

Nr. 49 · 1996



Høst af korn, bælgssæd, frø og raps Driftsteknisk analyse

*Harvest of grain, pulse, seeds and rape
Operational analyses*

Claus Grøn Sørensen
Afdeling for Jordbrugsteknik og Produktionssystemer
Statens Husdyrbrugsforsøg

STATENS HUSDYRBRUGSFORSØG

Forskningscenter Foulum, Postboks 39, 8830 Tjele • Tlf. 89 99 19 00 • Fax 89 99 19 19
Forskningscenter Bygholm, Postboks 536, 8700 Horsens • Tlf. 75 60 22 11 • Fax 75 62 48 80

Statens Husdyrbrugsforsøg har til formål at gennemføre forskning samt indsamle og opbygge viden af betydning for erhvervsmæssigt husdyrbrug og jordbrugsteknik i Danmark. I forskningen skal der lægges vægt på ressourceudnyttelse, dyrevelfærd, internt og eksternt miljø, produkternes kvalitet og konkurrenceevne samt en hurtig og sikker formidling af resultaterne.

Institutionen omfatter følgende forskningsafdelinger: Afdeling for Ernæring, Afdeling for Råvarekvalitet, Afdeling for Avl og Genetik, Afdeling for Sundhed og Velfærd, Afdeling for Jordbrugsteknik og Produktionssystemer samt Centrallaboratorium. Servicefunktionerne varetages af Afdeling for Landbrugsdrift, Afdeling for

Stalddrift samt af Statens Husdyrbrugsforsøgs Sekretariat.

Husdyrforskningen finder fortrinsvis sted på Forskningscenter Foulum, mens den jordbrugstekniske forskning udføres på Forskningscenter Bygholm. Herudover har institutionen adgang til en række privat-/organisationsejede forsøgsstationer m.m.

Forskningsresultaterne publiceres i internationale, videnskabelige tidsskrifter samt i publikationer udgivet af Statens Husdyrbrugsforsøg. Abonnement på årsrapporter, forskningsrapporter, beretninger og informationsblad kan tegnes ved henvendelse til ovenstående adresse.

DANISH INSTITUTE OF ANIMAL SCIENCE

Research Centre Foulum, P.O. Box 39, DK-8830 Tjele • Tel +45 89 99 19 00 • Fax +45 89 99 19 19

Research Centre Bygholm, P.O. Box 536, DK-8700 Horsens • Tel +45 75 60 22 11 • Fax +45 75 62 48 80

The aim of the Danish Institute of Animal Science is to carry out research and accumulate knowledge of importance to animal husbandry and agricultural engineering. In the research, great importance is attached to the utilization of resources, environment, animal welfare, and to the quality and competitiveness of the agricultural products along with a rapid and efficient dissemination of the results.

The institute comprises six research departments: Dept. for Nutrition, Dept. for Product Quality, Dept. for Breeding and Genetics, Dept. for Animal Health and Welfare, Dept. for Agricultural Engineering and Production Systems, and a Cen-

tral Laboratory. Service departments include Dept. for Farm Management and Services, Dept. for Livestock Management, and a Secretariat.

The research departments for animal science together with management and service departments are located at Research Centre Foulum. The technical research takes place at Research Centre Bygholm.

Research results are published in international scientific journals and in publications from the Danish Institute of Animal Science. For subscription to reports and other publications please contact the above address.

Forskningsrapport nr. 49 fra Statens Husdyrbrugsforsøg

Høst af korn, bælgssæd, frø og raps Driftsteknisk analyse

*Harvest of grain, pulse, seeds and rape
Operational analyses*

With English summary and subtitles

Claus Grøn Sørensen
Afdeling for Jordbrugsteknik og Produktionssystemer
Statens Husdyrbrugsforsøg

Indholdsfortegnelse

	Side
Sammendrag	7
Summary	9
1 Indledning	11
2 Materialer og metode	12
2.1 MEJETÆRSKERENS PRÆSTATIONSEVNE	13
2.2 KVANTIFICERING AF HØSTPERIODER	14
2.3 OMKOSTNINGER	14
3 Høstsystemets kapacitet	14
3.1 DRIFTSTEKNISKE STUDIER	14
3.1.1 Modeller for mejetærskerens præstationsevne	16
3.1.1.1 Høstarbejde i marken	16
3.1.1.2 Transport af høstet materiale til lager	20
3.1.1.3 Samlet model	23
3.1.1.4 Mejetærskerens effektivitet	23
3.1.1.5 Modeleksempel	27
4 Kvantificering af høstperiode	29
4.1 MODEL FOR AFGRØDENS VANDINDHOLD	29
4.1.1 Fysiske parametre	30
4.1.2 Biologiske parametre	31
4.1.3 Matematisk beskrivelse	32
4.2 MODELIDENTIFIKATION	36
4.2.1 Måling af afgrødens vandindhold	36
4.2.2 Måling af meteorologiske variable	36
4.2.3 Estimation af modelparametre	37
4.3 SIMULERING AF AFGRØDENS VANDINDHOLD	39
5 Potentiel høsttid	40
5.1 HISTORISKE VEJRDATA	40
5.2 SIMULERING AF ANTAL HØSTTIMER/UDNYTTESSEFAKTOR	40
6 Omkostningsmodel	44
6.1 MATEMATISK OMKOSTNINGSMODEL	45
6.2 BEREGNINGSEKSEMPEL	50
6.3 OPTIMERING AF MEJETÆRSKERHØST	54

	Side
6.3.1 Modningstidspunkt	54
6.3.2 Udnyttelsesfaktor	55
6.3.3 Mejetærskerens effektivitet	56
6.3.4 Værdi af høstet afgrøde	56
7 Udnyttelsesgrad	57
7.1 UDNYTTELSESGRAD PÅ BEDRIFTSNIVEAU	59
7.2 UDNYTTELSESGRAD PÅ LANDSPLAN	61
8 Konklusion og diskussion	65
Anerkendelser	68
Litteratur- og referenceliste	69
Appendiks A: Udnyttelsesfaktor i perioden 1962-1991	72
Appendiks B: Tabeller på engelsk	77

Contents

	Page
Summary in Danish	7
Summary in English	9
1 Introduction	11
2 Materials and methods	12
2.1 PERFORMANCE OF THE COMBINE HARVESTER	13
2.2 QUANTIFICATION OF HARVESTING PERIODS	14
2.3 COSTS	14
3 Capacity of harvesting system	14
3.1 OPERATIONAL STUDIES	14
3.1.1 Performance models of combine harvester	16
3.1.1.1 Harvest work in the field	16
3.1.1.2 Transport of harvested produce to store	20
3.1.1.3 Overall model	23
3.1.1.4 Effectiveness of combine harvester	23
3.1.1.5 Model example	27
4 Quantification of harvesting period	29
4.1 MODEL FOR MOISTURE CONTENT OF CROP	29
4.1.1 Physical parameters	30
4.1.2 Biological parameters	31
4.1.3 Mathematical description	32
4.2 MODEL IDENTIFICATION	36
4.2.1 Measurement of moisture content of crop	36
4.2.2 Measurement of meteorological variables	36
4.2.3 Estimate of model parameters	37
4.3 SIMULATION OF MOISTURE CONTENT OF CROP	39
5 Potential time for harvesting	40
5.1 HISTORICAL WEATHER DATA	40
5.2 SIMULATION OF NUMBER OF HARVESTING HOURS/UTILIZATION RATIO	40
6 Model of costs	44
6.1 MATHEMATICAL MODEL OF COSTS	45
6.2 EXAMPLE OF CALCULATION	50
6.3 OPTIMIZING COMBINE HARVESTING	54

	Page
6.3.1 Time of ripening	54
6.3.2 Utilization ratio	55
6.3.3 Effectiveness of combine harvester	56
6.3.4 Value of harvested crop	56
7 Coefficient of utilization	57
7.1 COEFFICIENT OF UTILIZATION ON A FARM LEVEL	59
7.2 COEFFICIENT OF UTILIZATION ON A NATIONAL LEVEL	61
8 Conclusion and discussion	65
Acknowledgements	68
Literature and references	69
Appendix A: Utilization ratio in the period 1962-1991	72
Appendix B: Tables in English	77

Sammendrag

Mejetærskning er en af de dyreste maskinoperationer i planteproduktionen. De driftstekniske omkostninger ved høst af modne korn-, frø-, bælgseeds- og industriafrøder udgør ca. 30% af de samlede maskinomkostninger på 3.000-4.000 kr. pr. ha (Landskalkuler, 1993). En optimeret arbejdstilrettelæggelse og maskinudnyttelse er således vigtig, idet det herved skønnes muligt at opnå betydelige omkostningsreduktioner.

Målet med nærværende undersøgelse er udvikling af værktøjer til gennemførelse af detaljerede analyser af arbejds- og maskinindsatsen vedr. forskellige dele af høstprocessen. Dette indebærer tilpasning/dimensionering af den tekniske kapacitet til det aktuelle kapacitetsbehov gennem en kvantificering af mejetærskerens potentielle driftstid, herunder en bestemmelse af aktuel udnyttelsesgrad på landsplan. Udviklete værktøjer og resultater vil dels kunne fungere som beslutningsstøtte for landmænd/konsulenter, dels være data- og modelgrundlag for andre forskningsprojekter.

Driftstekniske data fra studier af mejetærskning og transport af høstet materiale er fremskaffet og anvendt til opbygning af matematiske modeller for arbejdsoperationerne. Modellerne omfatter forventet arbejdsbehov og maskinkapacitet, hvori der indgår influerende variable som markstørrelse, markform, arbejdsbredde, kørehastighed, udbytte, transportafstand m.m. Som et led i implementeringen af modellerne indgår disse modeller i et pc-baseret program for driftsteknisk analyse af jordbrugets arbejds- og maskinoperationer - jf. afsnit 3.

Resultaterne fra praksis viser store forskelle i arbejdspræstationerne for ellers sammenlignelige arbejds- og maskinsystemer. En del af forklaringen herpå ligger naturligvis i lokale forhold som afgrødekarakteristika, vejrforhold, vedligeholdel-

sestilstand m.m., men en anden del kan klart henføres til stedlige organisatoriske forhold, mejetærskerførerens evner m.v. Hensigtsmæssig organisering af f.eks. transporten af høstet materiale, viden om spildets størrelse og indstilling til maksimal stubhøjde kan betyde 20-30% højere kapacitet.

Mejetærskerens potentielle driftstid i forskellige afgrøder er kvantificeret ved modeller for vandindholdets variation i afgrøden, afhængigt af meteorologiske variable som lufttemperatur, luftfugtighed, vindhastighed og nedbør. Sandsynlighedsfordelingen, og dermed den årlige variation for den potentielle driftstid under grænser for afgrødens vandindhold på høsttidspunktet, er estimeret ved hjælp af historiske vejrdata for årene 1962-1991 - jf. afsnit 4 og 5. De estimerede sandsynlighedsfordelinger muliggør beregning og planlægning af kapacitetsbehov.

En omkostningsmodel for mejetærskningen, hvori der indgår faktorer som investeringsbeløb, produktpriser, værdi for rettidighed m.m., muliggør beregning af optimal mejetærskerkapacitet under givne forudsætninger som potentiel driftstid, afgrødesammensætning m.m.

Konklusionen er bl.a., at det optimale kapacitetsbehov og de tilknyttede omkostninger nedsættes væsentligt ved at vælge en afgrødesammensætning med uafhængigt modnende afgrøder. Reduktionen af omkostningerne kan blive 20-30%, afhængigt af antal uafhængigt modnende afgrøder og arealstørrelse, eller 15-20%, afhængigt af graden af overlappende modningsintervaller - jf. afsnit 6. Beregning af optimal mejetærskerkapacitet for en given planteproduktion fordrer input omkring investeringsbeløb og produktpriser. Den aktuelle tendens til lavere produktpriser betyder f.eks., at omkostningerne ved ikke at være retti-

dig reduceres, hvilket igen betyder, at en given mejetærsker, under i øvrigt samme krav til spillets størrelse, kan anvendes på et større areal.

Udnyttelsesgraden af den eksisterende danske mejetærskerflåde viser store variationer, afhængigt af vejrforholdene og den geografiske placering. I en del af årene vil der være en overkapacitet, mens kapaciteten er udnyttet op mod 100% i 80% af sæsonerne, når vandprocenten i afgrøden er på 16-18 - jf. afsnit 7. Det skal understreges, at nævnte konklusion bygger på definerede forudsætninger omkring længde af potentiel høstperiode m.m.

Det gælder endvidere, at beregningen af udnyttelsesprocenten forudsætter en ensartet teknisk/kapacitetsmæssig mejetærskerpark. I praksis er dette naturligvis ikke tilfældet, da mejetærskerparken er inhomogen med en blanding af ældre og nyere maskiner. Da den teknologiske forældelse således ikke er indregnet, vil udnyttelsesprocenterne sandsynligvis være højere, end beregningerne umiddelbart giver indtryk af.

Nøgleord: Mejetærskning, arbejdsbehov, kapacitet, modellering, høsttimer, omkostninger, optimering, udnyttelsesgrad.

Summary

Combining is one of the most expensive machinery operations in plant production. Out of the total machinery costs of DKK 3,000-4,000 per ha about 30% is used for the harvest of ripe grain, seeds, pulse and industrial crops (The Danish Advisory Centre, 1993). Optimal work organization and machinery utilization are therefore essential factors with regard to achieving considerable cost reductions. The present survey aims at developing tools for the implementation of detailed analyses of work and machine efforts involved in different parts of the harvesting process. Another aim is to adjust/dimension the technical capacity to comply with the current capacity requirement by quantifying the potential combine operating time, including determination of the current national coefficient of utilization. The results and the tools developed may serve as decision support for farmers/consultants, or other researchers may use them as a basis for data and models.

Operational data were collected from studies of combine harvesting and transport of harvested produce. The data were used to construct mathematical models of work operations. The models cover expected labour requirements and machine capacity including influencing variables such as field size and shape, working width, travelling speed, yield, transport distance, etc. With a view to implementing the models they form part of a computer program for operational analyses of agricultural work and machinery operations, cf. Chapter 3.

Results from practical farming have shown great differences in the performance of otherwise comparable work systems and machinery systems. This may be due to local conditions, such as crop characteristics, weather conditions, state of maintenance, etc., but a clear reference to the organizing conditions, the abilities of the combine

driver, etc. is also found. A 20 to 30% increase in capacity can be achieved through proper organization, for instance as regards transport of harvested produce, knowledge of the degree of losses, or by leaving the stubble as long as possible.

The potential operating times of combine harvesters in different crops are quantified by means of models for varying moisture content of crops, depending on meteorological variables such as temperature, air humidity, wind velocity and precipitation. On the basis of weather data recorded over a period of 30 years (see Chapters 4 and 5), estimates were made on the probability distribution and with that on the annual variation as regards the potential operating time, which is restricted by the moisture content of the crop at the time of harvest. The estimated probability distributions open up the prospect of calculating and planning capacity requirements.

