	0.69	0.37-0.87
Vinterhvede	Kvægbrug <sup>1)</sup>	59.5 ±2.18	0.442 ±0.0233	0.72	0.24-0.63
Vinterhvede	Planteavl <sup>2)</sup>	31.9 ±2.45	0.442 ±0.0262	0.67	0.19-0.66

<sup>1)</sup> Kerne plus halm

<sup>2)</sup> Kun kerne, idet halmen ikke blev fjernet fra marken

Den gennemsnitlige hældning (parameteren b i Tabel 18) dækker over betydelig variation mellem år og steder, hvilket ses af sidste kolonne i tabellen. Tages der højde for års- og stedvariationen, kan ligning (6) forklare betydeligt mere af variationen, idet R<sup>2</sup> bliver >0.90 for alle kombinationer af afgrøde og sædskifte i Tabel 18. Dette er interessant, men det har indenfor rammerne af denne rapport ikke været muligt at kæde denne års- og stedvariationen sammen

med andre parametre, som f.eks. klima og jordtype på de enkelte forsøgslokaliteter. Da vårbyg og vinterhvede forekommer med to års forskydning i sædskiftet, vil vekselvirkningen med år og sted være forskellig for de to afgrøder.

Det var forventet, at bortførelse af halmen ville have øget estimatet for ændring i afgrødens kvælstofoptagelse ved ændret kvælstoftilførsel. Dette var imidlertid ikke tilfældet, og for vårbyg var responsen for kvælstoftilførsel endda mindre ved bortførelse af halm (kvægbrugssædskiftet), end når den blev tilbageført direkte (planteavlssædskiftet) jf. parameteren  $b$  i Tabel 18. Dette hænger sandsynligvis sammen med højere frugtbarhed i kvægbrugssædskiftet, hvor Carlgren & Mattsson (2001) for ugødede forsøgsled finder højere udbyttet i kvægbrugssædskiftet i forhold til planteavlssædskiftet, især for afgrøder med lang vækstsæson (vinterhvede og roer). Den ca. dobbelt så høje værdi for parameteren  $a$  i Tabel 18 kan derimod ikke forklares med højere frugtbarhed, men skyldes forskelle i halmhåndteringen i de to sædskifter, idet kvælstofoptagelsen i halmen er medregnet i afgrødens bortførelse i kvægbrugssædskiftet.

På grundlag af estimaterne i Tabel 18 er relationen mellem kvælstofoptagelse i kerne og kvælstoftilførsel for vårbyg og vinterhvede i et planteavlssædskifte er indtegnet i henholdsvis Figur 2a og Figur 2b.

## 7. Diskussion

Ændring i de to mest betydende poster i ligning (3),  $\Delta N_{\text{udvaskning}}$  og  $\Delta N_{\text{optagelse(kerne+halm)}}$ , ved ændret kvælstoftilførsel,  $\Delta N_{\text{tilførsel}}$ , diskuteres og kvantificeres i henholdsvis afsnit 7.1 og 7.2. I afsnit 7.3 kvantificeres ændringer i nedslidningsraten for kvælstofpulje i pløjelaget,  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$ , på grundlag af forsøgsresultater, mens konsistensen af ligning (3) diskuteres i afsnit 7.4 på grundlag af de poster, der indgår i residualen,  $\Delta N_{\text{rest}}$ .

### 7.1 Kvælstofudvaskning

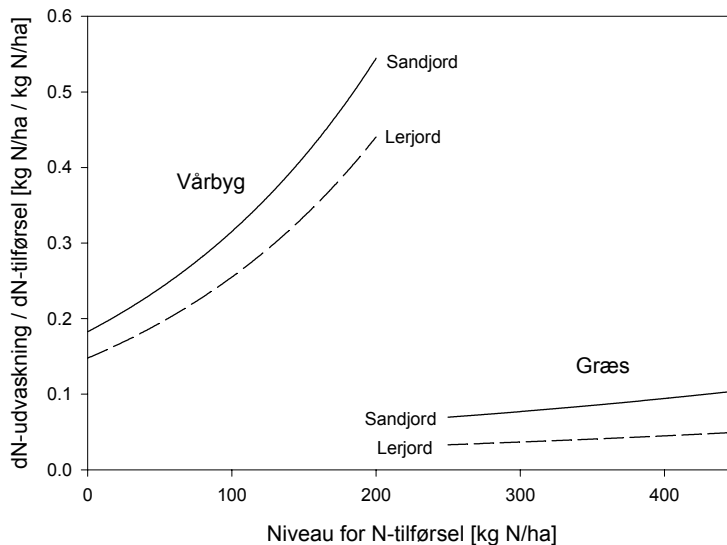
Anvendelse af en relativ udvaskningsmodel med gødskningsniveauet 1N som basis gør beskrivelsen af kvælstofudvaskningen som funktion af kvælstoftilførslen mere generel, men samtidig abstraheres fra de aktuelle niveauer for kvælstoftilførsel og kvælstofudvaskning. Til orientering er disse givet i Appendiks A for de omtalte forsøg, og det bemærkes, at kvælstoftilførslen for niveauet 1N varierer fra forsøg til forsøg.

Den afstrømmende vandmængde fra rodzonen er væsentlig for kvælstofudvaskningen, men den afstrømmende vandmængde afhænger ikke udelukkende af nedbøren men også af fordampningen, hvorved gødskningsniveauet igennem afgrødens produktivitet kan have en direkte indflydelse på den afstrømmende vandmængde. Ved lav planteproduktion er fordampningen mindre og jorden udtørres ikke i samme grad, hvorved den vil vandmættes tidligere (Kjellerup & Kofoed, 1983). Denne forskel i udtørring bevirker op til 5% større afstrømning fra ugødet vårbyg i forhold til en normal gødet afgrøde (Djurhuus, 1992). I gennemsnit af to

jordtyper (JB1 og JB4) og tre forsøgsår var merafstrømningen 16 mm svarende til en forøgelse på 3% (Djurhuus, 1992). Der kan således ske en mindre underestimering af kvælstofudvaskningen ved gødskningsniveauer mindre end  $\frac{1}{2}N$  i de forsøg, hvor kvælstofudvaskningen baseres på estimater for den afstrømmende vandmængde ved 1N. Dette gælder også den relative udvaskningsmodel, der anvendes som reference, men da afstrømningen i de sæsoner, som modellen baserer sig på, var 197-830 mm, må en underestimering af afstrømningen på 15-20 mm anses for være af mindre betydning. I lysimeterforsøg bestemmes den afstrømmende vandmængde derimod direkte, og denne forskel i metode kan være en del af forklaringen på, hvorfor kvælstofudvaskningen ved lave gødskningsniveauer er højere i lysimeterforsøgene sammenlignet med den indtegnede referencekurve for den relative udvaskningsmodel (Figur 1c-f). Samtidig kan randeffekter i lysimeterforsøgene give øget tørstofproduktion, øget vandforbrug samt øget kvælstofoptagelse, hvilket kan medføre en underestimering af kvælstofudvaskningen ved gødskningsniveauer over det normale i forhold til referencekurven. En sådan tendens ses også i Figur 1c-f. Afvigelsen mellem data fra lysimeterforsøg og den relative udvaskningsmodel kan således forklares kvalitativt, og den relative udvaskningsmodel anses derfor for at være i overensstemmelse med de lysimeter- og markforsøg, hvortil der er foretaget sammenligning. Derved kan modellen anvendes til at belyse, hvorledes kvælstofudvaskningen ændres på middellang sigt (5-15 år) ved vedvarende ændringer i kvælstoftilførslen. For yderligere diskussion af modellen henvises til Simmelsgaard & Djurhuus (1998).

Ændringer i kvælstofudvaskningen,  $\Delta N_{\text{udvaskning}}$  i ligning (3), ved ændret kvælstoftilførsel kan beskrives ved ligning (5), som er afhængig af afgrøde, jordtype og kvælstoftilførsel, hvilket vanskeliggør fastsættelse af en typisk værdi (Figur 5). Afgrødevalget har indflydelse i kraft af både afgrødens normale kvælstofniveau og et tilhørende typetal for kvælstofudvaskningen (Tabel 2). De to afgrøder i Figur 5 repræsenterer yderpunkterne, hvor det høje typetal for vårbyg sammen med en relativ lav normgødskning repræsenterer den største  $\Delta N_{\text{udvaskning}}$ , mens det omvendte er tilfældet for græs. Jordtypen, opdelt i sand- og lerjord, har betydning for typetallet for kvælstofudvaskningen således, at  $\Delta N_{\text{udvaskning}}$  for sandjord ligger på et højere niveau i forhold til lerjord (jf. Tabel 2; Figur 5). Endelig øges  $\Delta N_{\text{udvaskning}}$  eksponentielt med stigende kvælstoftilførsel. For vårbyg kan intervallet for  $\Delta N_{\text{udvaskning}}$  omkring normal gødskningsniveau 1N af Figur 5 således aflæses til 0.25-0.35. Der haves imidlertid ikke tilstrækkeligt datagrundlag for bestemmelse af typetal for andre afgrøder end de i Tabel 2 nævnte. Derfor må størrelsen af  $\Delta N_{\text{udvaskning}}$  for andre kornafgrøder skønnes. Dette kan ske på grundlag af Thomsen *et al.* (1993), som for vinterhvede, både i sædskifte og kontinuert dyrket, finder en lidt lavere udvaskning i forhold til ensidig dyrkning af vårbyg uden efterafgrøde. Da gødskningsniveauet samtidig er højere for vinterhvede, skønnes det, at typetallet for udvaskning fra vinterhvede er lavere end for vårbyg, og  $\Delta N_{\text{udvaskning}}$  vil derfor være på samme niveau for andre kornafgrøder som for vårbyg. På denne baggrund anses en gennemsnitlig værdi på 0.30 for  $\Delta N_{\text{udvaskning}}$  at være det bedste bud for handelsgødgede, kornrige sædskifter. Benyttelse af denne gennemsnitlige faktor i ligning (3) for ændringer i kvælstofudvaskningen ved ændring i kvælstoftilførslen afviger derfor ikke væsentligt fra tidligere vurderinger fore-

taget i forbindelse med VMPII, som også baserer sig på den relative udvaskningsmodel (Iversen *et al.*, 1998; Grant, 2002).