An optimum combine capacity can be calculated under given premises such as potential operating time, timeliness, crop composition, etc. by means of a cost model for combine harvesting. The model includes factors such as machine prices, product prices and value of timeliness, etc.

It can be concluded that considerable reductions of the optimum capacity requirements and the costs involved can be achieved by choosing a crop composition which consists of independently ripening crops. Depending on the number of independently ripening crops 30 to 40% cost reductions can be achieved, or 15 to 20% reductions can be achieved depending of the degree of overlapping ripening intervals, cf. Chapter 6. For the calculation of combine capacities for a given type of plant production, input on machine and product prices are needed. The present tendency to reduced product prices will for instance lead to

a reduction of the costs for non-timeliness. This again means that a given combine harvester can be used on a larger area, given the same demands to the extent of loss in yield.

The coefficient of utilization of the present Danish assembly of combine harvesters varies considerably, depending on weather conditions and locations. To a certain extent over-capacity will be seen in some years, while in 80% of the seasons, when the moisture percentage of the crop ranges from 16 to 18, the capacity appears to be utilized almost 100%, cf. Chapter 7. It should be emphasized that the above-mentioned conclusion is made on the basis of defined conditions concerning the duration of a potential harvesting period, etc.

In order to calculate the utilization percentage the assembly of combine harvesters should be homogeneous both as regards operational qualities and capacities. Naturally, this is not the case in real life, where a combination of old and new combine harvesters of varying quality is available. Since the technological obsolescence is not taken into account, the utilization percentages would probably be higher than immediately estimated.

Keywords: Combine harvesting, labour requirement, capacity, modelling, harvesting hours, costs, optimalization, coefficient of utilization.

1 Indledning

Arbejdsprocesserne i jordbrugets planteproduktion er karakteriseret ved en interaktion mellem menneske-/maskinsystemet, vejrforholdene samt et materiale (afgrøde), der er i besiddelse af karakteristiske biologiske og fysiske egenskaber. Som en konsekvens kræver planlægningen og styringen af maskinoperationerne en kvantificering og metoder til prædiktation af stokastiske faktorer som f.eks. vejret. Med hensyn til stokastiske faktorer som vejrforhold, afgrødetilskud m.m. består en vigtig opgave i at lancere beslutningsstøtteværktøjer, som kan hjælpe landmandens risikovurdering i forbindelse med forskellige planlægningsstrategier.

I ovennævnte forbindelse er høstprocessen specielt aktuel. Mejetærskningen er en af de dyreste maskinoperationer i planteproduktionen. De driftstekniske omkostninger ved høst af modne korn-, frø-, bælgseeds- og industriafgrøder udgør ca. $\frac{1}{3}$ af de samlede maskinomkostninger på 3.000-4.000 kr. pr. ha (Landskalkuler, 1993). Det er således vigtigt med en fornuftig arbejdstilrettelæggelse og maskinudnyttelse, idet det her ved skønnes muligt at reducere omkostningerne med 20-30% pr. ha. Dette gøres bl.a. ved en bedre udnyttelse af såvel teknik som mandskab, forlængelse af høstperioden eller indretning af afgrødevalget med henblik på den størst mulige spredning af modningstidspunktet.

Der dyrkes i Danmark 1,78 mio. ha med korn-, frø-, bælgseeds- og industriafgrøder (Danmarks Statistik, 1992/93). Til høstning af dette areal findes der ca. 31500 mejetærskere (Danmarks Statistik, 1992/93). Dette svarer til et årligt høstet areal på 57 ha, og antages der en gennemsnitlig kapacitet på 1,1 ha/time, fås der en årlig driftstid pr. mejetærsker på ca. 52 timer. Fra flere sider er postulatet, at udnyttelsen af mejetærskerflåden er på omkring 50%, og tilsvarende

angiver Lehoczky og Nacsady (1980) 50-60% som gældende på verdensplan.

Dette postulat er imidlertid givet på et for simpelt grundlag, idet forholdene omkring mejetærskerens udnyttelsesgrad er yderst komplicerede. Den årlige driftstid, beregnet på basis af det samlede afgrødeareal, fordelt på det registrerede mejetærskerantal, negligerer tidsfristerne ved afgrødehøst. En realistisk model for mejetærskerens anvendelse kræver hensyntagen til rettidseffekterne fra forskellige afgrøder, ligesom vejrforholdenes variation må inddrages. Dermed bliver modellerne komplicerede, idet der knyttes sandsynligheder til udsagn om udnyttelsesgrad og driftstid m.m.

Trods forskellige vanskeligheder ved opstilling af sådanne modeller til afbildning af sammenhængen mellem arbejds-/maskinsystemet og det biologiske/meteorologiske system, er det vigtigt, at der gøres forsøg herpå. Kun derved kan landmandens beslutningsgrundlag og den generelle viden omkring disse sammenhænge forbedres.

Vedrørende de driftstekniske data for arbejds- og maskinkapacitet ved mejetærskning var der før gennemførelsen af dette projekt kun adgang til data af ældre dato, og der er aldrig gennemført målrettede undersøgelser omkring de driftstekniske forhold ved høst, transport og lagring af korn, bælgseeds, frø og raps.

Det er derfor projektets formål

- at gennemføre driftstekniske analyser til bestemmelse af arbejdsbehov og maskinkapacitet ved høst, hjemtransport og indlægning af korn, bælgseeds og raps på lager.
- at bestemme høstperiodens længde, afhængigt af mejetærskerkapacitet samt afgrødekombinationer og vejrforhold.

- på grundlag af de driftstekniske analyser samt analyser af anvendelig høsttid at påvise strategier, der ved rationel arbejdstilrettelæggelse, optimal udnyttelse af arbejdskraft og teknik samt velvalgte afgrødekombinationer minimerer høst- og transportomkostningerne.
- at estimere nødvendig mejetærskerkapacitet på landsplan samt på udvalgte modelgårde.

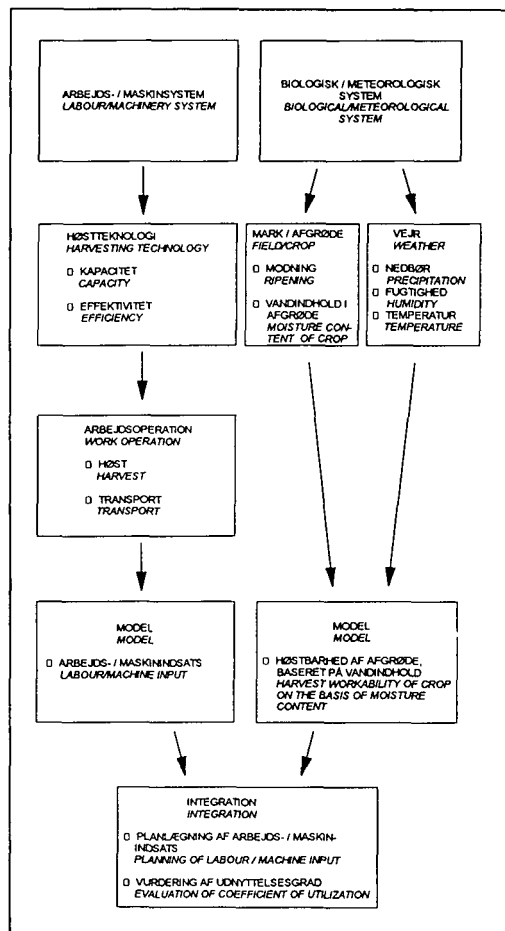
2 Materiale og metoder

Arbejds- og maskinsystemet udgør sammen med det biologiske og meteorologiske system be-
driftens samlede produktionssystem. Når det gæl-
der planlægning og styring af maskinanvendelse,
er følgende faktorer relevante at inddrage

- Maskintype samt afgrøderne og disses egen-
skaber i form af f.eks. udbytte og vandindhold.
- Rettidseffekten, målt i udbyttetab, ved opera-
tionens udførelse på et ikke-optimalt tidspunkt.
- Maskinens præstationsevne (kapacitet, tab m.m.).

- Vejrets indflydelse på afgrødernes høstbarhed.
- Tilgængelig arbejdskraft.
- Pris på produkter, arbejdskraft, brændstof m.v.

Der er således to hovedindsatsområder, nemlig
en bestemmelse af mejetærskerens præstations-
evne under praktiske forhold samt kvantificering
af afgrødernes høstbarhed, defineret som den
tidsmæssige afgrænsning af perioder, i hvilke af-
grødernes vandindhold er under visse grænser.



Figur 1 Systemdele vedr. høstprocessen
System parts involved in the har-
vesting process

I det følgende beskrives kort fremgangsmåden ved bestemmelse af præstationsevne, kvantificering af høstperioder samt omkostningsberegninger. Den detaljerede gennemgang findes i afsnit 3 og 4.

2.1 MEJETÆRSKERENS PRÆSTATIONSEVNE
Til bestemmelse af præstationsevnen er der gennemført driftstekniske studier hos udvalgte landmænd (forsøgsværter). I undersøgelserne indgik forskellige mejetærskertyper og maskinstørrelser

i forskellige afgrøder. Følgende afgrøder har været inddraget: Vinter- og vårbyg, vinterhvede, vinterrug, vinter- og vårraps, ærter og frøgræs.

De indsamlede data vedr. arbejds- og maskinindsats er anvendt til beregning af normtal for arbejdsbehov samt til opstilling af modelløsninger for specifikke arbejdsoperationer ved høstarbejdet. Det har her drejet sig om kapacitet og arbejdsbehov ved mejetærskning samt transport af høstet materiale til opbevaring.

2.2 KVANTIFICERING AF HØSTPERIODER

Med udgangspunkt i en modifikation af tidligere publicerede modelantagelser (jf. s. 29) opstilles der en matematisk model for vandindholdet i ikke-høstede afgrøder som funktion af lufttemperatur, luftfugtighed, vindhastighed og nedbør. Modellens parametre estimeres på basis af sammenhørende målinger af vandindhold i afgrøden og forannævnte meteorologiske variable.

Som input til modellen benyttes der herefter historiske vejrdata fra en 30-årig periode, dels fra Værløse, dels fra Karup (repræsenterende hhv. Øst- og Vestdanmark). Som output fra modellen fås et estimat af afgrødernes vandindhold over disse 30 år (for begge lokaliteter). På denne baggrund gives der mulighed for at opstille en sandsynlighedsfordeling for det potentielle antal høsttimer ved forskellige øvre grænser for, hvor stort et maksimalt vandindhold der accepteres.

De driftstekniske data og modeller for mejetærskerens præstationsevne sammen med analysen og modellerne for det potentielle antal høsttimer som funktion af vejrliget danner grundlaget for

estimering af den nødvendige mejetærskerkapacitet. For udvalgte afgrødefølger gennemføres der konsekvensberegninger vedrørende mejetærskerkapacitet under normale og unormale vejrbetingelser. Endvidere vurderes udnyttelsesgraden af den eksisterende mejetærskerflåde ved definerede høstperiodelængder, afgrødesammensætning, vandindhold i afgrøden, vejrforhold m.m.

2.3 OMKOSTNINGER

Omkostningerne ved mejetærskningen er vurderet ved en omkostningsmodel, som udtrykker de faste og de variable omkostninger, afhængigt af faktorer som forrentning/afskrivning, reparation og vedligehold, brændstofforbrug, arbejds løn, afgrødetab, potentiel driftstid m.m. En central faktor er afgrødetabet, forårsaget af rettidseffekten. Dette tab udgør en variabel omkostning, der er afhængig af bl.a. maskinkapacitet og som sådan må inddrages i omkostningsmodellen.

Omkostningsmodellen anvendes til bestemmelse af optimal kapacitet og minimale omkostninger som funktion af antal uafhængigt modnende afgrøder, spredning af modningsintervaller m.m.

3 Høstsystemets kapacitet

Høstsystemets kapacitet defineres som høstet areal eller mængde pr. tidsenhed. Fremskaffelsen af data til kvantificering og modellering af kapaciteten for forskellige høstsystemer er gennemført ved hjælp af driftstekniske studier på egnede studielandbrug. Disse landbrug er udpeget med hjælp fra en række maskin- og planteavlskon-sulenter samt maskinfirmaer. Kriterierne ved udvælgelsen har bl.a. været en kurant og behovstilpasset maskinpark samt repræsentativitet med hensyn til afgrødesammensætning.

3.1 DRIFTSTEKNISKE STUDIER

Der er gennemført i alt 65 driftstekniske studier på udvalgte landbrug. Selve undersøgelserne omfatter arbejdsstudier, hvor arbejds- og kapacitetsbehovet ved mejetærskning og hjemtransport af høstet materiale er målt. Den totale tid, i hvilken maskinerne er knyttet til en opgave, opdeles endvidere på deloperationer. Disse omfatter operationstid (effektiv marktid, vendetid, aflæsning m.v.), hjælpetid (justeringer, reparationer, afgrøde- og jordbundsstop, operationspauser), ventetid

samt klargøringstid. Det høstede areal opmåles, gennemsnitlig arbejdsbredde beregnes, afgrøden vejes, og der udtages prøver til vandbestemmelse.

Tabel 1 viser et eksempel på de data, der opsam-

les ved det enkelte arbejdsstudie. Totaltiden er opdelt på deloperationer: Hovedarbejde (maskinen arbejder i skåret), aftømning af korn, tomkørsel m.m. Vedrørende definitionen af brutto- og nettokapacitet henvises til afsnit 3.1.1.4.

Tabel 1 Data vedrørende arbejdsstudie

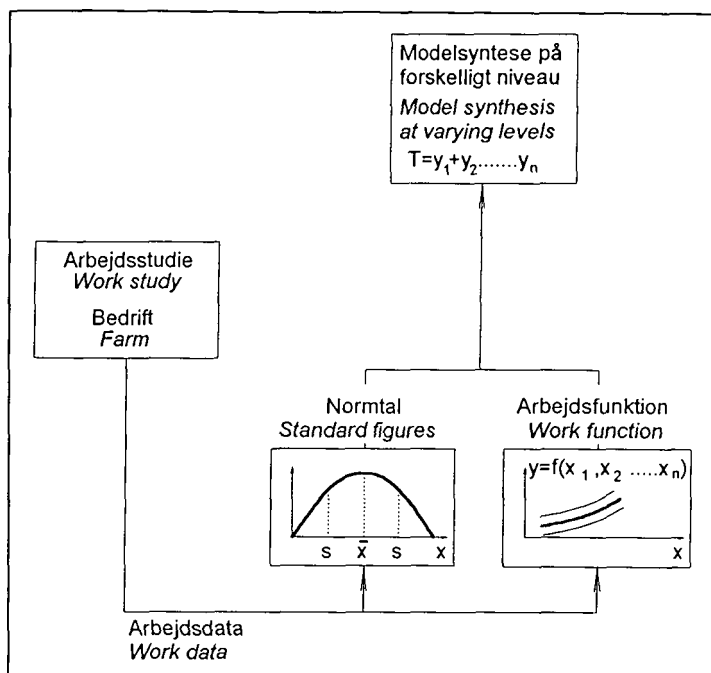
Mejetærskermodel:	Mejetærsker 1	Bruttokap.:	(timer/ha):	0,47
Afgrøde:	Vinterhvede	Bruttokap.:	(ha/time):	2,13
Vandprocent:	14,8	Bruttokap.:	(hkg/time):	196,7
Høstet areal:	6,04 ha			
Udbytte:	92,45 hkg/ha	Nettokap.:	(timer/ha):	0,45
Eff. arbejdsbredde:	5,72 m	Nettokap.:	(ha/time):	2,21
Fremkørselshastighed:	3,87 km/time	Nettokap.:	(hkg/time):	204,5
Stubhøjde:	20 cm			

Koder	Hoved-arbejde 02	Aftømning af korn 03	Tomkørsel i øvrigt 06	Kontrol af maskine 43	Justering af maskine 44
Sum (cmin) ¹⁾	14424	1950	12	0	0
Koder	Klargøring af hovedarb. 45	Afslutning af hovedarb. 46	Afgrødestop 71	Mekanisk stop 73	Instruktion af "fører" 78
Sum (cmin)	0	0	174	0	0
Koder	Vending 180°, rundt 81	Vending 180°, 1 bak 82	Vending 90°, 1 bak 86	Vending 90°, 1 bak 96	Uden for tidsstudiet 790
Sum (cmin)	317	0	0	0	1726

¹⁾ cmin = 1/100 min

De i tabel 1 viste data fra de enkelte studier er udgangspunkt for en detaljeret beregning af

normtal, modelsyntese m.m. Figur 2 viser princippet i denne beregning.



Figur 2 Beregning af normaltal og opstilling af modeller
Calculation of standard figures and formulation of models

3.1.1 Modeller for mejetærskerens præstationssevne

Arbejdet i forbindelse med høst omfatter arbejde i marken (mejetærskning, tømning af tank, omlæsning), transport af høstet materiale til lager samt indlægning på lageret. Hver af disse arbejdsoperationer beskrives ved separate modeller for arbejdsbehov samt arbejds-/maskinkapacitet. I det følgende beskrives de enkelte modeller med

hensyn til struktur og variable samt parametre, identificeret ved indsamlede data. Modelopbygningen følger de retningslinier, som også er skitseret i Nielsen og Sørensen (1993).

3.1.1.1 Høstarbejde i marken

For hovedparten af arbejdsprocesserne i marken, og dermed også høstarbejdet, anvendes følgende model:

$$A = \frac{\left[\frac{h \times 600}{v \times e} + \frac{p \times b \times n}{e \times (1 + a)} + k + s \times h \right] (1 + q)}{h}$$

hvor

A = arbejdsbehov, min pr. ha.

h = markstørrelse, ha.

v = effektiv kørehastighed, km pr. time.

e = effektiv arbejdsbredde, m.

p = tid pr. vending, min pr. gang.

b = markbredde, m.

n = antal vendinger pr. omgang.

a = parameter (afhængigt af markform og køremønster).

k = tidsforbrug ved vendinger i forager, min pr. mark.
s = tidsforbrug ved afgrøde- og jordbundsstop, justeringer, kontrol, pasning m.m., min pr. ha.
q = tidsforbrug ved personlige pauser, normalt 5% tillæg.

Beskrivelse af de variable

Kørehastigheden (**v**) er den gennemsnitlige, effektive kørehastighed med det pågældende redskab for hele marken.

Arbejdsbredden (**e**) er den i forbindelse med tidsstudier registrerede gennemsnitsarbejdsbredde, altså markbredden eller en del deraf, divideret med det tilsvarende antal træk med den pågældende maskine.

Vendinger (**p**) er den ved tidsstudier registrerede gennemsnitlige vendetid pr. gang.

Markbredden (**b**) er den fulde markbredde minus fradrag for eventuelle foragre på langs, som f.eks. ved pløjning, såning, skårlægning m.m. Denne markbredde er nødvendig for at kunne beregne antallet af vendinger.

Antal vendinger pr. omgang (**n**) (normalt er $n = 2$) har betydning for beregning af den samlede vendetid.

Parameteren (**a**) indgår i beregningerne af antal vendinger. Denne parameter er lig med 1, når der køres frem og tilbage, og når der køres rundt på en rektangulær mark.

Vendetiden (**k**) er, i forbindelse med behandling af forageren, uafhængig af markstørrelsen, men afhængig af markform, køremønster og antal vendinger.

Afgrøde- og jordbundsstop, justeringer, kontrol, pasning m.m. (**s**) er forskellige afbrydelser af arbejdet. Disse antages at være arealafhængige.

Tidsforbruget til personlige pauser beskrives ved hjælp af **q** og antages at udgøre en fast procentdel af arbejdsbehovet.

Det første led i ligningen $\left[\frac{h \times 600}{v \times e} \right]$ opgør tidsforbruget ved den del af arbejdsoperationerne, som betegnes som hovedarbejde. Det næste led $\left[\frac{p \times b \times n}{e \times (1+a)} \right]$ opgør tidsforbruget ved vendinger, og de resterende er allerede beskrevet. Det er kun hovedarbejdet, der giver en nettotilvækst i produktivt arbejde.

Beregning af tiden for hovedarbejdet i forbindelse med høstarbejdet vil være baseret på maskinens nettokapacitet (tons pr. time) og udbytte (tons pr. ha). Den begrænsede faktor er maskinens nettokapacitet i tons pr. time.

I ovennævnte tilfælde erstattes første led i ligning (1) med følgende ligning:

$$y = \frac{h \times u \times 60}{d}$$

hvor

y = netto arbejdsbehov, minutter.

h = markstørrelse, ha.

u = udbytte, tons pr. ha.

d = maskinens nettokapacitet, tons pr. time.

Med udgangspunkt i de indsamlede data fra arbejdsstudierne estimeres parametrene p, k og s, ligesom sammenhængen mellem maskinens nettokapacitet og en størrelsesindikator - i dette tilfælde den effektive skærebredde - fastlægges. Som det fremgår af det følgende, er der flere faktorer, der kan være begrænsende for mejetærskerens kapacitet.

Tabel 2 viser værdierne for p, s og k med tilknyttet statistik og fordelt på afgrøder.

Tabel 2 Parameterestimation

Afgørde	p			k			s		
	Gns. ¹⁾	SPR ²⁾	KON ³⁾	Gns. ¹⁾	SPR ²⁾	KON ³⁾	Gns. ¹⁾	SPR ²⁾	KON ³⁾
Vårbyg	0,30	0,15	0,28-0,32	8,12	4,36	3,11-13,13	1,14	0,80	0,68-1,60
Vinterhvede	0,38	0,11	0,37-0,39	4,65	3,77	1,85-7,45	1,62	1,35	0,73-2,31
Vinterrug	0,60	0,31	0,56-0,64	4,15	2,50	1,28-7,02	3,45	2,15	1,30-5,60
Frøgræs	0,41	0,13	0,39-0,43	6,30	3,50	1,80-10,8	3,25	2,10	1,38-5,12
Ærter	0,27	0,15	0,25-0,29	3,29	1,86	1,16-5,43	2,99	1,68	1,81-4,17
Raps, direkte	0,35	0,19	0,31-0,38	5,50	3,15	1,15-7,50	1,81	0,94	0,10-3,53
Raps, skårslagt	0,33	0,09	0,32-0,34	8,68	2,68	0,54-16,82	1,64	1,10	0,66-2,62
Alle afgrøder	0,40	0,13	0,39-0,41	5,81	3,30	4,87-6,74	2,09	1,96	1,61-2,56

p = vendinger, min pr. gang

k = vendinger pr. mark i foragre

s = afgrødestop, pasning, min pr. ha

¹⁾ Gns. = gennemsnit

²⁾ SPR = spredning på enkeltmålinger

³⁾ KON = 95% konfidensinterval for gennemsnit

k og s varierer ikke signifikant fra afgrøde til afgrøde. Begge parametre er udpræget stokastiske af natur og afhænger i høj grad af kørselsmønstre, markform m.m. Parameteren p er mindre varierende og udviser på grundlag af disse studier signifikante forskelle fra afgrøde til afgrøde. Det kræver en nøjere specificering af arealforhold, kørselsmønstre, manøvreringsegenskaber m.m. for helt klart at udpege afgrøderne som årsag til eventuelle forskelle.

Som tidligere nævnt, baseres beregningen af hovedarbejdet på mejetærskerens nettokapacitet (hkg/time) og udbyttet (tons/ha). Nettokapaciteten sættes i relation til skærebordsbredden. Denne fremgangsmåde er hensigtsmæssig, set i lyset af de parametre (skærebordsbredde, udbytte), der anses for realistiske at kunne fremskaffe som forudsætninger i modellen, der benyttes til beregning af arbejdsbehov ved høstarbejdet.

Det skal omtales, at undersøgelser har vist, at halmmængden¹ gennem mejetærskeren under normale forhold er afgørende for maskinens kapacitet (Claesson et al., 1992; Elrick, 1982). Kapacitetsangivelsen beror således på en vurdering af den mængde halm, halmrysterne kan håndtere, før kernespildet bliver for stort. Det bedste enkeltmål for kapaciteten er bredden af tærse- og renseværk, som evt. kan repræsenteres ved cylinderbredden. Det anses dog ikke for muligt i nærværende beregninger at indføre cylinderbredden som størrelsesindikator for halmmængden. Noget sådant ville i stedet for udbytte kræve en karakterisering af halmmængden på den pågældende mark.

I forbindelse med arbejdsstudierne er den effektive arbejdsbredde samt nettokapaciteten målt. Ved hjælp af lineær regression modelleres nettokapaciteten som funktion af den effektive arbejdsbredde.

¹ Ved halmmængde skal her forstås halm, bundgræs, ukrudtsplanter m.m., som trækkes gennem maskinen. I USA tales der således ikke om halm, men om MOG (material other than grain)(ASAE, 1990).

Model: $Y = a + b \times x$

hvor

Y = nettokapacitet, hkg/time.

x = effektiv arbejdsbredde, m.

a, b = parametre.

Inddragelse af yderligere forklarende variable (motorstørrelse, rysteareal, broareal, cylinder-

størrelse m.fl.) forøger ikke på det foreliggende grundlag modellens forklaringsgrad med hensyn til nettokapaciteten, målt i hkg kerne pr. time.

Tabel 3 viser værdien for parametrene a og b i ovennævnte model, afhængigt af afgrøde og bestemt på basis af arbejdsstudierne.

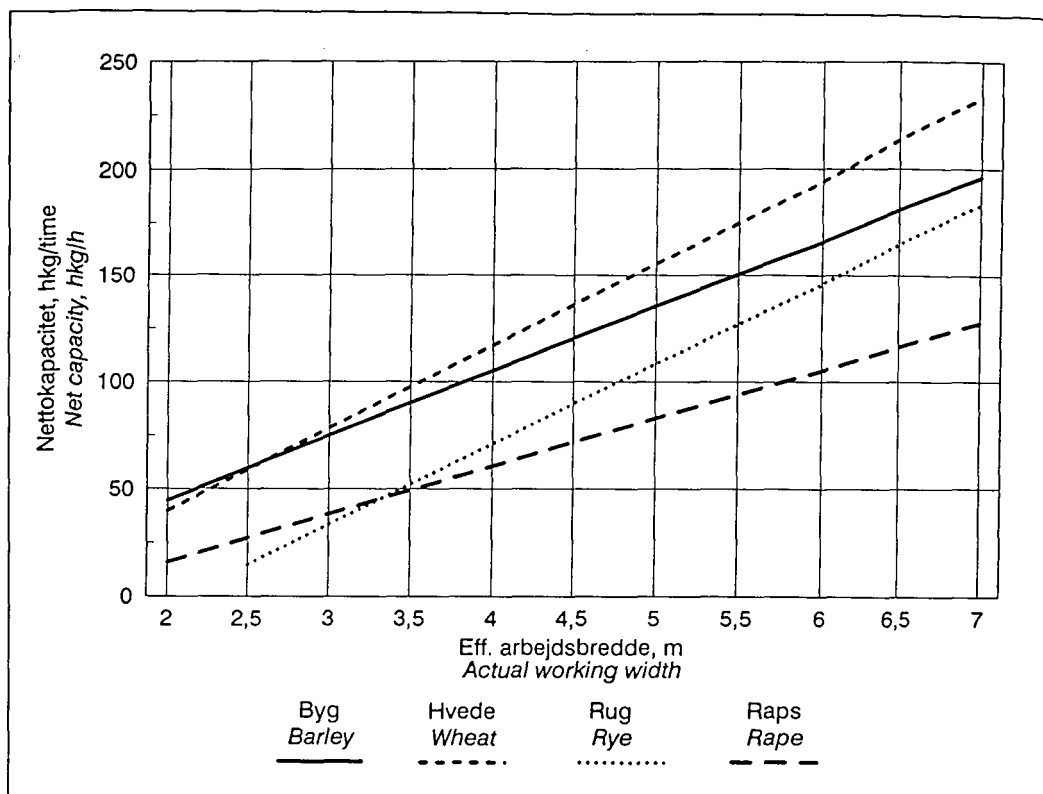
Tabel 3 Parametre i model for nettokapacitet

Afgrøde	b	a	R^2 ¹⁾
Vinter-/vårbyg	30,3	-15,8	0,71
Vinterhvede	38,6	-37,2	0,70
Vinterrug	37,5	-78,9	0,79
Vinter-/vårrops	22,3	-28,6	0,72
Ærter	30,1	-31,9	0,80
Frøgræs	4,4	0,1	0,76
¹⁾ R^2 = størrelsen af variationen i responsvariablen (nettokapaciteten), forklaret ved modellen.			

Figur 3 viser, for udvalgte afgrøder, nettokapaciteten, afbildet som funktion af den effektive arbejdsbredde.

Data for parametrene p , k og s (tabel 2) samt modeller for nettokapaciteten (tabel 3) indgår i den samlede model for arbejdet i marken ved

mejetærskning. Under givne forudsætninger vedr. mejetærskerstørrelse, høstet areal, markform, afgrødetype og udbytte estimeres arbejdsbehovet og maskinkapaciteten. Ud over selve mejetærskningen, omfatter høstarbejdet også tømning af tank på mejetærsker, transport af høstet materiale samt indlægning på evt. lager.



Figur 3 Nettokapacitet, afhængig af effektiv arbejdsbredde
Net capacity, depending on actual working width

3.1.1.2 Transport af høstet materiale til lager

I forbindelse med høst foretages der omlæsning til transportvogn eller tømning af tank i markstak.