Figur 5. Differentialkvotienten ( $dN_{\text{udvaskning}}/dN_{\text{tilførsel}}$ ) for kvælstofudvaskningsfunktionen som funktion af kvælstoftilførslen ( $N_{\text{tilførsel}}$ ) for fire scenarier, repræsenterende to afgrøder med forskellig udvaskningspotentiale og to grupper af jordtype.

## 7.2 Afgrødens kvælstofoptagelse

Kvælstof er det vigtigste plantenæringsstof og tilføres for at fremme planteproduktionen. Derfor forventes det, at  $\Delta N_{\text{optagelse(kerne+halm)}}$  vil være den største af de tre poster i ligning (3). Resultaterne fra både *De langvarige gødningsforsøg* på Askov og *Rønhaveforsøget* viser, at afgrødens samlede kvælstofoptagelse stiger lineært med stigende kvælstoftilførsel, svarende til omkring 65% af det tilførte N, uanset om afgrøden er vårbyg eller vinterhvede (Tabel 19). Både for kerne (Figur 2a og Figur 2b) og halm (Figur 3) stiger kvælstofoptagelsen lineært og næsten parallelt for de to forsøg. Estimaterne for de fire kornafgrøder i Rønhaveforsøget antyder en mindre forskel mellem vinter- og vårformer (Figur 2h). *Bördighetsförsökene* viste også en lineær sammenhæng med en gennemsnitlig hældning for kvælstofoptagelse i korn som i de danske, langvarige forsøg. Imidlertid var der for vårbyg i det svenske forsøg en større respons i kvælstofoptagelsen på ændring af kvælstoftilførslen end for vinterhvede (Tabel 19).

I de to danske, langvarige forsøg (*De langvarige gødningsforsøg* og *Rønhaveforsøget*) findes det, at ændringen i halmens kvælstofoptagelse udgør mellem en femtedel og en fjerdedel af den samlede ændring i kvælstofoptagelsen. I *Sandjordsforsøgene* kan kvælstofoptagelsen i halm ikke estimeres direkte, men af Tabel 19 ses det for vårbyg, at en ændring i kvælstofoptagelsen på 0.16-0.18 kg N/ha pr. kg tilført N/ha ikke er usandsynlig, hvilket svarer til om-



kring to femtedele af den samlede kvælstofoptagelse. Lægges resultaterne for vårbyg og vinterhvede i de to danske, langvarige forsøg til grund, betyder det, at af den samlede respons i afgrødens kvælstofoptagelse på omkring 65% af det tilførte N vil kvælstofoptagelsen i kerne ændres med omkring 0.49-0.53 kg N/ha pr. kg tilført N/ha. Resten af de 65% tilskrives kvælstofoptagelsen i halmen, som i gennemsnit ændredes med 0.15 kg N/ha pr. kg tilført N/ha, hvor de lidt højere estimater for halm af vårbyg muligvis skyldes, at denne afgrøde busker sig mere end vinterhvede (Tabel 19).

Tabel 19. Sammenstilling af estimater for en ændring i afgrødens kvælstofoptagelse udtrykt relativt i forhold til en ændring i kvælstoftilførslen i kornrige sædskifter. Estimaterne er angivet for kerne, halm og total afgrøde af vårbyg og vinterhvede.

Afsnit	Forsøgsbetegnelse	Forsøgets varighed [år]			Vårbyg			Vinterhvede		
		1	3-10	>10	Kerne	Halm	Total	Kerne	Halm	Total
6.10	De langvarige gødningsforsøg			+	0.49	0.20	0.69	0.50	0.16	0.65
6.11	Rønhaveforsøget <sup>1)</sup>	+		+	0.48	0.14	0.62	0.53	0.12	0.66
6.12	Kvalitetskornforsøg	+			0.33	-	-	0.47	-	-
6.13	Sandjordsforsøg med relativ fordampning > 0.75	+			0.20-0.26 <sup>3)</sup>	<sup>2)</sup>	0.36-0.44 <sup>3)</sup>	0.62	-	-
6.14	Landsforsøgene	+			0.33-0.34 <sup>3)</sup>	-	-	0.38	-	-
6.16	Bördighetsforsök			+	0.62	-	-	0.44	-	-

<sup>1)</sup> Etårigt forsøg anlagt i langvarigt forsøg.

<sup>2)</sup> Kan ikke estimeres direkte, men er formodentlig omkring 0.16-0.18.

<sup>3)</sup> For en kvælstoftilførsel på 100-120 kg N/ha

I de etårige forsøg blev kvælstofoptagelsen primært bestemt i kernen (Figur 2 og Tabel 19), og der fandtes som hovedregel en mindre ændring i kernens kvælstofoptagelse ved ændring i kvælstoftilførslen end i de langvarige forsøg. For vårbyg (Figur 2a) er de estimerede funktioner for de etårige forsøg (*Landsforsøgene*, *Sandjordsforsøgene* og *Kvalitetskornforsøgene*) næsten parallelle og kun forskudt lidt i forhold til hinanden. Et lignende sammenfald ses ikke for de etårige forsøg med vinterhvede, hvor kurverne har varierende hældning og afskæring (Figur 2b). Specielt fandtes for vinterhvede i *Sandjordsforsøgene* et meget højt estimat for hældningen, hvilket dels skyldes, at denne afgrøde blev holdt fuldt vandet, og dels kan skyldes, at vinterhvede formentlig blev dyrket mere intensivt mht. plantebeskyttelse end vårbyggen. Simmelsgaard (1986) bemærker iøvrigt, at 'en velvandet og sund hvede kan udnytte endog store kvælstofmængder'.

For de etårige bygforsøg kan kvælstofoptagelsen ofte beskrives med en kvadratisk funktion, mens kvælstofoptagelsen i vinterhvede kan beskrives tilfredsstillende med en lineær funktion. Dette kan hænge sammen med, at antallet af kerner i bygakset er fastlagt på et meget tidligt udviklingstrin, mens antallet af kerner i et hvedeaks også afhænger af afgrødens produktivitet i kernefyldningsfasen. Dette betyder, at hvedeaks kan vedblive med at akkumulere kvælstof,

mens der vil være en øvre grænse i bygaks, dvs. differentialkvotienten for kvælstofoptagelsesfunktionen aftager.

På grundlag af de etårige forsøg ses det, at responsen var afhængig af jordtype (Figur 2c-d), forfrugt (Figur 2e-f) og afgrødens vandforsyning (Figur 2g), men effekten af disse faktorer er ikke estimeret, idet dette vil kræve en yderligere analyse. Også eftervirkning af husdyrgødning vil påvirke responsen, og for at eliminere denne blev der i *Landsforsøgene* kun udvalgt forsøg, hvor der ikke var tilført husdyrgødning indenfor de seneste fem år. Som det ses af *Sandjordsforsøgene* med vårbyg (Figur 2g) vil vandmangel også medføre en svagere respons. Det kan ikke afvises, at den mindre hældning i *Landsforsøgene* og *Kvalitetskornforsøgene* i forhold til *Rønhaveforsøget* (Figur 2a) kan skyldes suboptimal vandforsyning, der har påvirket afgrødens kvælstofoptagelse. Det formodes dog, at øvrige dyrkningsforhold i *Landsforsøgene* og *Kvalitetskornforsøgene* generelt har været nær det optimale.

Den kvantitative forskel mellem estimererne i Tabel 19 kan imidlertid ikke fortolkes kvalitativt, idet de er baseret på populationer af responsfunktioner, som er karakteristiske for de forhold hvorunder forsøgene er udført. I modsætning til det store antal forsøg, der ligger bag *Landsforsøgene*, er langvarige forsøg sædvanligvis kun repræsenteret på en eller få lokaliteter, dvs. uden repetition i bl.a. jordtype. Forskellen mellem estimererne kan således have flere årsager, og ikke alene hvorvidt der er tale om etårige eller langvarige forsøg. På trods af variationer viser Figur 2a, Figur 2b og Figur 3 en generel trend i afgrødens kvælstofoptagelse som funktion af kvælstoftilførslen, og estimererne i Tabel 19 kan således betragtes som et udtryk for variationsbredden.

Mens de langvarige forsøg kan benyttes til at bestemme en øvre grænse for ændring i afgrødens kvælstofoptagelse ved ændringer i kvælstoftilførslen, kan en nedre grænse vurderes på grundlag af de etårige forsøg. I gennemsnit af *Kvalitetskornforsøget*, *Sandjordsforsøgene* og *Landsforsøgene* vurderes den nedre grænse for ændringer i kvælstofoptagelsen for kerne til 0.30 for vårbyg, mens den for vinterhvede vurderes til 0.40 kg N/ha pr. kg tilført N/ha primært baseret på *Landsforsøgene* (Tabel 19). Den øvre grænse for ændringer i kvælstofoptagelse i kerne af vårbyg og vinterhvede er tidligere bestemt til 0.49-0.53 kg N/ha pr. kg tilført N/ha og sættes i det følgende til 0.50. For ændringer i kvælstofoptagelse i halm anses den øvre og nedre grænse for sammenfaldende, og for både vårbyg og vinterhvede skønnes bidraget fra halmen til ændringer i afgrødens kvælstofoptagelse at svare til 0.15 kg N/ha pr. kg tilført N/ha.

I denne fremstilling antages det, at halmen fjernes fra marken. Selvom ca. 2/3 af den samlede halmproduktion fjernes fra marken og anvendes til enten strøelse eller energiproduktion, skønnes det, at den resterende 1/3 snittes og nedmuldes (Nikolaisen *et al.*, 1998). Der kan være store lokale forskelle i, hvorvidt halmen fjernes eller efterlades på marken. Imidlertid har det kun betydning for fordelingen mellem posterne i ligning (3), idet  $\Delta N_{\text{optaget(halm)}}$  flyttes fra  $\Delta N_{\text{optaget(kerne+halm)}}$  til  $\Delta N_{\text{rest}}$ .