I begge tilfælde drejer det sig imidlertid om at tømme tanken på høstmaskinen, og derfor anvendes den samme model, hvilket fremgår af følgende formel:

$$C = \left(\frac{m_m \times u \times 1000}{r} + u \times c \right) (1 + q)$$

hvor

C = arbejdsbehov, min pr. ha.

m_m = køre til og fra + klargøre og afslutte aflæsning, min pr. læs.

u = udbytte, tons pr. ha.

r = netto tanklæsstørrelse, kg pr. tanklæs (funktion af maskinstørrelse).

c = tidsforbrug ved tømning af tank, min pr. ton.

q = tidsforbrug til personlige pauser, normalt 5% tillæg.

I de tilfælde, hvor afgrøden omlæsses til en transportvogn, forekommer der et tilsvarende arbejdsbehov i transportleddet.

I det tilfælde, hvor det høstede materiale er tømt over i en transportvogn, foregår den videre transport over en vis afstand på mark og vej.

Transportafstanden på mark er meget vanskelig at definere, idet kørslen kan gennemføres på mange

forskellige måder, men også på grund af faktorer som læsvægt og udbytte samt vurdering af, om det kan betale sig at vende og køre et lille stykke længere for at fylde vognen helt op, eller det bedre kan betale sig at køre hjem med knap fuldt læs. I vurderingen heraf indgår også transportafstanden på vej.

I modellen beregnes transportafstanden på marken fra markens tyngdepunkt.

Transport på mark

$$B = \left[\frac{t_1 \times u \times 120}{r \times v_2} \right] (1 + q)$$

Transportafstanden t_1 beregnes af modellen for forskellige markformer og indgår i modelberegningerne.

Transportafstanden på vej er afstanden fra lageret til det nærmeste markhjørne, og beregning af transporttiden fremgår af følgende ligning:

Transport på vej

$$T = \left[\frac{t_2 \times u \times 120}{r \times v_3} \right] (1 + q)$$

hvor

- B = arbejdsbehov ved transport på mark, min pr. ha.
- T = arbejdsbehov ved transport på vej, min pr. ha.
- t_1 = transportafstand på mark, m.
- t_2 = transportafstand på vej, m.
- u = udbytte, tons pr. ha.
- r = nettolæsvægt, kg.
- v_2 = transporthastighed på mark, km pr. time.
- v_3 = transporthastighed på vej, km pr. time.
- q = tidsforbrug til personlige pauser, normalt 5% tillæg.

Når transportvognen er ankommet til lageret, fo-

restår aflæsningen, som består af 2 deloperationer, karakteriseret ved en konstant (omfatter til- og frakørsel, klargøring og afslutning) samt en variabel (omfatter selve aflæsningen) pr. læs.

Aflæsning

$$P = \left[\frac{m_m \times u \times 1000}{r} + u \times c_1 \right] (1 + q)$$

hvor

- P = arbejdsbehov ved læsning, min pr. ha.
- m_m = køre til og fra + klargøre og afslutte aflæsning, min pr. læs.
- u = udbytte, tons pr. ha.
- r = nettolæsvægt, kg.
- c_1 = aflæsning, min pr. ton.
- q = tidsforbrug til personlige pauser, normalt 5% tillæg.

Indlægning omfatter indlægning af materiale på lager, efter at det er læsset af umiddelbart foran lageret, eller det læsses direkte fra transportvognen over i transportanlægget.

Arbejdsbehovet ved indlægning fremgår af følgende model:

$$D = \left[\frac{f}{h} + u \times i \right] (1 + q)$$

hvor

- D = arbejdsbehov, min pr. ha.
- f = forberedelse og afslutning, min pr. gang.
- h = areal, ha.
- u = udbytte, tons pr. ha.
- i = indlægning, min pr. ton.
- q = tidsforbrug til personlige pauser, normalt 5% tillæg.

Som det var tilfældet med modellen for selve mejetærskningen, bestemmes de forskellige parametre i ovennævnte modeller med basis i de indsamlede data fra arbejdsstudierne.

Tabel 4 Parameterestimation

Operation	Parameter	Gennemsnitlig værdi	Spredning for enkeltmålinger	Konfidens-interval ¹⁾
Tømning af tank på mejetærsker	m_m	1,62	0,49	1,5-1,7
Omlæsning/transportvogn	m_v	10,35	6,50	7,8-13,0
Aflæsning ved lager	m_a	2,41	0,81	2,2-2,6
m_m = tid, som medgår, når mejetærskeren kører til og fra + klargør og afslutter tømningen, min pr. tømning. m_v = tid, som medgår, når transportenheden kører til og fra + klargør og afslutter omlæsningen, min pr. omlæsning. m_a = tid, som medgår, når transportenheden kører til og fra + klargør og afslutter aflæsningen, min pr. aflæsning. ¹⁾ = 95% konfidensinterval for gennemsnit.				

Vedrørende mejetærskerens tanklæsstørrelse og tømmehastighed angives disse størrelser som en lineær funktion af maskinstørrelse (skærebredde), afhængigt af afgrødetype. Den lineære funktion er af samme type, som angivet tidligere (s. 19), og tabel 5 viser de aktuelle værdier for parametrene a og b.

Tabel 5 Parameterestimation vedr. tanklæs- og tømmekapacitet som funktion af skærebredde

Afgrøde		b	a	R^2 ¹⁾
<u>Korn:</u>	Tanklæsstørrelse	0,91	-1,78	0,75
	Tømmekapacitet	30,61	-27,10	0,71
<u>Raps:</u>	Tanklæsstørrelse	0,90	-1,65	0,65
	Tømmekapacitet	29,51	-26,40	0,72
<u>Frø:</u>	Tanklæsstørrelse	0,42	-0,49	0,59
	Tømmekapacitet	1,37	12,90	0,65
<u>Ærter:</u>	Tanklæsstørrelse	0,85	-1,72	0,70
	Tømmekapacitet	15,68	56,81	0,75

¹⁾ Størrelsen af variationen i responsvariablen (tanklæsstørrelse el. tømmekapacitet), forklaret ved modellen.

Ved behandlingen af dataene har det ikke været muligt at påvise nogen signifikant forskel i tømme- og maskinindsats, hvad enten der er aflæsset holdende eller kørende.

3.1.1.3 Samlet model

De enkelte delmodeller, som med hensyn til struktur og data er beskrevet i de foregående afsnit, samles i en totalmodel for høstsystemet. Denne totalmodel implementeres via et edb-modul, som er en del af et bedriftsorienteret program til analyse af den normative arbejds- og maskinindsats for bedriften (Nielsen og Sørensen, 1993).

Edb-modulet for høstsystemet gør det muligt at beregne arbejds- og maskinindsatsen på baggrund af forudsætninger som høstet areal, maskinstørrelse, afgrødetype, type og størrelse af transportenhed m.m. Der tages ligeledes hensyn til harmoniseringen mellem mejetærsker og transportenhed, og eventuelle disharmonier vil give sig udslag i forekomst af ventetider.

Tabel 6 viser en udskrift fra programmet vedr. en analyse af arbejds- og maskinindsatsen for udvalgte afgrøder og maskintyper.

Tabel 6 Mejetærskning og transport af korn og frø

Markstørrelse:

4,0 ha

Markform (16 mulige):

2

1

2

3

4

5

Transporthastighed:

18 km/h

Transportafstand:

500 m

Læsvægt/transport:

6000 kg

Tømning af kornetank under arbejdet:

ja/nej: Ja

Skårbredde:

4,2 m

Afgrøde	Udbytte	Aktuel skårbredde	Høstning	Læsning	Transport	Aflæsning	Ventetid	Total	Kapacitet
	tons/ha	m	min/ha	min/ha	min/ha	min/ha	min/ha	timer/ha	ha/time
Byg	6,0	3,96	43	15,1	4,8	2,1	21	1,59	1,38
Hvede	7,5	3,96	52	18,8	6,0	2,6	25	1,92	1,14
Rug	5,0	3,96	59	12,6	4,0	1,8	41	2,18	1,01
Raps	3,0	3,96	46	7,5	2,4	1,1	35	1,68	1,31

De med kursiv markerede tal er brugerspecificerede

3.1.1.4 Mejetærskerens effektivitet

I forbindelse med driften af mejetærskeren kan tre typer af kapaciteter angives

- Nettokapacitet.
- Bruttokapacitet.
- Sæsonkapacitet.

Nettokapaciteten er mejetærskerens kapacitet i skåret og afhænger af afgrødens tilstand, mejetærskerens størrelse, tømme- og køreforhold fra tank og køreforhold i marken. I modsætning hertil afhænger bruttokapaciteten også af vendinger,

tømning af tank, maskinens manøvreringsevne samt mejetærskerens fører. Ved valg af tank- og vognstørrelse til hjemtransport af kornet er bruttokapaciteten afgørende. Ved de nævnte driftstekniske undersøgelser er det netto- og bruttokapaciteten, der måles.

Sæsonkapaciteten er afgørende for valg af den rette maskinstørrelse i en købsituation og afhænger af afgrødeareal, afgrødetype, vejrforhold, reparation, pauser, evt. transport af mejetærskeren m.m. Den helt centrale faktor er her

vejrforholdene, som er bestemmende for antallet af høsttimer, og dermed nødvendig sæsonkapaci-

tet, jf. eksempelvis tabel 7. Antal høsttimer beskrives nærmere i afsnit 4 og 5.

Tabel 7 Mejetærskerkapacitet ved et accepteret vandindhold i kernen på 18%

			"Fint vejr" ¹⁾ (200 høsttimer)	"Gns.vejr" ¹⁾ (130 høsttimer)	"Dårligt vejr" ¹⁾ (58 høsttimer)
Skærebords- bredde	Nettokapacitet	Bruttokapacitet	Sæsonkapacitet		
m	ha/time	ha/time	ha/sæson	ha/sæson	ha/sæson
3,5	1,6	1,2	227	172	50
4,1	1,9	1,4	265	200	59
4,7	2,1	1,6	302	229	67

¹⁾ Betegnelserne "Fint vejr", "Gns.vejr" og "Dårligt vejr" refererer til maks., gns. og min. antal høsttimer, defineret ved 30 års vejrdato for Værløse - jf. afsnit 5 og 6. Høstperioden er sat til 20 dage

Det er afgørende, at mejetærskeren, totalt set, opererer så nær nettokapaciteten, som muligt, idet andelen af uproduktivt arbejde herved minimeres. På basis af de målte kapaciteter er effek-

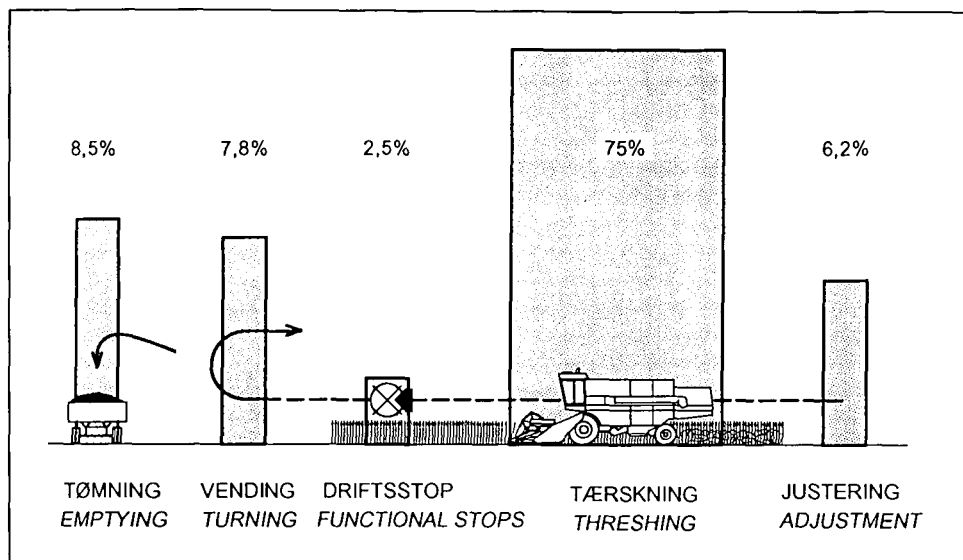
tivitetsfaktoren, udtrykt som forholdet mellem bruttokapaciteten og den teoretiske kapacitet, beregnet. Tabel 8 viser effektivitetsfaktoren for udvalgte afgrøder.

Tabel 8 Effektivitetsfaktor og kapacitet

Afgrøde	ϵ ¹⁾ %	e m	Bruttokapacitet ha/h	Teoretisk kapacitet ²⁾ ha/h
Byg	0,70	2,70-6,00	0,82-2,87	1,12-3,58
Hvede	0,70	4,20-6,00	0,80-2,68	1,18-3,17
Rug	0,73	2,20-6,00	0,57-2,54	0,81-3,91
Raps	0,66	2,70-6,00	0,80-1,90	1,06-3,52
Ærter	0,66	4,20-6,00	1,10-1,98	1,58-3,25
Frøgræs	0,82	3,51-5,80	0,70-1,67	0,82-1,90
ϵ = markeffektivitet (gns.). e = arbejdsbredde (m).				
¹⁾ Effektivitetsfaktoren angives som arbejdsteknisk virkningsgrad, defineret ved forholdet mellem bruttokapacitet og teoretisk kapacitet. ²⁾ Den teoretiske kapacitet beregnes ved kørsel med fuld skærebredde.				

Markeffektiviteten varierer fra 66 til 82%. Figur 4 viser, som et udtryk for gennemsnitlige forhold, den procentvise fordeling af deloperatio-

nerne mejetærskning (effektiv tid), vending, afbrydelser, kontrol/justeringer og tømning af korntank til stationær transportvogn.



Figur 4 Procentvis fordeling af deloperationer ved mejetærskning
 Percentage distribution of part operations in combining

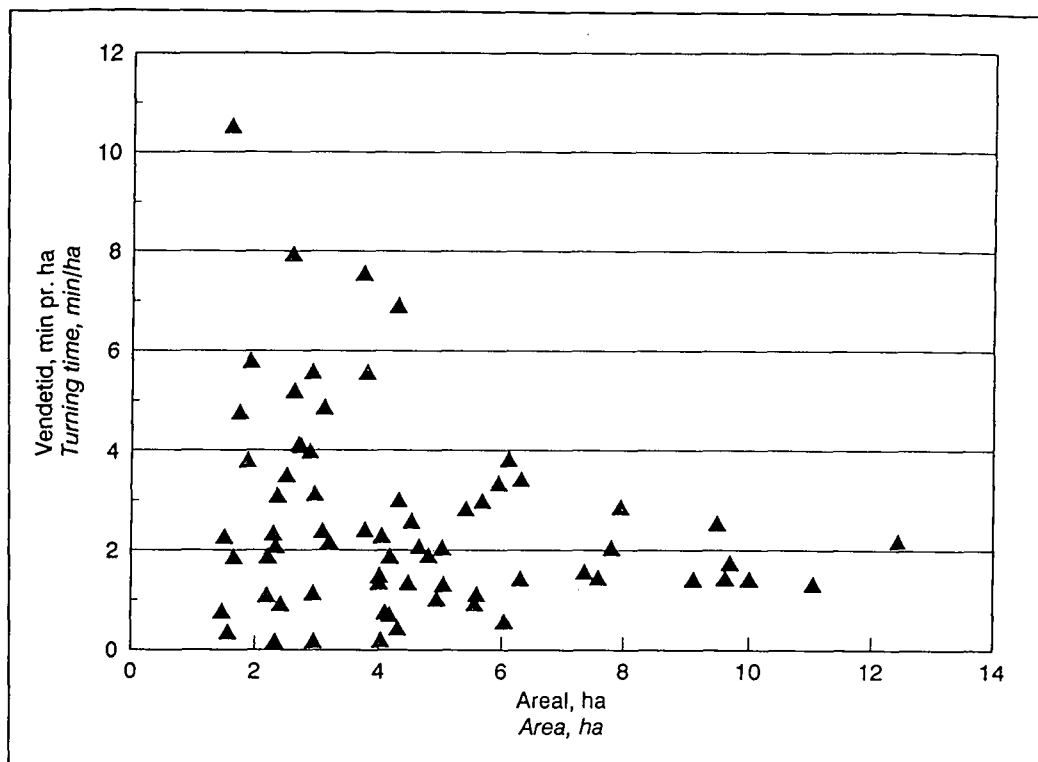
De relative varigheder af tidsindholdet i deloperationerne (skitseret i figur 4), og dermed effektiviteten, er påvirket af en række faktorer af teknisk og biologisk karakter. I det følgende omtales kort de væsentligste af disse faktorer.

Den teoretiske kapacitet, som er bestemt af maskinstørrelsen og fremkørselshastigheden, vil påvirke markeffektiviteten.

En forøgelse af maskinstørrelsen og/eller fremkørselshastigheden betyder, at en større mængde produktivt arbejde kan udføres pr. tidsenhed, således at den uproduktive tid, som er uafhængig af maskinstørrelse og fremkørselshastighed, kommer til at udgøre en relativt større andel af det

totale tidsforbrug. Kun når den teoretiske kapacitet holdes konstant, vil en forbedring af effektivitetsindekset automatisk medføre en øgning af den praktiske kapacitet (bruttokapacitet).

Form og størrelse af marken påvirker vendetiden. Ældre undersøgelser af bl.a. Van Kampen (1969) konkluderer, at denne effekt dog er meget begrænset, såfremt marken er nogenlunde rektangulær, og arealet er større end 4-5 ha. Figur 5 viser vendetiden pr. ha som funktion af arealstørrelsen, fundet ved de driftstekniske undersøgelser i dette projekt. Der iagttages en tendens til øgede vendetider for mindre arealer, dog uden at denne tendens er entydig.



Figur 5 Vendetidens variation som funktion af markstørrelsen
Variation of turning time as a function of field size

Med hensyn til afhængigheden mellem mejetærskerens størrelse og tidsforbruget ved vendinger angiver Elrick (1982), at markens størrelse synes at skulle ned på under 5 ha, før der reelt er tale om nogen afhængighed. Samme tendens bekræftes i en dansk undersøgelse (De landbrugstekniske Undersøgelser, 1971). I nærværende undersøgelse kan der ikke påvises nogen afhængighed, undtagen hvis der er tale om meget små arealstørrelser (1-2 ha).

Operationsmønsteret, dvs. det kørselsmønster, som mejetærskeren foretager på marken, påvirker ligeledes vendetiden. Dette gælder bl.a. inddelingen i mindre arealer og kørsel ved hjørner. Det overordnede mål må hele tiden være fuld skårbredde, men ellers er det svært at belyse disse effekter kvantitativt.

Mejetærskerens manøvreringsegenskaber er en tredje faktor, som betyder noget for vendetiden. Jo hurtigere og mere glidende manøvrerne kan foretages, desto mindre tid bruges der til vending osv. Mejetærskere med hydrostatisk transmission vil alt andet lige bruge mindre tid pr. vending, end tilsvarende mejetærskere med konventionel transmission.

Førerens evner og erfaring som en påvirkende faktor i forbindelse med høstkapacitet og effektivitet er undersøgt af Elrick (1982) og viser, at de hurtigste 10% af mejetærskereførerne er dobbelt så hurtige som de langsomste 10%. Forskellen mellem den dårligste og den bedste fører er helt oppe på 70% i gennemsnit. Endvidere er det konstateret, at disse forskelle ikke kan henføres til dårlige høstbetingelser, såsom variation i af-

grøde, terræn osv., men ene og alene til førerens evne til at føre og justere mejetærskeren.

Afgrødeforhold som lejesæd og/eller bundkrudt nedsætter i høj grad effektiviteten og kan til tider forårsage direkte stop, ved at kniven eller cylindren sættes i stå. Ukrudt i en afgrøde reducerer udbyttet, men problemer for mejetærskeren indtræder længe før, udbytteændringen bliver mærkbar (Elliot, 1981).

Maskinparametre i form af f.eks. maskinstørrelse påvirker, som tidligere nævnt, også relativt den produktive tid. Et specielt aspekt vedrører maskinens kvalitet.

En mejetærsker af slidstærk kvalitet betyder færre reparationer, og dermed mindre spildtid. Det er klart, at der her må være en sammenhæng mellem mejetærskerens alder og risikoen for større reparationer, med forsinkelse af høsten til følge. Nærmere undersøgelser af Bell (1977) har ført til følgende empiriske sammenhæng:

$$H = 0,0093 \times T$$

hvor

H = mistede høsttimer pr. ha.

T = maskinens alder, år.

Herudover er det konstateret, at de store sammenbrud af mejetærskerkomponenter sædvanligvis er af helt tilfældig natur og ikke i særlig grad relateret til maskinens alder. Således anfører

Hunt (1983), at 3500 timers brug af en mejetærsker kun forøger sandsynligheden for sammenbrud med 25%.

Systembegrænsninger vedrører det indbyrdes forhold mellem enhederne i systemet af mejetærsker(e), transportvogn(e) og modtageanlæg/tørringsanlæg. Disse bør så vidt muligt afstemmes efter hinanden kapacitetsmæssigt, således at spildtiden ved kødannelse undgås.

3.1.1.5 Modeksempel

I det følgende illustreres med et eksempel brugen af den udviklede model for høstsystemet. Med baggrund i en konkret afgrødesammensætning, beliggende hos en af de involverede forsøgsværter, opstilles der et arbejdsbudget for mejetærskningen, inkl. hjemtransport af høstet materiale.

Afgrødeplan:

Vinterhvede	113,5 ha
Vinterrug	43,1 ha
Frøgræs	90,5 ha
Ærter	32,0 ha
Vårbyg	46,0 ha

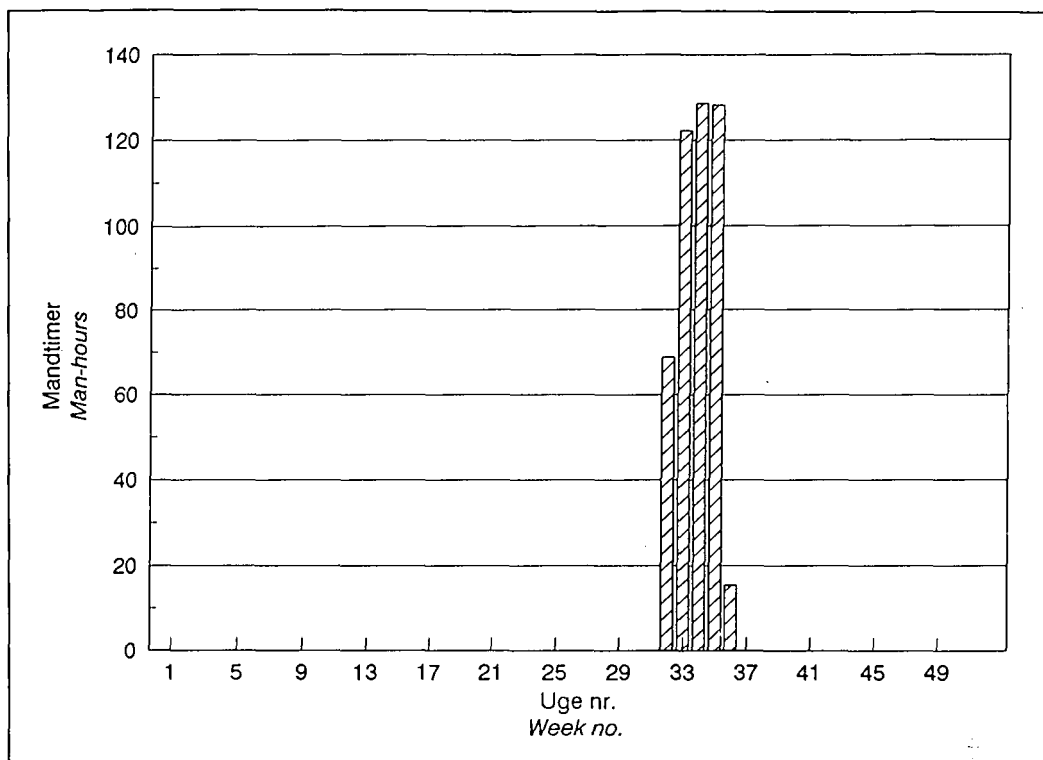
Der høstes med en 20' mejetærsker, og det høstede kernemateriale transporteres til lageret på gården. Med udgangspunkt i forudsætninger omkring maskinstørrelser, markstørrelser og transportafstande m.m. beregnes arbejds- og kapacitetsbehov, jf. tabel 9.

Tabel 9 Arbejdsbudget ved mejetærskning

Metode	Peri- ode	Mark nr.	Antal mand	Timer pr. ha.	Antal beh.	Areal ha	Kap. ha/time
6,0 m skår; mej HVEDE	35	14	2	1,32	1	7,0	1,67
6,0 m skår; mej HVEDE	35	11	2	1,31	1	15,5	1,68
6,0 m skår; mej HVEDE	35	3-1	2	1,25	1	28,0	1,75
6,0 m skår; mej HVEDE	35	2	2	1,23	1	38,0	1,79
6,0 m skår; mej HVEDE	36	1	2	1,26	1	25,0	1,74
6,0 m skår; mej RUG	34	15-3	2	1,64	1	2,3	1,34
6,0 m skår; mej RUG	34	15-2	2	1,59	1	4,3	1,38
6,0 m skår; mej RUG	34	15-1	2	1,68	1	14,5	1,31
6,0 m skår; mej RUG	35	13	2	1,55	1	9,0	1,42
6,0 m skår; mej RUG	35	4	2	1,49	1	16,0	1,47
6,0 m skår; mej RUG	35	3	2	1,48	1	10,0	1,48
6,0 m skår; mej BYG	35	7	2	1,03	1	10,0	2,15
6,0 m skår; mej BYG	35	6	2	1,06	1	16,0	2,08
6,0 m skår; mej BYG	35	6	2	1,05	1	20,0	2,10
6,0 m skår; mej ÆRTER	34	18	2	1,93	1	12,0	2,37
6,0 m skår; mej ÆRTER	34	5-1	2	0,88	1	9,0	2,50
6,0 m skår; mej ÆRTER	34	7-1	2	0,88	1	11,0	2,51
6,0 m skår; mej FRØGRÆS	33	12	1	1,26	1	17,0	0,98
6,0 m skår; mej FRØGRÆS	33	8-1	1	1,26	1	12,0	0,98
6,0 m skår; mej FRØGRÆS	34	7-2	1	1,24	1	4,5	0,99
6,0 m skår; mej FRØGRÆS	34	5	1	1,24	1	5,0	0,99
6,0 m skår; mej FRØGRÆS	33	5	1	1,25	1	10,0	1,00
6,0 m skår; mej FRØGRÆS	32	5	1	1,25	1	15,0	1,00
6,0 m skår; mej FRØGRÆS	32	17	1	1,26	1	14,0	0,98
6,0 m skår; mej FRØGRÆS	32	1-1	1	1,25	1	13,0	0,99

Som tabellen viser, giver arbejdsbudgettet en oversigt over mandskabsbehov, arbejdsbehov og kapacitet m.m. inden for hver periode. Den peri-

odevise, arbejdsmæssige belastning illustreres normalt ved opsætning af en grafisk arbejdsprofil, jf. figur 6.



Figur 6 Arbejdsprofil ved mejetærskning
Work profile for combining

4 Kvantificering af høstperiode

Den strategiske planlægning og dimensionering af den mejetærskerkapacitet, der under specifikke betingelser er nødvendig for at høste forskellige afgrøder, kræver kendskab til antallet af potentielle høsttimer. Som indikator for en afgrødes høstbarhed inden for modenhedsperioden anvendes vandindholdet i afgrøden. Vandindholdet bør normalt holdes under en vis grænse for sikker efterfølgende opbevaring, og disse grænser fungerer som begrænsninger på maskinoperationernes tidsmæssige udførelse.

4.1 MODEL FOR AFGRØDENS VANDINDHOLD

Med udgangspunkt i en gennemgang og modifikation af tidligere fremsatte modelantagelser, både empiriske (Van Kampen, 1969; Crampin og Dalton, 1971; Smith et al., 1991) og fysisk-biologiske modeller (Heger, 1973; Van Elderen og Van Hoven, 1973), er der opstillet en model for vandindholdet i ikke-høstede afgrøder som funktion af lufttemperatur, luftfugtighed, vindhastighed og nedbør. De fysiske parametre i den om-

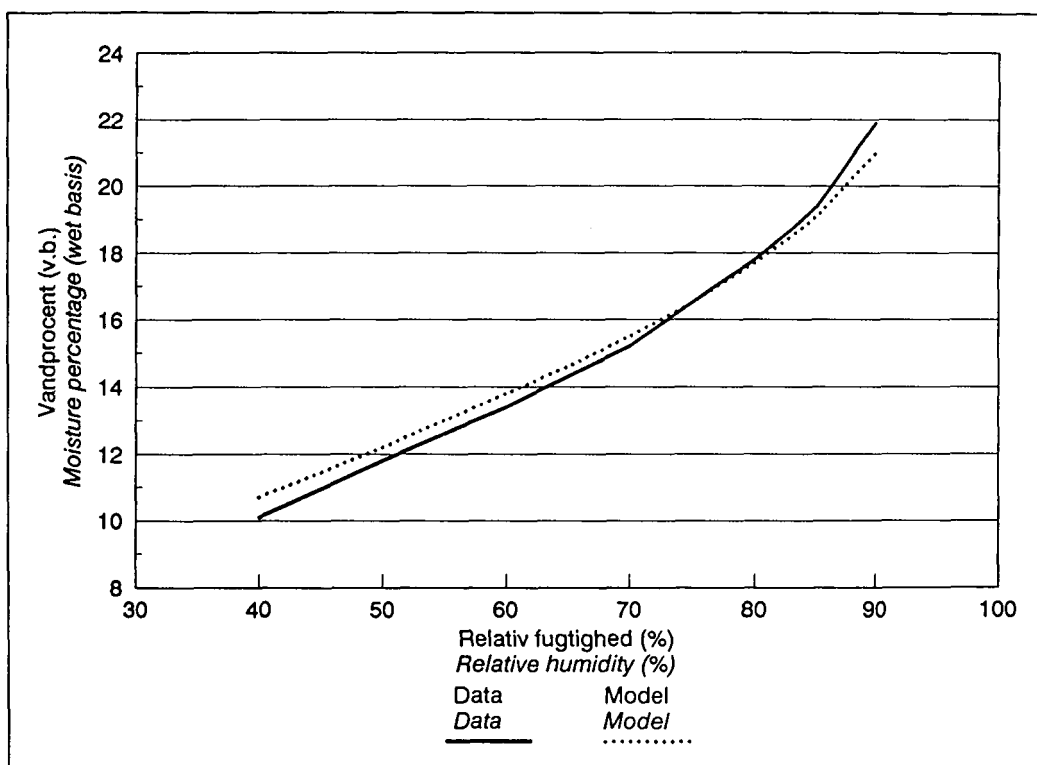
givende luft samt den biologiske reaktion i afgrøden vil begge influere på det aktuelle vandindhold.