### 7.3 Ændring i jordens kvælstofpulje og effekt af kvælstoftilførsel

I ligning (1) er udgangspunktet for ændring i jordens kvælstofpulje,  $\Delta N_{\text{jord}}$ , hele rodzonen, men i alle de refererede undersøgelser er bestemmelse af kvælstof i jord alene sket i pløjelaget, og betegnes derfor  $\Delta N_{\text{pløjelag}}$ . Der må derfor foretages en vurdering af, hvorvidt estimater for nedslidningen baseret på målinger i pløjelaget ( $\Delta N_{\text{pløjelag}}$ ) kan benyttes for hele rodzonen ( $\Delta N_{\text{jord}}$ ).

Bestemmelse af ændringer i jordens kvælstofpulje sker primært i pløjelaget. Der haves kun kendskab til et enkelt fastliggende forsøg, hvor  $\Delta N_{\text{underjord}}$  er belyst (Christensen, 1988). Imidlertid er underjorden i dette forsøg omlejret til pløjelagsdybde, hvorved estimatet for  $\Delta N_{\text{underjord}}$  er påvirket af massiv afsætning af organisk stof i form af rødder. Christensen (1988) fandt herved en opbygning af kvælstofpuljen svarende til en ændring i 'underjordens' kvælstofkoncentration på  $1.3 \times 10^{-3}$  pct.-point/år, men opbygning af kvælstofpuljen i underjord i naturlig lejring vil givetvis være betydeligt mindre. I KVADRATNET-undersøgelserne blev der foretaget bestemmelse af ændringer i jordens kvælstofkoncentration for dybderne 0-25, 25-50 og 50-75 cm før og efter en 10-års periode (Heidmann *et al.*, 2001). Resultaterne antyder en nedslidning af kvælstofpuljen i pløjelaget af samme størrelsesorden som angivet i Tabel 17, en mindre nedslidning under pløjelaget og en opbygning i 50-75 cm dybde. Estimaterne for de tre dybder er imidlertid ikke sammenlignelige, idet de ikke er baseret på samme antal kvadratspunkter. Grundlaget for bestemmelse af  $\Delta N_{\text{jord}}$  for hele rodzonen er således mangelfuldt, og i det følgende diskuteres derfor alene estimater for  $\Delta N_{\text{pløjelag}}$ .

Nedslidningen af kvælstofpuljen i pløjelaget,  $\Delta N_{\text{pløjelag}}$ , kan beregnes på to måder afhængig af de tilgængelige data. I forsøg med blot et enkelt gødskningsniveau, typisk 1N, kan nedslidningen ( $\Delta N_{\text{pløjelag}, 1N}$ ) estimeres for dette. I forsøg med flere gødskningsniveauer kan  $\Delta N_{\text{pløjelag}, xN}$  for et givent gødskningsniveau, xN, beregnes som den generelle nedslidning ( $\Delta N_{\text{pløjelag}, 0N}$ ), defineret som nedslidningen ved 0N jf. ligning (8), plus  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$  multipliceret med den tilførte mængde kvælstof, xN, jf. ligning (8). Selvom nedslidningen,  $\Delta N_{\text{pløjelag}, xN}$ , ikke har relation til ligning (3), er det relevant at diskutere vanskeligheder ved bestemmelse af denne størrelse, inden der foretages en diskussion af ændringen i nedslidningen ved ændret kvælstofgødskning,  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$ , som netop er relevant i forhold til ligning (3).

Uanset om der i forsøgene forekommer et eller flere kvælstofniveauer, er bestemmelse af ændringer i pløjelagets kvælstofpulje ( $\Delta N_{\text{pløjelag}}$ ) vanskelig, og lader sig kun gøre i langvarige forsøg designet til formålet. Estimater for ( $\Delta N_{\text{pløjelag}}$ ) er vist i Tabel 20 for kilder, der er fundet relevante for belysning af den opstillede problemstilling, jf. indledningen. Overordnet set er estimaterne for  $\Delta N_{\text{pløjelag}, 1N}$  i forsøg med et gødskningsniveau sammenfaldende, og falder alle inden for intervallet  $-0.7$  -  $-1.4$  pct.-point/år. Under antagelse af en pløjedybde på 20-25 cm og en volumenvægt på  $1.3$ - $1.4$  g/cm<sup>3</sup> svarer nedslidningsraten ved 1N til en årlig reduktion af pløjelagets kvælstofpulje med 20-40 kg N/ha ved fjernelse af alle overjordiske afgrødedele.

Derimod er der væsentlige forskelle i estimaterne for  $\Delta N_{\text{pløjelag}, 0N}$ , der enten er beregnet på grundlag af forsøg med flere kvælstofniveauer eller for ugødede forsøgsled (Tabel 20). Estimatet for  $\Delta N_{\text{pløjelag}, 0N}$  i *De langvarige gødningsforsøg* ligger inden for intervallet estimeret på grundlag af jordprøver i 0-23 cm fra det ugødede forsøgsled i det langvarige Stakyard Field forsøg (Woburn, 1888-1972) med ensidig korndyrkning (Mattingly *et al.*, 1975). Derimod er estimatet for  $\Delta N_{\text{pløjelag}, 0N}$  i *Bördighetsförsögene* 5-15 gange mindre, men dette kan skyldes anvendelse af blot to tidspunkter for bestemmelse af kvælstof i jord, hvilket øger risikoen for, at beregning af  $\Delta N_{\text{pløjelag}}$  over tid kan være påvirket af systematiske fejl opstået i forbindelse med den kemiske analyse. For det klassiske Broadbalk forsøg ved Rothamsted kan nedslidningen, på grundlag af en figur over kvælstofkoncentrationen i pløjelaget (0-23 cm) (Glendining *et al.*, 1996) for perioden 1893-1966, beregnes for fire niveauer af kvælstoftilførsel i form af handelsgødning. I forhold til de øvrige forsøg er estimatet for  $\Delta N_{\text{pløjelag}, 0N}$  i Broadbalk-forsøget positivt, hvilket betyder, at der sker en opbygning af kvælstofpuljen. Forskellige årsager til denne afvigelse kan tænkes, men der kan ikke gives en tilfredsstillende forklaring, og det vil her føre for vidt at komme nærmere ind på dette.

Overslæbning af pløjelagsjord og næringsstoffer mellem parceller er endnu et problem i forbindelse med tolkning af resultater fra langvarige gødningsforsøg (Sibbesen *et al.*, 2000). Ved overslæbning reduceres forskellen mellem parcellerne, hvorimod den gennemsnitlige nedslidning i princippet ikke vil være påvirket. Udjævningen af forskellene mellem parcellerne vil derimod betyde, at nedslidningsraten for de enkelte gødskningsniveauer vil nærme sig hinanden, hvilket kan være forklaringen på variationen i estimatet for  $(\Delta N_{\text{pløjelag}, 0N})$ . På grundlag af beskrivelser af forsøgsdesign (Christensen *et al.*, 1994; Iversson & Bjarnason, 1988) kan en sådan udjævning ikke udelukkes i hverken *De langvarige gødningsforsøg* ved Askov eller i de svenske *Bördighetsförsök*. I disse forsøg kan der tillige forekomme overslæbning fra parceller tilført store mængder organisk stof i form af husdyrgødning.

I modsætning til  $\Delta N_{\text{pløjelag}, 0N}$  kan  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$ , dvs. hvorledes  $\Delta N_{\text{pløjelag}}$  ændres ved ændret kvælstoftilførsel, kun beregnes i forsøg med flere kvælstofniveauer. På grundlag af upublicerede data fra *De langvarige gødningsforsøg* i Askov og det svenske *Bördighetsförsök* er  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$  estimeret (jf. afsnit 6.10 og 6.16) og sammenstillet i Tabel 20. Forekomsten af en eventuel systematisk fejl i *Bördighetsförsökene* ved bestemmelsen af  $\Delta N_{\text{pløjelag}}$  antages imidlertid at være af samme størrelse for alle kvælstofniveauer, hvorved estimatet for  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$  må formodes at være pålideligt. En udjævning af forskellene mellem parcellerne forårsaget af overslæbning af pløjelagsjord vil bevirke, at estimaterne for  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$  bliver for lave.

I litteraturen er der søgt efter resultater, der kan benyttes til bestemmelse af  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$ . I et review gennemgår Glendining & Powlson (1995) 16 langvarige forsøg (>40 år) og 29 andre længerevarende forsøg med en varighed på 7-40 år. Ud over *De langvarige gødningsforsøg* og *Bördighetsförsökene*, begge med mere end ét niveau af handelsgødning, nævnes det klassi-

Tabel 20. Estimer for jordens kvælstofpulje, ændringer i jordens kvælstofpulje (nedslidning), samt ændringer i nedslidningsraten ved tilførsel af kvælstof i handelsgødning. Afhængig af datakilderne er estimaterne angivet for pløjelaget (0-25 cm) eller rodzonen (0-100 cm).

Afsnit	Betegnelse for datakilde	Antal prøve- tagninger	N i jord $N_{\text{jord}}$	0N			$\Delta N_{\text{jord, IN}}$			Ændring i $\Delta N_{\text{jord}}$ ved ændring af kvælstoftilførsel $\Delta(\Delta N_{\text{jord}})$
				Årlig ændring af $N_{\text{jord}}$	$\Delta N_{\text{jord}}$	Årlig ændring af $N_{\text{jord}}$	$\Delta N_{\text{jord, IN}}$	Årlig ændring af $N_{\text{jord}}$	$\Delta N_{\text{jord, IN}}$	
Generel nedslidningsrate (0N)										
			[ $\times 10^{-3}$ ]			[ $\times 10^{-3}$ ]			Ændring i nedslidningsrate [pct.-point/år pr. kg N/ha] $\times 10^{-6}$	
			Pløjelag	Rodzonen	Pløjelag	Rodzonen	Pløjelag	Rodzonen	Pløjelag	Rodzonen
6.10	De langvarige gødningsforsøg	8	0.08-0.13	-0.68 <sup>3)</sup>	-	-	-	-	2.9	-
6.11	Rønhave:	1	0.11-0.14	-	-1.3 <sup>1-2)</sup>	-	-	-	-	8.5 <sup>1)</sup>
	Halm ikke tilbageført			-	-1.4 <sup>1-2)</sup>	-	-	-	-	4.8 <sup>1)</sup>
6.15	Organisk stof:	9	0.23	-	-	-	-0.9 - -1.7	-	-	-
	Rammeforsøg									
	Markforsøg	30	0.14-0.15	-	-	-	-0.7 - -1.1	-	-	-
6.16	Børdighetsforsøg: Kornrigt fremarkssædskifte	2	0.14-0.22	-0.27	-	-	-	-	4.1	-
	Kvægbrugssædskifte	2		-0.047	-	-	-	-	1.7	-
-	Broadbalk (Glendinning <i>et al.</i> , 1996)	5	0.10-0.13	+0.08	-	-	-0.9 - -1.4 <sup>3)</sup>	-	-1.6	-
-	Stakyard Field (Mattingly <i>et al.</i> , 1975)	7	0.07-0.14	-0.4 - -0.8	-	-	-0.5 - -0.9 <sup>4)</sup>	-	-	-

<sup>1)</sup> Beregnet, og desuden incl. andre effekter, bl.a. deminifikation og kvælstofstab fra afgrøde, og derfor egentlig  $\Delta N_{\text{est}}$  henholdsvis  $\Delta(\Delta N_{\text{est}})$ .