4.1.1 Fysiske parametre

Afgivelsen af vand fra f.eks. kornkernen bestemmes i det væsentligste af absorptionskapaciteten i den omgivende luft. Absorptionskapaciteten (evnen til at indeholde en bestemt mængde fugtighed) afhænger af lufttemperatur og relativ luftfugtighed.

En vigtig egenskab ved kornkernen er dennes hy-

groroskopiske karakteristika, dvs. evnen til at optage eller afgive vand efter fugtighedsforholdene i den omgivende luft. Til enhver relativ fugtighed (og temperatur) i den omgivende luft svarer et givet vandindhold i den modne kerne, benævnt ligevægtsvandindholdet. Sammenhængen mellem vandindholdet i et bestemt materiale og materialets relative fugtighed ved ligevægt ved en bestemt lufttemperatur kan udtrykkes ved hjælp af en ligevægtskurve. Ligevægtskurven for forskellige lufttemperaturer opstilles på basis af målte værdier for vandprocent og relativ fugtighed, jf. figur 7.



Figur 7 Ligevægtskurve for byg ved en lufttemperatur på 15°C
Equilibrium curve for barley at an air temperature of 15°C

Ligevægtsvandindholdet kan repræsenteres ved forskellige typer empiriske modeller (Halsey, 1948; Henderson, 1952; Chung & Pfost, 1967; Pieton et al., 1977; Chia-Chung & Morey, 1989)

for vandindholdet som funktion af relativ fugtighed og temperatur. Med basis i aktuelle værdier for vandindhold og relativ fugtighed er de bedste modeltyper i forhold til afgrøder identificeret,

og de tilhørende parametre er bestemt ved ikke-lineær regression. Figur 7 viser grafisk modellen

for byg, mens alle valgte modeltyper og bestemte parametre er opstillet i tabel 10.

Tabel 10 Modeller for ligevægtsvandindhold

Afgrøder	Model	Parametre		
		A	B	C
Byg	$RH_c = \exp \left[-\frac{A}{T + C} \times \exp (-BM_c) \right]$	475,12	0,14843	71,996
Hvede	$RH_c = 1 - \exp (-A(T + C) \times M_c^B)$	0,00001	2,54556	64,346
Rug	$RH_c = \exp \left[-\frac{A}{T + c} \times \exp (-BM_c) \right]$	475,12	0,15184	71,996
Raps	$RH_c = \exp (-\exp (A + B \times T) \times m_c^{-C})$	3,00260	0,0049	1,76070
Ærter	$RH_c = 1 - \exp (-A (t + C) \times M_c^B)$	0,00003	2,18623	99,267
Græsfrø	$RH_c = \exp (-\exp (A + B \times T) \times M_c^{-C})$	4,43080	0,01553	1,96201
RH_c = relativ fugtighed ved ligevægt, %. T = lufttemperatur, °C. M_c = vandindhold, % våd basis). A,B,C = empirisk bestemte parametre.				

4.1.2 Biologiske parametre

En vurdering af de biologiske forhold omkring kornkernens nedtørring hhv. opfugtning kræver specificering af modenhedsgraden. Normalt opereres der med 4 modenhedsgrader, nemlig grønmodenhed, gulmodenhed, fuldmodenhed og overmodenhed.

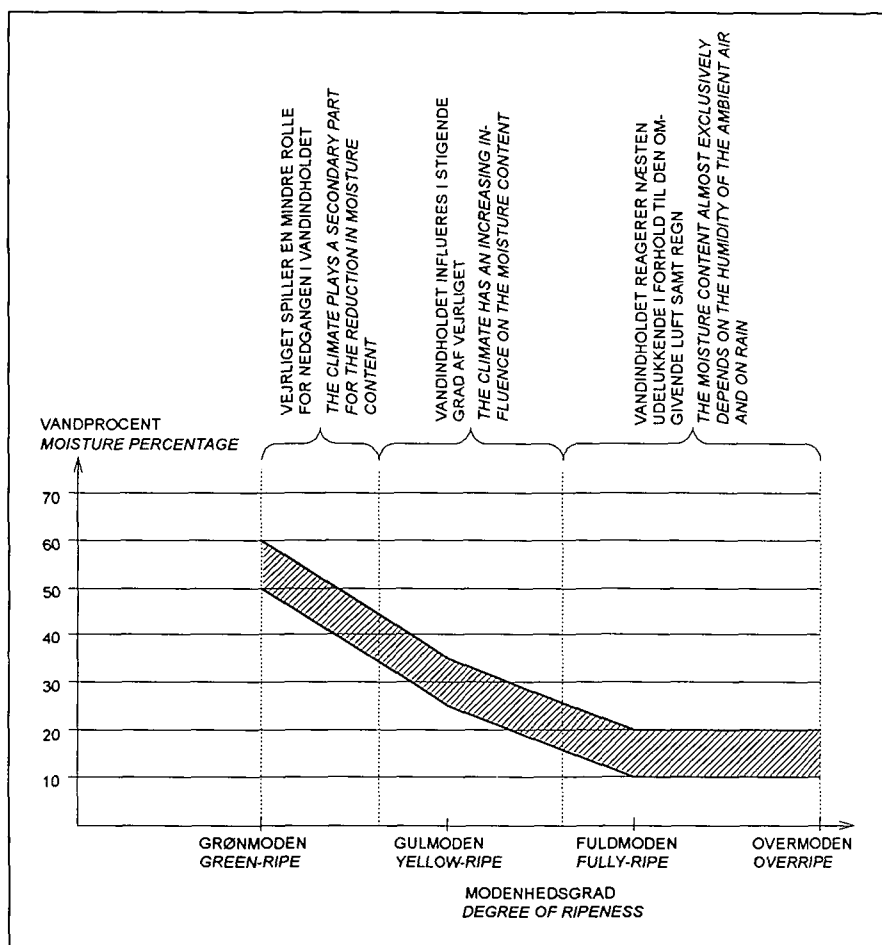
Ved grønmodenhed begynder blade og stængler at gulfes, og endospermen bliver tyktflydende og mælkevid. Vandindholdet er da normalt 50-60%.

Ved gulmodenhed er indlejringen af næringsstoffer standset, væksten er ophørt, og vandindholdet ligger på 35-25%.

Fuldmodenhed indtræffer normalt 8-10 dage senere, og ved overgangen hertil nedsættes vandindholdet i kernen samt kernens rumvægt. Vandindholdet svinger mellem 10 og 20%.

Overmodenhedsstadiet indtræder, når kernerne får lov at sidde efter fuldmodenhed. Risikoen for spild og spiring i akset stiger stærkt.

Figur 8 viser skematisk modningsforløbet ved forskellige stadier (Gesslin, 1959; Heger, 1973). gennemsnitlige og typiske vandprocenter for de



Figur 8 Modningsforløb
Ripening progress

Figuren viser specielt det tidsrum omkring fuldmodenhed, hvor vandindholdet i kernen styres af forholdene i den omgivende luft. I dette tidsrum anvendes modellerne for ligevægtsvandindhold - jf. tabel 10.

4.1.3 Matematisk beskrivelse

Som det er vist i det foregående, svarer der til hver vandprocent $M(t)$ til tiden t en ligevægtsre-

lativ fugtighed RH_e , som kan kvantificeres ved de opstillede modeller i tabel 8. Ligevægtsdampptryk- ket E_e beregnes på følgende måde:

$$E_e = RH_e \times E_m, \text{ hvor } E_m = \text{mættet dampptryk.}$$

Det aktuelle dampptryk E beregnes som en funk- tion af temperatur og relativ fugtighed. Forskellen mellem E_e og det aktuelle dampptryk E benævnes

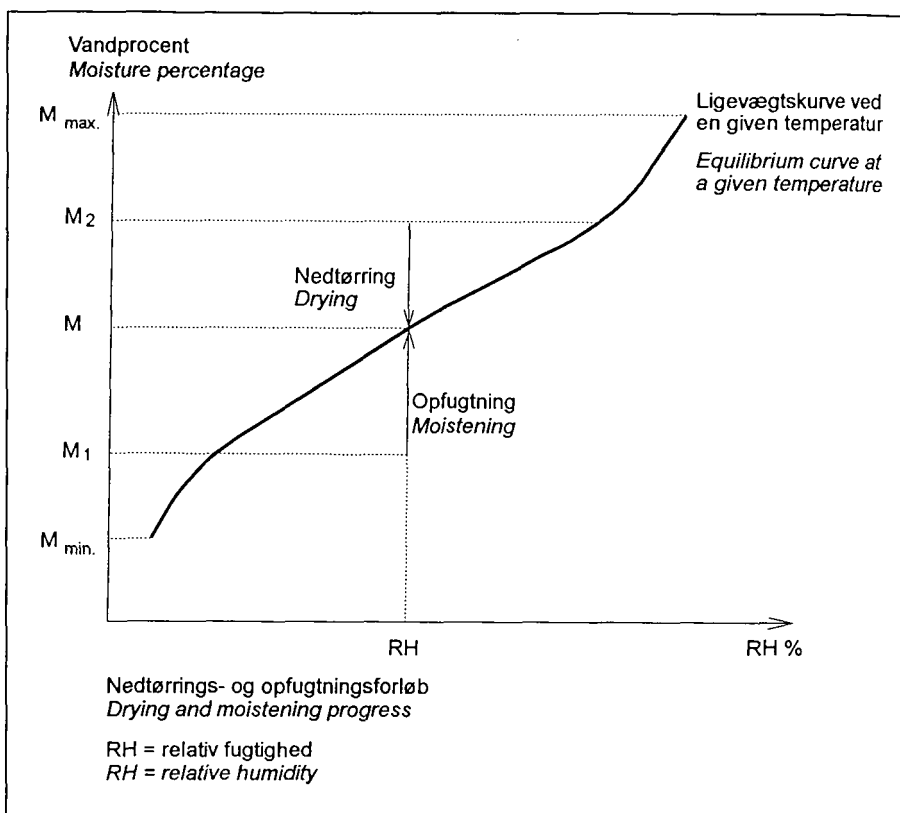
mætningsdeficit ΔE : $\Delta E = E_c - E$. Øvre og nedre grænse for kernens vandindhold benævnes henholdsvis $M_{\max}$ og $M_{\min}$.

Når en kerne er omgivet af luft, som ikke er i fugtighedsbalance med kernens overflade, vil der ske en transport af fugtighed til eller fra luften. Denne omsætning af fugtighed følger den velkendte regel, at udligningshastigheden til enhver tid er proportional med uligevægtens størrelse (dvs. mætningsdeficit). Med udgangspunkt i Heger (1973), opstilles følgende antagelse for en model til kvantificering af vandindholdets variation i modningsperioden

- at der er en proportionalitet mellem fugtighedsafgivelsen/-optagelsen fra/til kernen og differensen mellem det øjeblikkelige vandindhold og den laveste/højeste grænse for vandindhold i kernen.
- at fugtighedsafgivelsen er proportional med kvadratroden af vindhastigheden.

- at der er proportionalitet mellem den temporale ændring af vandindholdet i kernen og mætningsdeficit (negativt eller positivt).
- at opfugtningen af kernerne er proportional med mængden og varigheden af regn samt varigheden af dugfald.
- at de individuelle dele af afgrødeplanten er uafhængige.
- at alle dele af planten - kerne, øvre og nedre del af strået - er genstand for de samme fysiske processer vedr. vandindholdets variation med vejrforholdene, men med hver sine parametre.

I figur 9 vises som princip en ligevægtskurve med tilknyttet opfugtnings- og nedtørningsforhold. Figuren viser, i overensstemmelse med ovennævnte antagelser, vandprocentens variation, afhængigt af afstand til højeste/laveste vandprocent ($M_{\max}$, $M_{\min}$) samt mætningsdeficit ΔE (negativt eller positivt).



Figur 9 Opfugtnings- og nedtøringsforløb
Moistening and drying progress

En model for ændringer i kernens vandindhold pr. tidsenhed under forskellige vejrmæssige forhold formuleres med baggrund i ovennævnte antagelser. Modellen består af 4 alternative differentialligninger, der er gældende på skift, afhængigt af de aktuelle vejrmæssige forhold. Af

følgende tabel fremgår disse differentialligninger samt de betingelser, hvorunder de gælder. I tabellen er desuden angivet løsninger til differentialligningerne, dvs. formler til beregning af vandindholdet til tidspunkt t , givet vandindholdet på et tidligere tidspunkt $t-d$.

Tabel 11 Modelligninger

	DIFFERENTIALLIGNING	BETINGELSER	LØSNING
1)	$\frac{dM(t)}{dt} = c_1(M - M_{\min}) \sqrt{v} \Delta E$	$p \leq 0 \wedge D \leq 0 \wedge \Delta E > 0$	$M(t) = ((M(t)-d) - M_{\min}) \exp(c_1 \sqrt{v} \Delta E d) + M_{\min}$
2)	$\frac{dM(t)}{dt} = c_2(M - M_{\max}) \Delta E$	$p \leq 0 \wedge D \leq 0 \wedge \Delta E < 0$	$M(t) = ((M(t)-d) - M_{\max}) \exp(c_2 \Delta E d) + M_{\max}$
3)	$\frac{dM(t)}{dt} = c_3(M - M_{\max}) \sqrt{pd}$	$p > 0$	$M(t) = ((M(t)-d) - M_{\max}) \exp(c_3 \sqrt{pd^2}) + M_{\max}$
4)	$\frac{dM(t)}{dt} = c_4(M - M_{\max}) d$	$p \leq 0 \wedge D > 0$	$M(t) = ((M(t)-d) - M_{\max}) \exp(c_4 d^2) + M_{\max}$

hvor

$M(t)$ = vandindhold til tiden t .
 $M_{\min}$ = nedre grænse for vandindhold.
 $M_{\max}$ = øvre grænse for vandindhold.
 ΔE = mætningsdeficit, Pa.
 v = vindhastighed, m/s.

p = nedbørsmængde, mm/time.
 D = dugmængde, ubenævnt.
 d = varighed af regnperiode/dugperiode ($d=1$).
 c_1, c_2, c_3, c_4 = afgrødespecifikke parametre.