<sup>2)</sup> Ved tilførsel af 150 kg N/ha/år bliver ændringen i pløjelagets kvælstofpulje lig nul ved tilbageførsel af halm, mens den årlige nedslidning var 26 kg N/ha ved fjernelse af halm (jf. Figur 4), svarende til  $-0.7 \times 10^{-3}$  pct.-point/år.

<sup>3)</sup> Bredden i estimatet gælder for kvælstofniveauerne 96 og 144 kg N/ha.

<sup>4)</sup> Niveaulet for IN varierede, men var omkring 50 kg N/ha i årene 1888-1972.

ske Broadbalk-forsøg ved Rothamsted (Glendining *et al.*, 1996). Der eksisterer således kun ganske få forsøg, der kan benyttes til bestemmelse af  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$ . På grundlag af en figur, der viser kvælstofkoncentrationen i pløjelaget (Glendining *et al.*, 1996), er  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$  for dette forsøg bestemt og fundet negativ, hvilket er en afvigelse fra de langvarige danske og svenske forsøg (Tabel 20).

Tilsvarende beregninger af  $\Delta(\Delta N_{\text{jord}})$  eller  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$  har desværre ikke kunnet lade sig gøre for *Rønhaveforsøget*, idet der ikke foreligger målinger af jordens kvælstofkoncentration ved forsøgets anlæggelse. Årsagen til dette er, at forsøget havde et andet formål, idet det var anlagt med henblik på belysning af sædskiftesygdomme. I stedet er der på grundlag af kvælstofbalancer opstillet af Thomsen *et al.* (2003) beregnet  $\Delta(\Delta N_{\text{rest}})$  i ligning (3) (Tabel 20), og der bemærkes, at dette estimat gælder for hele rodzonen og endvidere indeholder flere  $\Delta N$ -poster end  $\Delta(\Delta N_{\text{jord}})$ , jf. afsnit 6.11.

På grundlag af estimaterne for  $\Delta N_{\text{pløjelag, 0N}}$  og  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$  i forsøg med flere kvælstofniveauer, samt kvælstofildelingen ved 1N i disse forsøg (Appendiks A), kan  $\Delta N_{\text{pløjelag, 1N}}$  nu beregnes (Tabel 20). For *De langvarige gødningsforsøg* ved Askov bliver  $\Delta N_{\text{pløjelag, 1N}} -0.4$ , hvilket er en lidt mindre nedslidningsrate end det tidligere fundne interval ( $-0.7 - -1.4$  pct.-point/år) for forsøg med ét kvælstofniveau. For begge sædskifter i *Bördighetsförsökene* bliver  $\Delta N_{\text{pløjelag, 1N}}$  positiv, men dette hænger sammen med usikkerheden på estimatet for  $\Delta N_{\text{pløjelag, 0N}}$ . Tilsvarende beregninger for *Rønhaveforsøget* giver  $-0.03$  og  $-0.7$  pct.-point/år ved henholdsvis tilbageførsel og fjernelse af halm. Disse estimater indeholder tillige andre poster, og i forhold til det tidligere fundne interval for forsøg med et kvælstofniveau må nedslidningen ved fjernelse af halm i *Rønhaveforsøget* være lidt mindre. Ved tilbageførsel af halmen modvirkes nedslidningen, hvilket er i overensstemmelse med bl.a. Thomsen (1995) og Tabel 17. Selvom der er ikke tale om fuldstændig overensstemmelse mellem de to metoder, er der heller ikke tale om modstrid, hvilket betyder, at estimaterne for  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$  er anvendelige.

På grundlag af langvarige forsøg alene gødet med handelsgødning, dvs. *De langvarige gødningsforsøg* ved Askov og kornsædskiftet i *Bördighetsförsökene* (Tabel 20), skønnes  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$  til  $3-4 \times 10^{-6}$  pct.-point/år pr. kg N/ha. Ved en pløjedybde på 20-25 cm og en volumenvægt på  $1.3-1.4 \text{ g/cm}^3$  svarer  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$  til, at den gennemsnitlige nedslidning ved gødskning med handelsgødning på omkring 20-40 kg N/ha/år ændres med 0.08-0.14 kg N/år pr. kg tilført N/ha. Konvertering af  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$  til et estimat for  $\Delta(\Delta N_{\text{jord}})$  byder på endnu større vanskeligheder end forholdet mellem  $\Delta N_{\text{pløjelag}}$  og  $\Delta N_{\text{jord}}$ , idet der ikke findes data, der kan underbygge en omregningsfaktor. Antages ændringer i kvælstofpuljen under pløjelaget at være konstant og upåvirket af kvælstofgødskningen, dvs.  $\Delta(\Delta N_{\text{underjord}})=0$ , kan der sættes lighedstegn mellem  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$  og  $\Delta(\Delta N_{\text{jord}})$ .

En ændring i kvælstoftilførslen på f.eks. 20 kg N/ha vil således ændre nedslidningsraten med 2-3 kg N/ha svarende til kun omkring 10% af den gennemsnitlige nedslidningsrate. Derfor vil

selv gødskning med normale kvælstofmængder i kornrige sædskifter kun delvist kunne modvirke nedslidningen af jordens kvælstofpulje. Endvidere er bestemmelse af nedslidningsraten forbundet med betydelig usikkerhed, og derfor vil effekten på nedslidningsraten ved en ændring i kvælstoftilførslen på 10-20 kg N/ha være vanskelig at konstatere og uden praktisk betydning for handelsgødede, kornrige sædskifter.

Den langsigtede effekt af ændringer i kvælstoftilførslen på pløjelagets kvælstofpulje kan illustreres ved et regneeksempel. Med udgangspunkt i  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$  på  $3 \times 10^{-6}$  pct.-point/år pr. kg N/ha kan forskellen mellem ugødet og et led gødet med 100 kg N/ha/år efter 30 år beregnes til 0.009 pct.-point N. Sammenholdes dette med en gennemsnitlig koncentration af kvælstof i jord på 0.12%, vil det gødede led i den forløbne tid have nået en kvælstofkoncentration, der er 7.5% højere end det ugødede led. Dette svarer til den 5-10% større kvælstofpulje i pløjelaget (0-20 cm) som Glendining & Powlson (1995) finder for tilførsel af handelsgødning sammenlignet med ugødede forsøgsled ved en gennemgang af et stort antal langvarige forsøg. Estimerne for  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$  synes således at have en størrelsesorden, der stemmer overens med de forskelle, der kan observeres mellem ugødede og handelsgødede forsøgsled efter en længere periode. Dette underbygger anvendelsen af det ovenfor fremkomne estimat for  $\Delta(\Delta N_{\text{pløjelag}})$  i vurderingen af konsistensen af ligning (3).

#### 7.4 Konsistens i kvælstofbalance ved ændring i kvælstoftilførsel

I afsnit 7.1 og 7.2 er de to største poster i ligning (3) kvantificeret. Derfor kan en vurdering af konsistensen af ligning (3) indledes med at indsætte 0.30 for  $\Delta N_{\text{udvaskning}}$  (afsnit 7.1) samt øvre og nedre grænse for  $\Delta N_{\text{optagelse}}$  i kerne og halm (afsnit 7.2):

$$1 = (0.50 + 0.15) + 0.30 + \Delta N_{\text{rest}} \quad (11a)$$

$$1 = (0.30 + 0.15) + 0.30 + \Delta N_{\text{rest}} \quad (11b)$$

Residualen,  $\Delta N_{\text{rest}}$ , forsøges i det følgende opløst ved bestemmelse af en størrelsesorden for ændringer af de kvantitativt mindre poster i ligning (1). Kvælstof tilført landbrugsjord via deposition hidrører primært fra ammoniakfordampning fra husdyrproduktionen, med et mindre bidrag fra afbrænding af fossil energi. Depositionen er således uafhængig af kvælstof tilført i form af handelsgødning, og  $\Delta N_{\text{deposition}}$  kan derfor sættes til nul. Ved løsning og omskrivning af ligning (11), og ved at skrive de resterende poster fra ligning (1) fuldt ud, jf. ligning (3), fås uligheden:

$$0.05 < \Delta(\Delta N_{\text{jord}}) + \Delta N_{\text{denitrifikation}} + \Delta N_{\text{tab fra afgrøde}} < 0.25 \quad (12)$$

Den store variation i betingelserne for denitrifikationen, herunder afhængighed af jordtype og gødningstype, betyder, at bestemmelsen af denitrifikationen er forbundet med betydelige vanskeligheder. På baggrund af Vinther (2002) kan ændringen i denitrifikationen ved ændret

kvælstoftilførsel i handelsgødning imidlertid anslås til 0.05, og uligheden (12) kan reduceres til:

$$0 < \Delta(\Delta N_{\text{jord}}) + \Delta N_{\text{tab fra afgrøde}} < 0.20 \quad (13)$$

Afgrøden er i stand til både at afgive og optage kvælstof i form af ammoniak, afhængig af kompensationspunktet, og en række faktorer kan have indflydelse på nettoprocessen (Schjørring *et al.*, 1989). Som gennemsnit af flere afgrøder og to forsøgsår finder Schjørring & Mattsson (2001) i løbet af vækstsæsonen et nettotab i form af ammoniak på 0-5 kg N/ha. Derimod angives der i dette forsøg ikke resultater, som belyser, hvorvidt dette tab afhænger af kvælstoftilførslen, men kvælstofkoncentrationen i afgrøden ved blomstring formodes at have betydning. Derudover kan der være tale om kvælstoftab i forbindelse med blomstring forårsaget af pollenfrigivelse, som kan estimeres til 2-7 kg N/ha (Petersen & Sørensen, 2004), men det er ikke klart, hvorvidt dette tab afhænger af gødskningsniveauet.

Der haves således ikke et grundlag, hvorpå  $\Delta N_{\text{tab fra afgrøde}}$  kan estimeres, men posten må generelt antages at være ubetydelig, og derfor sættes den til at være nul. Herved vil  $\Delta(\Delta N_{\text{jord}})$  skulle forklare ulighed (13) i hele sin bredde. Således vil en ændring på 1 kg N/ha i kvælstoftilførsel betyde, at den gennemsnitlige nedslidning af jordens kvælstofpulje på 20-40 kg N/ha/år ( $\Delta N_{\text{jord}}$ ) ændres med mindre end 0.20 kg N/ha/år pr. kg tilført N ( $\Delta(\Delta N_{\text{jord}})$ ). Ulighed (13) indsnævres yderligere til maksimalt 0.10 ved at benytte den nedre grænse for kvælstofoptagelse i vinterhvede på 0.40 i stedet for de 0.30 for vårbyg jf. ligning (11b) og Tabel 19.

Det i afsnit 7.3 beregnede estimat for ændring af nedslidningsraten for rodzonens kvælstofpulje,  $\Delta(\Delta N_{\text{jord}})$ , på 0.08-0.14 kg N/ha/år pr. kg tilført N/ha kan nu sættes i forhold til variationsbredden i ulighed (13). I forhold til den øvre grænse i ulighed (13), repræsenteret ved enårige forsøg i vårbyg og vinterhvede, dækker ændringen i de omtalte poster henholdsvis 90 og 100% af ændringen i kvælstoftilførslen. I de langvarige forsøg svarer ændringen i de samme poster til 110% af ændringen i kvælstoftilførslen, hvilket antyder en mindre overestimering i en eller flere af posterne. Sammenfattende må det, på grundlag af de gennemførte betragtninger vedrørende handelsgødning, kornrige sædskifter konstateres, at ligning (3) i konsistent form kan skrives som ligning (14):

$$\Delta N_{\text{tilført}} = \Delta N_{\text{optagelse(kerne+halm)}} + \Delta N_{\text{udvaskning}} + \Delta N_{\text{denitrifikation}} + \Delta(\Delta N_{\text{jord}}) \quad (14)$$

Estimerer for de enkelte poster kan sammenfattes i Tabel 21, jf. ovenstående uligheder. Det skal bemærkes, at de enkelte poster er estimeret på grundlag af forskellige datakilder, og der således ikke er tale om sammenhørende målinger. Et datagrundlag med sammenhørende målinger eksisterer ikke og vil være yderst omkostningskrævende at etablere. Derfor er der i denne rapport anvendt datakilder, der kan betragtes som de mest velegnede til at estimere ændringer i de enkelte poster. Anvendelse af relative ændringer i kvælstofbalancens poster ved ændring i kvælstoftilførslen betyder, at eventuel manglende sammenhæng mellem de absolut-



te poster, forårsaget af de forskellige datakilder og de benyttede målemetoder, bliver uden betydning.

Tabel 21. Sammenstilling af estimater for relativ ændring i kvælstofbalancens poster for bortførsel og tab ved en ændring i kvælstoftilførslen i handelsgødede, kornrige sædskifter

Post i kvælstofbalancen	Ændring i kvælstoftilførsel	Relativ ændring i poster for bortførsel og tab
Tilførsel	1	
Optagelse (kerne)		0.30-0.50
Optagelse (halm)		0.15
Udvaskning		0.25-0.35, gennemsnit 0.30
Denitrifikation		0.05
Deposition		0
Ammoniaktab fra afgrøde		?, men antagelig tæt på 0
Nedslidningen af jordens kvælstofpulje		0.08-0.14

## 8. Konklusion

For kornrige sædskifter gødet med handelsgødning vil en ændring i kvælstoftilførslen primært afspejle sig i en ændring af afgrødens kvælstfoptagelse og kvælstofudvaskning og det på en sådan måde, at ændringen i afgrødens kvælstfoptagelse er op til dobbelt så stor som ændringen i kvælstofudvaskningen. Variation i estimatet for ændringer i afgrødens kvælstfoptagelse ved ændret kvælstoftilførsel skyldes indvirkning af jordtype, forfrugt og vandforsyning.

Ved en kvantificering af ændringer i kvælstofbalancens poster ved ændringer i kvælstoftilførslen findes det, at ændringen i afgrødens kvælstfoptagelse og ændringen i kvælstofudvaskningen kan forklare henholdsvis 45-65% og 30%, mens ændring i nedslidningsraten for jordens kvælstofpulje kan forklare omkring 10%. Ændringer i de øvrige poster må betragtes som ubetydelige. Selvom estimaterne er rumlige og tidslige gennemsnit samt forbundet med usikkerhed, kan der overordnet set ikke herske tvivl om hverken størrelsesordenen eller den indbyrdes fordeling af effekten på posterne. Ligning (14) kan derfor betragtes som konsistent for de her undersøgte handelsgødede, kornrige sædskifter, hvor effekterne er angivet efter en tidshorisont på 5-15 år med en vedvarende ændring af kvælstoftilførslen.

De her præsenterede resultater belyser, hvorledes posterne i kvælstofbalancen ændres ved ændringer i kvælstoftilførslen i kornrige, handelsgødede sædskifter. Det er imidlertid også stor interesse for at belyse tilsvarende problemstilling for driftsformer, hvor der anvendes husdyrgødning og kvælstoffikserende afgrøder, samt ved anvendelse af afgrøder med en lang aktiv vækstsæson. Dette vil imidlertid være betydeligt vanskeligere, idet datagrundlaget er væsentligt mere spinkelt.

## 9. Referencer

- Anonym (1998) Vejledning og skemaer til mark- og gødningsplan, gødningsregnskab, plantedække og harmoniregler 1998/99. Plantedirektoratet.
- Carlgrén, K. & Mattsson, L. (2001) Swedish Soil Fertility Experiments. *Acta Agriculturae Scandinavica, Sect. B, Soil and Plant Sci.* **51**, 49-78.
- Christensen, B.T. (1988) Sædskiftets indflydelse på jordens indhold af organisk stof. I. Forsøg i rammeanlæg med halmnedmuldning og anvendelse af staldgødning, 1956-1986. *Tidsskrift for Planteavl* **92**, 295-305. (Beretning nr. 1964).
- Christensen, B.T. (1990) Sædskiftets indflydelse på jordens indhold af organisk stof. II. Markforsøg på grov sandblandet lerjord (JB5), 1956-1985. *Tidsskrift for Planteavl* **94**, 161-169. (Beretning nr. 2060).
- Christensen, B.T., Petersen, J., Kjellerup, V.K. & Trentemøller, U. (1994) The Askov Long-Term Experiments on Animal Manure and Mineral Fertilizers: 1894-1994. Statens Planteavlsforsøg, SP-report no. 43, 85 pp.
- Djurhuus, J. (1992) N-transformation and N-transport in a sandy loam and a coarse sandy soil cropped with spring barley. II. Nitrate leaching. *Tidsskrift for Planteavl* **96**, 137-152 (Beretning nr. 2214).
- Glendening, M.J. & Powlson, D.S. (1995) The Effects of Long Continued Applications of Inorganic Nitrogen Fertilizer on Soil Organic Nitrogen – A review. In: Lal, R. & Stewart, B.A. (red.) *Soil Management*, p. 385-446. Boca Raton: Lewis Publishers.
- Glendening, M.J., Powlson, D.S., Poulton, P.R., Bradbury, N.J., Palazzo, D. & Li, X. (1996) The effects of long-term applications of inorganic nitrogen fertilizer on soil nitrogen in the Broadbalk Wheat Experiment. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* **127**, 347-363.
- Grant, R. (2002) Genberegning af Vandmiljøplan I og II. Notat, Danmarks Miljøundersøgelser, November 2002, 15p.
- Hansen, E.M. & Djurhuus, J. (1996) Nitrate leaching as affected by long-term N fertilization on a coarse sand. *Soil Use and Management* **12**, 199-204.
- Hansen E.M. & Djurhuus, J. (1997) Yield and N uptake as affected by soil tillage and catch crop. *Soil & Tillage Research* **42**, 241-252.
- Hansen, E.M., Djurhuus, J. & Kristensen, K. (2000a) Nitrate leaching as affected by introduction or discontinuation of cover crop use. *Journal of Environmental Quality* **29**, 1110-1116.
- Hansen, E.M., Kristensen, K. & Djurhuus, J. (2000b) Yield parameters as affected by introduction or discontinuation of catch crop use. *Agronomy Journal* **92**, 909-914.
- Hansen, E.M., Simmelsgaard, S.E. & Djurhuus, J. (1995) Nitratudvaskning ved stigende kvælstofgødskning af sandjord. Statens Planteavlsforsøg, Grøn Viden Landbrug nr. 163, 6pp.
- Hansen, J.F. (1991) Afgrøder, gylle, handelsgødning og kvælstofnedvaskning. Statens Planteavlsforsøg, Grøn Viden Landbrug nr. 91, 8pp.