Algoritmerne i tabel 11 indeholder alle parametre, som er specifikke for forskellige afgrøder. Det er opgaven gennem en modelidentifikation at specificere disse parametre.

4.2 MODELIDENTIFIKATION

Værdien af parametrene c_1 , c_2 , c_3 , og c_4 for en given afgrøde estimeres på basis af sammenhørende målinger af vandindholdet i den stående afgrøde og de meteorologiske variable: temperatur, relativ fugtighed, vindhastighed, dugmængde og nedbør.

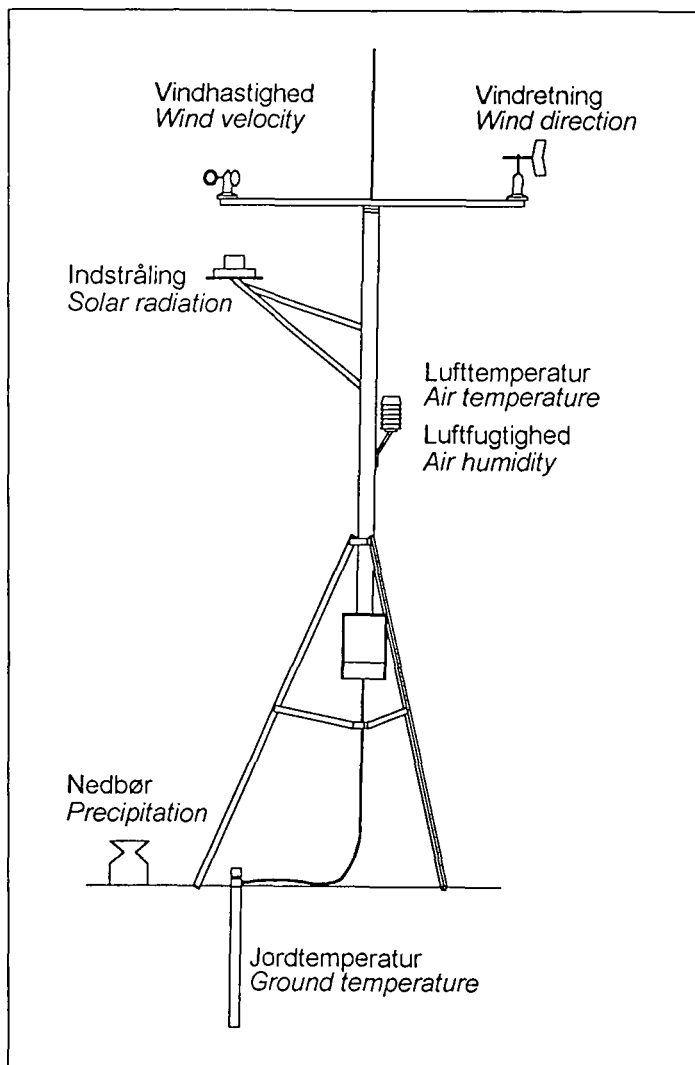
4.2.1 Måling af afgrødens vandindhold

Vandindholdet er målt i modne, ikke-høstede afgrøder med et samplingsinterval på 2 timer i dagtimerne. Erfaringer fra prøveudtagning i forbindelse med sortsafprøvning er anvendt som udgangspunkt til sikring af repræsentative bestemmelse af vandindholdet i marken. Vandbestemmelse er foretaget på aftærskede kerner. I den forbindelse er der til dette projekt anskaffet

en speciel "akstærsker" (Wintersteiger, 1990), som muliggør tærskning af de indsamlede aksebundter. En detaljeret redegørelse vedr. måling af afgrødernes vandindhold er foretaget af Sørensens (1990).

4.2.2 Måling af meteorologiske variable

Parallelt til vandbestemmelsen er de meteorologiske input variable til modellen målt i umiddelbar nærhed af den aktuelle mark. Tidligere undersøgelser har alle opereret med data fra officielle meteorologiske målestationer, placeret i en vis afstand fra afgrødelokaliteten. Dette har givet anledning til uoverensstemmelser mellem det aktuelle klima ved afgrøden og ved målestationen. Undersøgelserne her benytter sig derfor af vejrdato fra en mobil vejrstation, opstillet i umiddelbar nærhed af afgrødelokaliteten. Figur 10 viser skematisk måleudstyret, tilknyttet vejrstationen. De relevante variable for projektet er temperatur, luftfugtighed, vindhastighed og nedbør.



Figur 10 Mobil vejrstation
Mobile weather station

A Campbell Scientific CR10 datalogger kontrollerer og opsamler de målte værdier. Disse måleværdier overføres senere til en pc for videre behandling.

I sidste del af projektet blev der anvendt en ny type vejrstation, et såkaldt klimaspyd, udviklet af Hardy International. Vejrdataene opsamles her med intervaller på 10 min og overføres trådløst til en stationær computer.

Sørensen (1990) har udførligt redegjort for måling af meteorologiske variable, bearbejdning af meteorologiske data m.m.

4.2.3 Estimation af modelparametre

På basis af målingerne af de meteorologiske variable samt givne værdier af parametrene c_1 , c_2 , c_3 og c_4 i den opstillede model kan der gennemføres en modelsimulation af vandindholdets variation. For en given afgrøde estimeres para-

metrene ved at tilpasse deres værdier, så der opnås bedst mulig overensstemmelse mellem forløbet af det simulerede vandindhold og forløbet af det målte vandindhold i afgrøden. Graden af overensstemmelse mellem simulerede og målte værdier vurderes ved at beregne RMS-værdien for den relative afvigelse mellem målte og simulerede værdier (RMS står for Root Mean Square og betyder kvadratroden af de gennemsnitlige kvadrater på afvigelserne):

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N \left(\frac{\epsilon_n}{VPCT} \right)^2}{n}}$$

hvor

- ϵ_n = residualværdi for observation nr. n.
 VPCT = simuleret vandprocent, svarende til observation nr. n.
 N = antal observationer.

Ved hjælp af et edb-program minimeres RMS som funktion af modellens parametre.

Resultatet af model estimationen for de forskellige afgrøder er vist i tabel 12. Parametrene c_1 , c_2 , c_3 og c_4 , karakteriserende henholdsvis tørring, opfugtning i tørt vejr, opfugtning i regnvejr og opfugtning i dugperioder, er listet sammen med RMS-værdierne.

Tabel 12 Modelparametre

	c_1	c_2	c_3	c_4	$M_{\max}$	$M_{\min}$	RMS_{est}	RMS(91)	RMS(93)
Byg	0,006	0,02	0,15	0,01	35	11	0,079	0,085	0,091
Hvede	0,005	0,04	0,15	0,01	35	11	0,044	0,065	
Rug	0,006	0,02	0,1	0,01	35	11	0,036	0,060	0,075
Raps	0,008	0,001	0,08	0,001	40	4	0,063		0,054
Ærter	0,005	0,01	0,03	0,01	34	11	0,032	0,057	
Frøgræs	0,0015	0,01	0,05	0,001	70	11	0,078		0,055

$M_{\max}$ = højeste grænseværdi for vandindhold.
 $M_{\min}$ = laveste grænseværdi for vandindhold.
 RMS = gennemsnitlig relativ afvigelse.
 RMS_{est} = relativ afvigelse mellem målte data og model for året 1992, hvor parametrene C_1 , C_2 , C_3 og C_4 er estimeret.
 RMS(91); RMS(93) = relativ afvigelse mellem målte data og model, når modellen valideres på data for årene 1991 eller 1993.

Parametrene c_1 , c_2 , c_3 og c_4 karakteriserer for forskellige afgrøder forskelle i afgrødernes reaktionshastighed ved henholdsvis tørring og opfugtning.

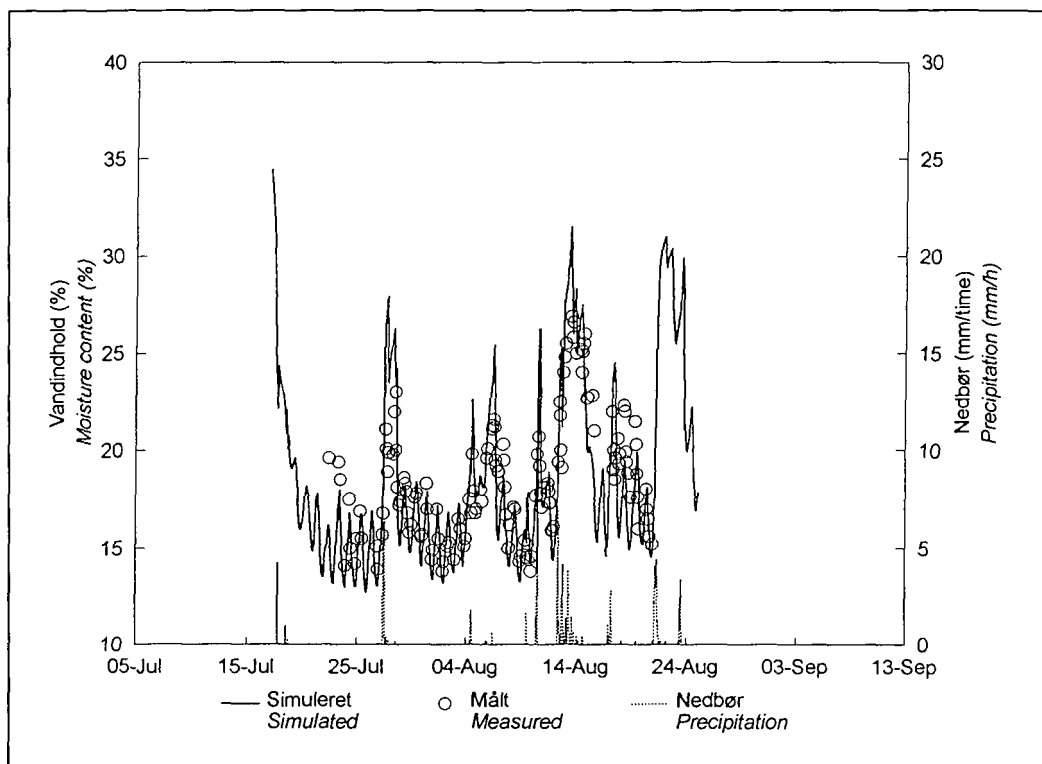
RMS-værdierne vedrører, som tidligere berørt, en kvantificering af den relative afvigelse mellem model og målte data. RMS_{est} angiver den minimerede relative afvigelse for det års data, som er benyttet til parameterestimationen. Modellen er

anvendt og valideret på data fra andre år (1991 og/eller 1993), og RMS-værdierne for disse kørsler af modellen udtrykker den forventelige afvigelse, når modellen anvendes på historiske vejrdata til prædiktion af vandindholdets variation. Der ses at være en rimelig overensstemmelse mellem RMS ved estimation og validering, og størrelsen af RMS vurderes til at være inden for det tilladelige ved anvendelsen af modellen til det foreliggende formål.

4.3 SIMULERING AF AFGRØDENS VAND- INDHOLD

På grundlag af den udviklede model med tilknyttede afgrødespecifikke parametre samt meteoro-

logiske input kan vandindholdet simuleres for forskellige afgrøder. Til illustration af modellen vises i figur 11 det simulerede vandindhold for vinterrug.



Figur 11 Simulerede og målte værdier for vandindholdets variation i vinterrug (1992)
Simulated and measured values of variation in moisture content of winter rye (1992)

Formålet er at anvende modellerne (jf. s. 35 og 38) til simulering af anvendelig høsttid, dvs. antallet af høsttimer under forskellige betingelser.

Udgangspunktet er her brugen af historiske vejrdata som input til modellen.

5 Potentiel Høsttid

De udviklede modeller for de forskellige afgrøder er anvendt ved estimation af den aktuelle høstbarhed, dvs. antallet af potentielle høsttimer under visse grænser for vandindhold i afgrøden. Ved at anvende modellerne i forbindelse med historiske vejrdata over en årrække (30 år) gives der mulighed for at opstille en sandsynlighedsfordeling for antallet af høsttimer.

5.1 HISTORISKE VEJRDATA

Der er indhentet historiske vejrdata (i perioden 1962-1991) fra Jordbrugsmeteorologisk Afdeling, Foulum, for to lokaliteter, nemlig Karup og Værløse, repræsenterende henholdsvis den østlige og den vestlige del af Danmark. Den på side 35 beskrevne model kræver som input timeværdier af temperatur, luftfugtighed, vindhastighed, nedbør og forekomst af dug. Disse datakrav opfyldes kun til dels af de indhentede vejrdata fra synop-stationer, idet registreringer for temperatur, luftfugtighed og vindhastighed kun er foretaget hver 3. time og for nedbør kun hver 12. time. Vejrliget er repræsenteret ved koder for vejret før/nu (WMO, 1974).

Manglende værdier fra temperatur, luftfugtighed og vindhastighed er estimeret ved interpolation. På baggrund af koder for vejrlig bestemmes vejrtypen (tørt vejr, regn og tåge), og den registrerede nedbør fordeles på regnperioderne. Der tages i modellen ikke direkte hensyn til dug. Det skal nævnes, at der er udviklet modeller for generering af daglige variationer for temperaturer og luftfugtigheder på grundlag af sparsomme registreringer fra vejrstationer (Kimball & Bellamy, 1986). Disse modeller er dog til en vis grad afhængige af empiriske parametre for den aktuelle lokalitet, hvorfor modellerne ikke anvendes her.

Som nævnt, er der indhentet meteorologiske data

for en 30-års periode (1962-1991) for to lokaliteter, hvor disse data har været tilgængelige. For hvert år dækker dataene perioden 1. juni til 30. september. Modellsimuleringerne af vandprocenten startes hvert år først i juni måned, hvorved det undgås, at initialbetingelserne for modellen påvirker modelresultaterne i høstperioden (juli-september). Initialbetingelserne vedrører i dette tilfælde begyndelsesvandprocenten, hvorved den dynamiske model startes. Denne vandprocent udvælges manuelt.