- Hansen, J.F., Klausen, P.S. & Petersen, J. (1989) Lysimeterforsøg med kombinationer af kvælstof, fosfor og kalium i handelsgødning. II. Næringsstoffedvaskning. Tidsskrift for Planteavl **93**, 209-223. (Beretning nr. 2006).
- Heidmann, T., Nielsen, J., Olesen, S.E., Christensen, B.T. & Østergaard, H.S. (2001) Ændringer i indhold af kulstof og kvælstof i dyrket jord: Resultater fra Kvardratnettet 1987-1998. Danmarks JordbrugsForskning, DJF-rapport nr. 54 Markbrug, 73 pp.
- Ivarsson, K. & Bjarnason, S. (1988) The Long-Term Soil fertility Experiments in Southern Sweden. I. Background, Site Description and Experimental Design. Acta Agriculturae Scandinavica **38**, 137-143.
- Iversen, T.M., Grant, R., Blicher-Mathiesen, G., Andersen, H.E., Skop, E., Jensen, J.J., Hasler, B., Andersen, J., Hoffmann, C.C. Kronvang, B., Mikkelsen, H.E., Waagepetersen, J., Kyllingsbæk, A., Poulsen, H.D. & Kristensen, V.F. (1998) Vandmiljøplan II – faglig vurdering. Miljø- og Energiministeriet, Danmarks Miljøundersøgelser, 44 pp.
- Jørgensen, J.R. & Schulz, H. (1997) Sorter, gødsning og udsædsmængdens indflydelse på udbytte og maltbygkvalitet. I: Posterabstracts, Cerealienetværkets årsmøde, 9.-10. september 1997, Poster nr. 3, s. 10.
- Kjellerup, V. (1995) Kvælstofudvaskning efter tilførsel af kalkammonsalpeter og kvæggylle i sædskifte på sandjord. Statens Planteavlsforsøg, Grøn Viden Landbrug nr. 156, 6pp.
- Kjellerup, V. (1983) Kvælstofgødskningens indflydelse på drænvandets indhold af nitratkvælstof, 1973-81. Statens Planteavlsforsøg, Meddelelse nr. 1736, 4pp.
- Kjellerup, V. & Kofoed, A.D. (1979) Kvælstofgødskningens indflydelse på drænvandets indhold af plantenæringsstoffer. Tidsskrift for Planteavl **83**, 330-348 (Beretning nr. 1465).
- Kjellerup, V. & Kofoed, A.D. (1983) Kvælstofgødskningens indflydelse på udvaskning af plantenæringsstoffer fra jorden. Lysimeterforsøg med anvendelse af <sup>15</sup>N. Tidsskrift for Planteavl **87**, 1-22. (Beretning nr. 1631).
- Klausen, P.S. (1987) Nitratnedvaskning fra landbrugsjord ved gødsning med gylle og handelsgødning. Statens Planteavlsforsøg, Grøn Viden Landbrug nr. 10, 4pp.
- Klausen, P.S. & Hansen, J.F. (1988) Lysimeterforsøg med kombination af kvælstof, fosfor og kalium i handelsgødning. I. Udbytte og næringsstoffoptagelse. Tidsskrift for Planteavl **92**, 249-263. (Beretning nr. 1957).
- Knudsen, L. (2001) Hvorledes er forhold mellem udbytte af tørstof og protein, hvis de højtydende sorter gødes ekstra. I: Waagepetersen, J., Petersen, J.B., Knudsen, L., Deneken, G. & Jørgensen, J.R. (Red.) *Produktion af kvalitetsshvede i Danmark. En oversigt over problemer og muligheder*. Danmarks JordbrugsForskning, DJF-rapport nr. 53 Markbrug, p. 71-79.
- Larsen, K.E. & Kjellerup, V. (1989) Årlig og periodisk tilførsel af kvæggødning i sædskifte. Mark- og lysimeterforsøg. Udbytte, udvaskning og balancer for næringsstoffer samt jordbundsforhold. Tidsskrift for Planteavls Specialserie, Beretning nr. S1979. Statens Planteavlsforsøg, 99 pp.
- Lord, E.I. & Shepherd, M.A. (1993) Developments in the use of porous ceramic cups for measuring nitrate leaching. Journal of Soil Science **44**, 435-449.

- Mattingly, G.E.G., Charter, M. & Johnston, A.E. (1975) Experiments made on Stackyard Field, Woburn, 1876-1974 III. Effects of NPK Fertilisers and Farmyard manure on Soil Carbon, nitrogen and organic Phosphorus. Rothamsted Experimental Station Annual Report for 1974, part 2, 61-77.
- Nikolaisen, L. (red), Nielsen, C., Larsen, M.G., Nielsen, V., Zielke, U., Kristensen, J.K. & Holm-Christensen, B. (1998) Halm til energiformål; Teknik-Miljø-Økonomi. 2. udgave. Videncenter for Halm- og Flisfyring. Trøjborg Bogtryk. 55 pp.
- Olsen, P. (1995) Nitratudvaskning fra landbrugsjorde i relation til dyrkning, klima og jord. Statens Planteavlsvforsøg, SP-rapport nr. 15, 86 pp.
- Petersen, J. & Sørensen, P (2003) Gødningsnormer, krav til udnyttelse af N i husdyrgødning og harmonikrav. I: Jørgensen, U. (red.) *Forberedelse af Vandmiljøplan III – Rapport fra Kvælstofgruppen (F10) – Forbedret kvælstofudnyttelse i marken og effekt på kvælstoftab*. Danmarks JordbrugsForskning, Juni 2003, p.- 189-198.
- Petersen, J & Sørensen, P. (2004) Intra- and inter-plant variation in nitrogen concentration and <sup>15</sup>N abundance in cereals fertilized with <sup>15</sup>N. Communication in Soil Science and Plant Analysis (accepteret).
- Schjørring, J.K & Mattsson, M. (2001) Quantification of ammonia exchange between agricultural cropland and the atmosphere: Measurements over two complete growth cycles of oilseed rape, wheat, barley and pea. *Plant & Soil* **228**, 105-115.
- Schørring, J.K., Nielsen, N.E., Jensen, H.E. & Gottschau, A. (1989) Nitrogen losses from field-grown spring barley plants as affected by rate of nitrogen application. *Plant & Soil* **116**, 167-175.
- Sibbesen, E., Skjøth, F. & Rubæk, G.H. (2000) Tillage caused dispersion of phosphorus and soil in four 16-year old field experiments. *Soil & Tillage Research* **54**, 91-100.
- Simmelsgaard, S.E. (1980) Transport af næringsstoffer til dræn og undergrund i relation til vandbalance. Bilag til Statens Planteavlsmøde 20. november 1980 på Hotel Nyborg Strand, p. 8-13.
- Simmelsgaard, S.E. (1985a) Vandbalance og kvælstofudvaskning på 4 jordtyper. I. Jordfysisk og -kemisk beskrivelse af forsøgsarealerne. *Tidsskrift for Planteavl* **89**, 101-116. (Beretning nr. 1771).
- Simmelsgaard, S.E. (1985b) Vandbalance og kvælstofudvaskning på 4 jordtyper. II. Vandbalance, aktuel fordampning og afstrømning til dræn og undergrund. *Tidsskrift for Planteavl* **89**, 117-131. (Beretning nr. 1772).
- Simmelsgaard, S.E. (1985c) Vandbalance og kvælstofudvaskning på 4 jordtyper. III. Kvælstofkoncentration, -udvaskning og -balance. *Tidsskrift for Planteavl* **89**, 133-154. (Beretning nr. 1774).
- Simmelsgaard, S.E. (1986) Kvælstofudnyttelse i forskellige afgrøder (+Appendiks B). I: Kyllingsbæk, A. & Simmelsgaard, S.E. *Kvælstofudnyttelse og kvælstoftab på sandjord*. *Tidsskrift for Planteavl Specialserie, Beretning nr. S1853*. Statens Planteavlsvforsøg, 113 pp.

- Simmelsgaard, S.E. & Djurhuus, J. (1998) An empirical model for estimating nitrate leaching as affected by crop type and the long-term N fertilizer rate. *Soil Use and Management* **14**, 37-43.
- Simmelsgaard, S.E., Kristensen, K., Andersen, H.E., Grant, R., Jørgensen, J.O. & Østergaard, H.S. (2000) Empirisk model til beregning af kvælstofudvaskning fra rodzonen. N-LES. Nitrate Leaching Estimator. Danmarks JordbrugsForskning, DJF-rapport nr. 32 Markbrug. 67 pp.
- Thomsen, I.K. (1995) Catch Crop and Animal Slurry in Spring Barley Grown with Straw Incorporation. *Acta Agric. Scand. Sect. B, Soil and Plant Sci.* **45**, 166-170.
- Thomsen, I.K., Hansen, J.F., Kjellerup, V & Christensen, B.T. (1993) Effects of cropping system and rates of nitrogen in animal slurry and mineral fertilizer on nitrate leaching from a sandy loam. *Soil Use and Management* **9**, 53-58.
- Thomsen, I.K., Djurhuus, J. & Christensen, B.T. (2001). Residual effect of long-term N fertilization levels. The 11th Nitrogen Workshop, September 9-12 2001, Reims, France. p. 365-366.
- Thomsen, I.K., Djurhuus, J., Christensen, B.T. & Knudsen, L. (2000). Virkning af vedvarende nedsat kvælstoftilførsel i handelsgødning til vinterhvede og vårbyg. Planteavlsoorientering, nr. 07.384, Landbrugets Rådgivningscenter, Landskontoret for Planteavl, Skejby, 7 pp.
- Thomsen, I.K., Djurhuus, J. & Christensen, B.T. (2003) Long continued application of N fertilizer to cereals on sandy loam: grain and straw response to residual N. *Soil Use and Management* **19**, 57-64.
- Vinther, F.P. (2002) Kvælstofab ved denitrifikation i rodzonen i perioden 1985 til 2000. DJF baggrundsnotat for VMPII. [http://www.agrsci.dk/vandmiljo/index\\_g11.shtml](http://www.agrsci.dk/vandmiljo/index_g11.shtml)

## 10. Appendiks A

Kvælstoftilførsel, udbytte og kvælstofudvaskning fra rodzonen ved 1N i de refererede datakilder opdelt efter afgrøde. Udbyttet kan variere pga. forskellige dyrknings sæsoner.

Afsnit	Forsøgsbetegnelse	Kvælstoftilførsel ved 1N [kg N/ha]				Udbytte ved 1N [hkg DM/ha]				Kvælstofudvaskning ved 1N [kg N/ha]			
		Byg	Hvede	Græs	Roer	Byg <sup>0)</sup>	Hvede <sup>0)</sup>	Græs	Roer	Byg <sup>0)</sup>	Hvede <sup>0)</sup>	Græs	Roer
6.3	Drænvandsundersøgelser (S) <sup>6)</sup>	110	150	110 <sup>5)</sup>	-	52-64	54-88	6-9 <sup>5)</sup>	-	15-70	20-50	30-45	-
6.3	Drænvandsundersøgelser (A) <sup>6)</sup>	104	-	240-300	-	37-46	-	115	-	25-50	-	20-60	-
6.4	Parallelforsøget	110	150	110 <sup>5)</sup>	-	56-64	62-75	2.5 <sup>5)</sup>	-	20-60	5-35	1-23	-
6.5	Belastningsforsøget	80	-	160	160	<sup>4)</sup>	<sup>4)</sup>	<sup>4)</sup>	<sup>4)</sup>	40	-	2-7	10-15
6.6	Slamforsøget	110	-	200	145	115-145 <sup>1)</sup>	-	90	220 <sup>2)</sup>	20-40	-	20-25	15-25
6.7	NPK-forsøget	100	100	225	225	48	48	90	190+60 <sup>3)</sup>	<sup>8)</sup>	<sup>8)</sup>	<sup>8)</sup>	<sup>8)</sup>
6.8	Sædskitteforsøget	110	150	300	200	45-55	52-59	105	170+50 <sup>3)</sup>	15-40	25-40	15-25	35
6.9	Efterafgrødeforsøget	120	-	-	-	35-45	-	-	-	30-70	-	-	-
6.10	De langvarige godningsforsøg	75	100	-	-	32	38	-	-	-	-	-	-
6.11	Rønneforsøget	150	180	-	-	55-60	58-64	-	-	-	-	-	-
6.12	Kvalitetskorfforsøget	80	170	-	-	31-43	59-101	-	-	-	-	-	-
6.13	Sandjordsforsøget <sup>7)</sup>	100	160	-	-	44	69	-	-	-	-	-	-
6.14	Landsforsøget	120	150	-	-	40-55	50-72	-	-	-	-	-	-
6.15	Organisk stof i jord	75	100	-	-	<sup>9)</sup>	<sup>9)</sup>	-	-	-	-	-	-
6.16	Børdighedsforsøk	100 <sup>10)</sup>	100 <sup>10)</sup>	-	-	33-36	40-41	-	-	-	-	-	-

<sup>0)</sup> Udbyttet for byg og hvede er alene kerneudbyttet

<sup>1)</sup> Kerne+halv

<sup>2)</sup> Rod+top

<sup>3)</sup> Rod+top

<sup>4)</sup> Udbyttet er angivet i f.e. for sammenligning mellem afgrøderne. Ved 1N blev der høstet 0.5-0.8 f.e./m<sup>2</sup> i byg og græs, mens udbyttet var betydeligt højere i roer, 1.7-2.0 f.e./m<sup>2</sup>.

<sup>5)</sup> Frøgræs

<sup>6)</sup> (S) for Sdr. Stenderup og (A) for Agervig

<sup>7)</sup> I de refererede forsøg indgår 4-6 kvælstofniveauer, men det er vanskeligt at fastslå, hvilket der skal betragtes som 1N. Derfor er der ikke angivet værdier i tabellen.

<sup>8)</sup> Kvælstofudvaskningen var 45 kg N/ha som årligt gennemsnit af sædskittet.

<sup>9)</sup> Der blev ikke foretaget udbyttebestemmelse i forsøget.

<sup>10)</sup> I gennemsnit af sædskittet. Der er ikke angivet godskningsniveau for de enkelte afgrøder

## 11. Appendiks B – Legends to figures and tables

### Legends to Figures

Figure 1. Relative N-leaching by relative N-application rate for the seven data sources on N-leaching. The relative N-leaching model (Simmelsgaard & Djurhuus, 1998) is marked as reference curve (full line with extrapolations in gray). The relative N-leaching and relative N-application is relative to N-leaching at the normal N-application rate.

- (a) *Drænvandsundersøgelserne* (Drainage experiments in the field) at Sdr. Stenderup (1973/74-1985/86) and Agervig (1983/83-1988/89), in total 20 seasons of leaching. The data were used for estimation of the reference curve.
- (b) *Parallelforsøget* 1974/75-1981/82 in lysimetres grown with the same crops as the drainage experiment at Sdr. Stenderup. The symbols represent seven leaching seasons. The season 1979/80 was excluded due to low leaching making calculation of the relative leaching erroneous.
- (c) *Belastningsforsøget*, the symbols represent six combinations of three crops (spring barley, grass and beets) and two soil types (JB1 and JB7).
- (d) *Slamforsøget*, the symbols represent eight combinations of four crops (spring barley, oats, grass and beets) and two soil types (JB1 and JB7).
- (e) *NPK-forsøget*, the symbols represent 12 combinations of four two-years periods (1st+2nd, 3rd+4th, 5th+6th and 7th+8th experimental year) and three rates of potassium fertilization (0, 1 and 2 times the normal potassium rate).
- (f) *Sædkiftesforsøget*, the eight symbols represent different combinations of spring barley, winter wheat, grass and beets grown in crop rotation or in monoculture.
- (g) *Efterafgrødeforsøget*, the five symbols represent four combinations of ploughing time and presence of residual crop during 1987-92 and the mean of four treatments during 1993-97.

Figure 2. Crop (grain) N off-take of spring barley (left) and winter wheat (right) by N-application rate for data sources. Notice differences in scales on both axes for the two types of cereal.

- (a) Spring barley and (b) winter wheat of the long-term experiment at Askov Experimental Station (*De langvarige gødningsforsøg*), the experiment at Rønhave Experimental Station (*Rønhaveforsøget*), the irrigation experiments at sand soil (*Sandjordsforsøgene*), the experiments on grain quality (*Kvalitetskornforsøgene*), and one-year experiments within the Danish Agricultural Advisory Service (*Landsforsøgene*, LkP). In addition, the Swedish *Bördighetsförsök* on cereal crop rotation.
- (c) The effect of soil type on crop N off-take in spring barley in *Landsforsøgene*, using different cereals as previously crop.

- (d) The effect of soil type on crop N off-take in winter wheat in *Landsforsøgene*, using different cereals as previously crop.
- (e) The effect of previous crop on crop N off-take in spring barley in experiments on mineral soils in *Landsforsøgene*.
- (f) The effect of previous crop on crop N off-take in winter wheat in experiments on mineral soils in *Landsforsøgene*.
- (g) The effect of decreasing ratio of actual and potential evaporation in spring barley (*Sandjordsforsøgene*).
- (h) The four species of cereals in *Rønhaveforsøget*.

Figure 3. Straw N off-take by N-application rate. Relations based on the long-term experiment at Askov Experimental Station (*De langvarige gødningsforsøg*, Table 9) and the experiment at Rønhave Experimental Station (*Rønhaveforsøget*, Table 12).

Figure 4. Remaining N calculated in the experiment at Rønhave Experimental Station (*Rønhaveforsøget*) by N application rate ( $N\text{-rest} = N\text{-applied} - N\text{-off-take} - N\text{-leaching}$ ; kg N/ha/year). The calculations are based on the extrapolated values of crop N off-take and modelled values for N leaching in Thomsen *et al.* (2003). The points represent the 12 combinations of four crops and three formerly N-rates. The regressions are for straw removed (line) or returned (dotted).

Figure 5. The differential coefficient of the relative N-leaching model (eqn. 5) by the N application rate for four scenarios, representing two crops different in the N leaching potential (spring barley and grass) and to groups of soil type (sand and loam).



## Legends to tables and selected tables

Table 1. Annual gross N-balance at field level. Typical size of the posts are indicated, as well as the dependency of changes in N application rate and the relevance for crop rotations dominated by cereals and fertilized by mineral fertilizer. The size of the posts depends on the period cut off in relation to crop growth period.

N-post		Size of posts [kg N/ha]	The N-post dependency on N application rate	Relevance to plant-breeders using mineral fertilizer only
Inputs	Mineral fertilizer	100-200	+	+
	Animal manure		+	-
	Crop residues (chaffs)	<5		
	Deposition	15-20	-	
	Biological fixation <sup>1)</sup>			-
Outputs and losses	Crop (grain)	100-180	+	+
	Crop (straw) <sup>2)</sup>	20-40	(+)	+
	Ammonia loss (manure)	<2% of applied		-
	Ammonia loss (crop)	<10% of applied		
	Denitrification	5% of applied	+	+
	Leaching (below root zone)	5-75	+	+
	N-loss via pollen	~5	-	
Difference	Change in soil-N (within the root zone)	?	?	+

<sup>1)</sup> The balance is valid for cereal crop rotation only using mineral fertilizer as nitrogen source. Nitrogen fixation by free-living bacteria is considered as insignificant and independent of the nitrogen application rate.

<sup>2)</sup> This post may also act as input in cases where the straw is not removed from the field.

Table 2. Typical values for N leaching for two crops (continuously spring barley and grass) and two soil types (Sand + loamy sand soils (JB1-4) and sandy loam soil (JB5-7)).

Table 3a. Extract of the Danish soil classification system.

JB-number	Soil type	Clay content, <2 µm [%]	Silt, 2-20 µm [%]	Fine sand, 20-200 µm [%]	Total sand, 20-2000 µm [%]
1	Coarse sand	0-5	0-20	0-50	75-100
2	Fine sand	0-5	0-20	50-100	75-100
3	Coarse sand with clay	5-10	0-25	0-40	65-95
4	Fine sand with clay	5-10	0-25	40-95	65-95
5	Clay with coarse sand	10-15	0-30	0-40	55-90
6	Clay with fine sand	10-15	0-30	40-95	55-90
7	Clay	15-25	0-35		40-85

Table 3. Overview of the data sources. Section number, name of experiment, locality/soil type, type of experiment, experimental period, rates of N application, measurements of leaching, crop N off-take or change in the soil N pool, and final the references.

Section	Name of data source used in this report	Locality/soil type (See Table 3a)	Experiment type	Experimental period	N-rates <sup>1)</sup>	Determination of		References
						Leaching	Change in soil-N pool	
6.3	Drænvandsundersøgelse	Sdr. Stenderup (JB7) and Agervig (JB4)	Field with drains	1973-95	0, 1/2, 1, 1 1/2	+	(+)	Kjellerup & Kofoed (1979); Kjellerup (1983, 1995); Simmelsgaard (1980, 1985b, 1985c); Simmelsgaard & Djurhuus (1998); Olsen (1995) Kjellerup & Kofoed (1983)
6.4	Parallelforsøg <sup>2)</sup>	Askov using Sdr. Stenderup soil (JB7)	Lysimeter	1974-81	0, 1/4, 1/2, 1, 1 1/2, 2	+	+	Larsen & Kjellerup (1989)
6.5	Belastningsforsøg	Askov (JB1 and JB7)	Lysimeter	1974-84	1/2, 1, 2	+	+	Larsen & Petersen (1993)
6.6	Slamforsøg	Askov (JB1 and JB7)	Lysimeter	1974-81	1/2, 1, 2	+	+	Hansen <i>et al.</i> (1989); Klausen & Hansen (1988)
6.7	NPK-forsøg	Askov (JB3)	Lysimeter	1974-81	0, 1, 2	+	+	Klausen (1987); Hansen (1991); Thomsen <i>et al.</i> (1993)
6.8	Sædskifteforsøg	Askov (JB3)	Lysimeter	1983-88	0, 1, 1 1/2	+	+	Hansen & Djurhuus (1996, 1997); Hansen <i>et al.</i> (2000a, 2000b)
6.9	Efterafgrøde	Jyndevad (JB1)	Field with ceramic cups	1987-97	1/2, 1	+	+	Christensen <i>et al.</i> (1994)
6.10	De langvarige godningsforsøg	Askov (JB5)	Field	1973-92	0, 1/2, 1, 1 1/2	-	+	Thomsen <i>et al.</i> (2003)
6.11	Rønhaveforsøg	Rønhave (JB7)	Field	1999-2001	0, 1/2, 1, 1 1/2, 2	-	+	Jørgensen (pers. komm.)
6.12	Kvalitetsskorn-forsøg	Roskilde (JB5)	Field	1993-95	ca. 0.6; 1; 1.4	-	+ <sup>3)</sup>	Jørgensen (pers. komm.)
		Flakkebjerg (JB6)	Field	1998-2000	ca. 0.8; 1; 1.2	-	+ <sup>3)</sup>	Jørgensen (pers. komm.)
		Rønhave (JB7)	Field	1970-84	4-5 rates	-	+ <sup>3)</sup>	Simmelsgaard (1986)
6.13	Sandjordsforsøg	JB1-4	Field	1993-2001	0, 1/4, 1/2, 3/4, 1, 1 1/4	-	+ <sup>3)</sup>	Knudsen (pers. komm.)
6.14	Landsforsøgene	JB1-11	Field	1956-88	1	-	-	Christensen (1988)
6.15	Organisk stof i jord	Askov (JB4) (JB5)	Frames	1956-85	1	-	-	Christensen (1990)
6.16	Børdighetsforsøg	Skåne, 8-17% clay	Field	1957-96	0, 1/2, 1, 1 1/2	-	+ <sup>3)</sup>	Carlgrén & Mattsson (2001)

<sup>1)</sup> N-rate 1 corresponds to the normal N application rate at the time for the experiment.

<sup>2)</sup> Parallelforsøget was done with the same crop rotation as Drænvandsundersøgelse at Sdr. Stenderup.

<sup>3)</sup> N-off-take was determined in grain only.

Table 4. Characterizing of the experimental areas for *Drænvandsundersøgelserne* used for putting forward the relative N leaching model (Simmelsgaard & Djurhuus, 1998).

Table 5. References concerning *Drænvandsundersøgelserne* used for putting forward the relative N leaching model and *Parallelforsøget* ran as a parallel lysimeter experiment.

Table 6. Crop rotations in *Sædskifteforsøget*.

Table 7. References for *Sædskifteforsøget*.

Table 8. Combinations of catch crop in the two experimental periods of *Efterafgrødeforsøget*.

Table 9. Estimates ( $\pm$ SE) of the relation of N off-take in grain and straw by N application rate in the long-term experiment at Askov Experimental Station (*De langvarige gødningsforsøg*) using eqn. 6 based on data from 1973-88.

Table 10. Fertilizer N application rates during 1972-98 in *Rønhaveforsøget*.

Table 11. Years when the plots of the originally experiment at Rønhave Experimental Station were subdivided into the five plots of increasing N application rate used in *Rønhavehaveforsøget*.

Table 12. Estimates ( $\pm$ SE) of the relation of N off-take in grain and straw by N application rate in the four species in *Rønhaveforsøget* using eqn. 6.

Table 13. Estimates ( $\pm$ SE) of the relation of N off-take in grain by N application rate in experiments on grain quality (*Kvalitetskornforsøget*). Spring barley and winter wheat as mean of two experimental sites using eqn. 6.

Table 14. Parameters for the relation of total crop N off-take in spring barley by N application rate in *Sandjordsforsøgene* inserting the values 0.5; 0.75 and 1 for the relative evaporation, E, in eqn. 10.

Table 15. Parameters for the relation of N off-take in grain of spring barley and winter wheat by N application rate in *Sandjordsforsøgene* inserting the values 0.5; 0.75 and 1 for the relative evaporation, E, in an equation similar to eqn. 10.

Table 16. Estimates ( $\pm$ SE) of the relation of N off-take in grain by N application rate in one-year experiments (*Landsforsøgene*). Spring barley (using eqn. 7) and winter wheat (using eqn. 6) organized in groups depending on previous crop and soil type.

Table 17. Estimated annual changes in the soil-N pool (change in the N concentration of the plough layer) in a frame and a field experiment at Askov Experimental Station.

Table 18. Estimates ( $\pm$ SE) of the relation of N off-take by N application rate in the Swedish *Bördighetsförsök* using eqn. 6. Spring barley and winter wheat were grown in two crop rotations: Cattle crop rotation (total crop N off-take) and a crop rotation dominated by cereals (N off-take in grain). The estimates are mean of 16 and 12 year $\times$ site combinations for spring barley and winter wheat, respectively.

Table 19. Summary of the estimates of change in crop N off-take for change in the N application rate for spring barley and winter wheat grown in crop rotations dominated by cereals.

Section	Name of data source used in this report	Duration of experiment [year]			Spring barley			Winter wheat		
		1	3-10	>10	Grain	Straw	Total	Grain	Straw	Total
6.10	De langvarige gødningsforsøg			+	0.49	0.20	0.69	0.50	0.16	0.65
6.11	Rønhaveforsøget <sup>1)</sup>	+		+	0.48	0.14	0.62	0.53	0.12	0.66
6.12	Kvalitetskornforsøg	+			0.33	-	-	0.47	-	-
6.13	Sandjordsforsøg, relative evaporation>0.75	+			0.20-0.26 <sup>3)</sup>	- <sup>2)</sup>	0.36-0.44 <sup>3)</sup>	0.62	-	-
6.14	Landsforsøgene	+			0.33-0.34 <sup>3)</sup>	-	-	0.38	-	-
6.16	Bördighetsförsök			+	0.62	-	-	0.44	-	-

<sup>1)</sup> A one-year experiment done in a long-term experiment.

<sup>2)</sup> An estimate cannot be obtained directly, but it is supposed to be around 0.16-0.18.

<sup>3)</sup> At an N-application rate of 100-120 kg N/ha

Table 20. See next page.

Table 21. Summary of estimates of relative change in the output posts in the nitrogen balance for a change in the mineral nitrogen application rate for crop rotations dominated by cereals.

Table in Appendix A. Nitrogen application rate, yield and nitrogen leaching from the root zone at normal nitrogen rate (1N) in the data sources organized by crop.

Table 20. Summary of estimated annual change in soil-N pool (rate of decrease,  $\Delta N_{\text{jord}}$ ), and changes in the rate of decrease by application of mineral fertilizer. Depending on the data sources the estimates are stated for the plough layer (0-25 cm) or the root zone (0-100 cm).

Section	Name of data source used in this report	Number of samples	N in soil (concentration) $N_{\text{jord}}$	Annual change of N in soil at nil N fertilization $\Delta N_{\text{jord, 0N}}$	Annual change of N in soil at normal N fertilization $\Delta N_{\text{jord, 1N}}$	Change in the annual change of N in soil by change in the N-application $\Delta(\Delta N_{\text{jord}})$	
							General rate of decrease at 1N
(0N)							
			[%]	[pct.-point/år] $\times 10^{-3}$		[pct.-point/år pr. kg N/ha] $\times 10^{-6}$	
			Plough layer	Root zone	Plough layer	Root zone	
6.10	De langvarige gødningsforsøg	8	0.08-0.13	-0.68 <sup>3)</sup>	-	2.9	
6.11	Ronhaveforsøget:	1	0.11-0.14	-	-1.3 <sup>1+2)</sup>	-	8.5 <sup>1)</sup>
	Straw removed				-1.4 <sup>1+2)</sup>	-	4.8 <sup>1)</sup>
6.15	Organisk stof i jord: Frame experiment	9	0.23	-	-	-0.9 - -1.7	-
	Field experiment	30	0.14-0.15	-	-	-0.7 - -1.1	-
6.16	Børdighetsforsøk: Four-field crop rotation w. cereals	2	0.14-0.22	-0.27	-	-	4.1
	Cattle crop rotation	2		-0.047	-	-	1.7
-	Broadbalk (Glendining <i>et al.</i> , 1996)	5	0.10-0.13	+0.08	-	-0.9 - -1.4 <sup>3)</sup>	-
-	Stakyard Field (Mattingly <i>et al.</i> , 1975)	7	0.07-0.14	-0.4 - -0.8	-	-0.5 - -0.9 <sup>4)</sup>	-

<sup>1)</sup> Calculated, and includes other effects such as denitrification and N-loss from the crop, and therefore really  $\Delta N_{\text{veg}}$  and  $\Delta(\Delta N_{\text{veg}})$ , respectively.

<sup>2)</sup> An application rate of 150 kg N/ha and returning the straw makes the change in soil-N equal nil, whereas the soil-N pool decrease by 26 kg N/ha when the straw is removed (compare with Figure 4), corresponding to a change in soil-N concentration by  $-0.7 \times 10^{-3}$  pct.-point/year.

<sup>3)</sup> The estimates are valid for N rates of 96 and 144 kg N/ha

<sup>4)</sup> The 1N rate varied, but was about 50 kg N/ha during 1888-1972.