For at kunne inddrage modningstidspunkternes årlige forskydning i beregningerne er der fremskaffet data vedr. modningstidspunkter for de nævnte afgrøder for årene 1961-1991 (Pedersen, 1994; Boesen, 1994; Statens Forsøgsvirksomhed i Plantekultur, 1961-1976/77; Statens Planteavlsvirksomhed, Meddelelser 1977-1983; Statens Planteavlsvirksomhed, Grøn Viden, 1983-1991). Den tidsmæssige afgrænsning af høstperioderne er defineret empirisk som det tidsrum omkring optimalt høsttidspunkt, hvor afgrøden kan bjærges med sammenlagt under 10% nedgang i udbyttet (Markmekanisering, 1984). Med baggrund i undersøgelserne vedr. rettidseffekt (Nilsson, 1972; Olsen og Hansen, 1977; Hunt, 1983), hvor afgrødeforringelsen ligger på 0,01-0,04% pr. time, defineres høstperioden gennemsnitligt som strækkende sig fra den registrerede modningsdato og 10 dage frem.

5.2 SIMULERING AF ANTAL HØSTTIMER/ UDNYTTESFAKTOR

Vandindholdet i den ikke-høstede afgrøde i modningsperioden er simuleret med de 30 års meteorologiske input i form af temperatur, relativ fugtighed samt nedbør. For hver afgrøde er der anvendt de afgrødespecifikke modeller, der er beskrevet tidligere.

På grundlag af det beregnede vandindholds variation i perioden juli-september i de enkelte år summeres det antal timer i arbejdstiden (antages at være fra 10⁰⁰ til 22⁰⁰ i høstperioden), hvor vandindholdet har været under visse øvre grænser (her 14, 18 og 22%). Dernæst er udnyttelsesfaktoren beregnet som mejetærskerens potentielle

operationstid i procent af totaltiden.

Ved at gennemføre ovennævnte beregninger findes det, at udnyttelsesfaktoren for de enkelte afgrøder er meget svingende fra år til år. I tabel 13 og 14 er den gennemsnitlige udnyttelsesfaktor for specifikke afgrøder vist.

Tabel 13 Beregnet gennemsnitlig relation mellem øvre grænse for vandindhold og udnyttelsesfaktor.

Udnyttelsesfaktor = potentiel operationstid i procent af totaltiden (24 timer pr. døgn).

Variationsbredden (min.-maks.) er anført i parentes.

Baseret på meteorologiske data for Karup

Vandindhold	14%	18%	22%
Vårbyg	3,5 (0-17)	20,7 (6-40)	32,2 (14-44)
Vinterbyg	4,1 (0-21)	22,9 (2-39)	35,9 (10-48)
Vinterhvede	2,8 (0-16)	21,1 (6-39)	32,6 (14-43)
Vinterrug	5,6 (0-22)	28,6 (6-48)	38,3 (9-48)
Vårraps	12,2 (0-33)	28,4 (16-40)	35,3 (20-40)
Vinterraps	13,4 (0-34)	28,0 (7-41)	37,4 (17-45)
Bælgsæd	1,8 (0-18)	24,0 (4-41)	35,9 (18-43)
Frøgræs	0,0	4,2 (0-17)	16,2 (0-46)

Tabel 14 Beregnet gennemsnitlig relation mellem øvre grænse for vandindhold og udnyttelsesfaktor.

Variationsbredden (min.-maks.) er anført i parentes.

Baseret på meteorologiske data for Værløse

Vandindhold	14%	18%	22%
Vårbyg	5,8 (0-20)	26,6 (12-46)	37,4 (21-49)
Vinterbyg	7,2 (0-30)	30,4 (6-45)	42,3 (28-49)
Vinterhvede	4,8 (0-26)	27,2 (12-46)	40,5 (27-48)
Vinterrug	7,9 (0-28)	33,8 (12-47)	42,5 (28-49)
Vårrops	14,0 (0-38)	34,2 (17-47)	41,9 (24-48)
Vinterraps	18,9 (0-43)	35,9 (16-47)	42,7 (29-48)
Bælgsæd	2,1 (0-10)	28,9 (4-48)	42,2 (21-50)
Frøgræs	0,0	5,3 (0-21)	18,6 (0-46)

Den beregnede udnyttelsesfaktor i de to tabeller viser tydeligt denne faktors store afhængighed af kravet til vandindholdets størrelse. Endvidere ses udnyttelsesfaktoren at være af samme størrelsesorden for kornafgrøderne, mens raps, bælgsæd og frøgræs skiller sig ud. Det er her vigtigt at påpege, at udnyttelsesfaktorens variation afgrøderne imellem dels skyldes en forskellighed i den biologiske reaktion over for meteorologiske faktorer, dels forskelle i modenhedsperiodens tidsmæssige placering.

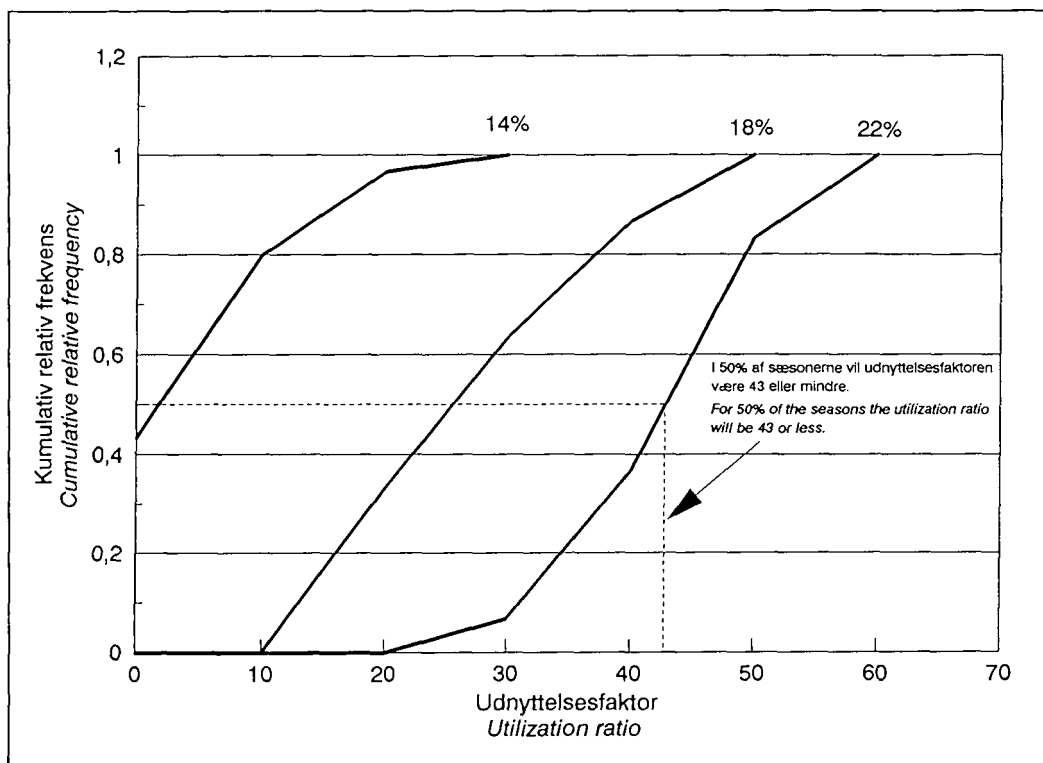
En oversigt over de enkelte års udnyttelsesfaktorer hen over den 30-årige periode er vist i Appendiks A.

På grundlag af tabelværdierne iagttages f.eks.

- at udnyttelsesfaktoren er 15-25% højere for vinterbyg end for vårbyg, hvilket skyldes den tidligere modenhedsperiode for vinterbyggen.
- at udnyttelsesfaktoren for lave vandprocenter er markant højere for raps- end for kornafgrøderne. Det skal her bemærkes, at der med henblik på sikker opbevaring er forskellige krav til afgrødernes vandindhold.
- at udnyttelsesfaktoren for lave vandprocenter er markant lavere for bælgsæd og frøgræs end for raps og korn.

Et væsentligt forhold er endvidere, at udnyttelsesfaktoren for Østdanmark (Karup) ligger 15-40% lavere end for Vestdanmark (Værløse). Dette skyldes helt klart en signifikant forskel i vejrforholdene. På grundlag af resultaterne fra simuleringen af udnyttelsesfaktoren kan der op-

stilles sandsynligheder for en udnyttelsesgrad i relation til krav vedr. vandindhold, lokalitet og afgrøde. Til illustration heraf er eksempelvis den kumulative, relative frekvens for udnyttelsesgraden i forbindelse med høst af vinterhvede beregnet.

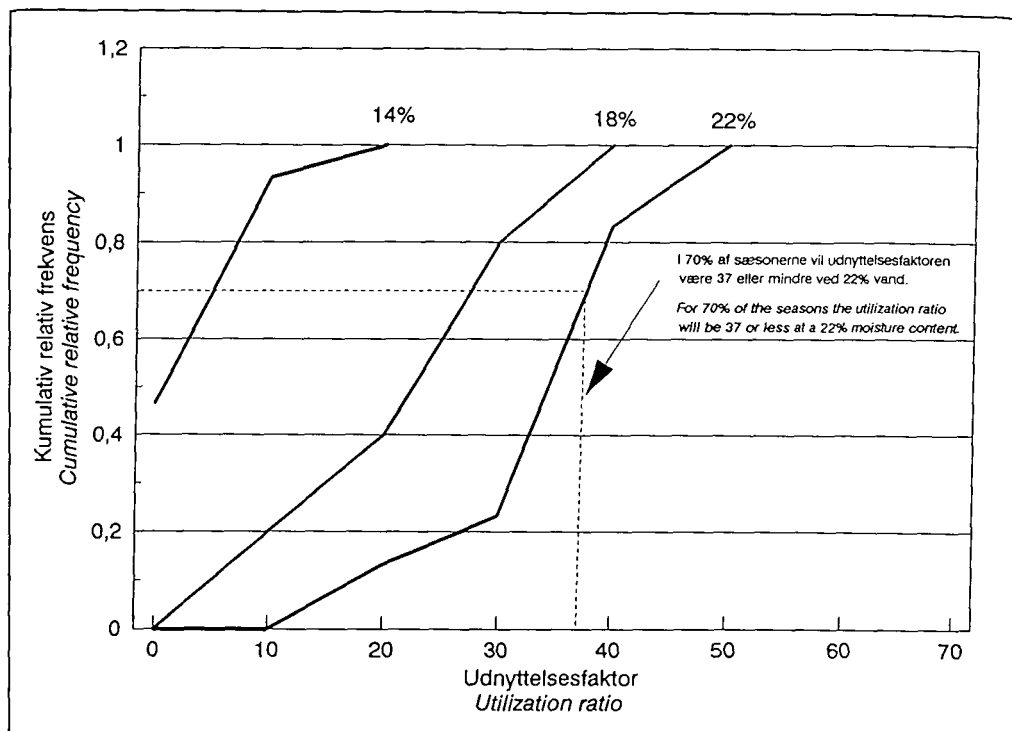


Figur 12 Estimerede sandsynligheder for udnyttelsesgrad for vinterhvedens høstperiode på basis af 30 års vejrdata fra Værløse

Estimated probabilities related to the coefficient of utilization for the harvesting period of winter wheat based on 30 years of data collected in Værløse

Figuren viser tydeligt, hvorledes udnyttelsesgraden afhænger af det ønskede vandindhold i afgrøden. I figur 13 vises de tilsvarende sandsynligheder på baggrund af vejrdata fra Karup. Det

ses, hvorledes kurverne for den kumulerende sandsynlighed ligger længere mod venstre, hvilket er udtryk for en lavere udnyttelsesfaktor i forhold til figur 12.



Figur 13 Estimerede sandsynligheder for udnyttelsesgrad for hvedens høstperiode på basis af 30 års vejrdata fra Karup

Estimated probabilities related to the coefficient of utilization for the harvesting period of wheat based on 30 years of data collected in Karup

6 Omkostningsmodel

Høstoperationen er, som tidligere nævnt, den dyreste markoperation ved dyrkning af afgrøder. Høstoperationerne er påvirket af vejrforhold, bedriftsstørrelse, afgrøder og afgrødesammensætning, afgrødeværdi samt tilgængeligheden af arbejdskraft og maskiner. Initialomkostningerne ved høstmateriellet er meget høje og en væsentlig del af totalomkostningerne, hvorfor der er et behov for at optimere kapacitetstilpasningen af disse maskiner. Overkapacitet øger høstomkost-

ningerne, mens underkapacitet bl.a. øger rettidsomkostningerne. Det er nødvendigt at tage hensyn til en mængde faktorer, ofte af individuel karakter, på hver bedrift. Vurderingen må foretages på basis af "system"-omkostningerne, inkluderende både maskinomkostninger og omkostninger, hidrørende fra tab ved tærskningen, samt rettidsomkostninger, ved at en bestemt afgrøde ikke høstes på det optimale tidspunkt, hvad angår mængde og kvalitet.

6.1 MATEMATISK OMKOSTNINGSMODEL

Internationalt foreligger der en række tiltag i retning af at formulere modeller for tilpasning og optimering af arbejds- og maskinindsats i jordbrugets planteproduktion. Dette gælder på såvel det strategiske styringsniveau som det operationelle niveau. Tidligere studier af problematikken vedrører statiske, økonomiske modeller. Hunt (1969) udvidede disse modeller til at omfatte variable som rettidighed. Senere tiltag har omfattet simulering (f.eks. Audsley & Boyce, 1974; Edwards & Boehlje, 1980; McClendon et al., 1987), lineær programmering (f.eks. Bender et al., 1990; Cairol & Jannot, 1990) eller en kombination af disse modellerings- og løsningsteknikker (Tsai et al., 1987).

Omkostningerne ved høstprocessen er i det aktuelle tilfælde vurderet med baggrund i en omkostningsmodel, beskrevet af bl.a. Nilsson (1972), Hunt (1983) og Jørgensen (1984). De samlede gennemsnitlige, årlige omkostninger (faste og variable) udtrykkes som funktion af maskinkapaciteten:

$$C_i = cpK + \frac{AU}{Ke} (rpK + L + bK + T + C_r)$$

hvor

- C_i = totale årlige omkostninger, kr./år.
- cpK = faste omkostninger, kr./år.
- c = faktor for faste omkostninger (forrentning, afskrivning m.v.), udtrykt som brøkdelen af købspris.
- p = pris pr. kapacitetsenhed, kr./t/time.
- K = kapacitet for maskinen, t/time.
- A = behandlet areal pr. sæson, ha/år.
- U = udbytte, t/ha.
- e = maskinens effektivitet.
- r = faktor for reparation og vedligeholdelse som funktion af købspris.
- b = brændstofudgift (proportional med kapacitet), kr./time.
- T = traktorleje, kr./time. ($T = 0$, hvis mejetærskeren er selvkørende).
- C_r = rettidseffekt i form af tab ved høst på ikke-optimalt tidspunkt.

Med baggrund i forudsætningen om symmetrisk og retlinet afgrødeforringelse som funktion af afvigelsen fra det optimale høsttidspunkt udtrykkes rettidseffekten ved følgende ligning (Hunt, 1983):

$$C_r = R \times A \times U \times V/X \times E$$

hvor

- R = rettidsfaktor, som iflg. Olsen og Hansen (1977), Nilsson (1972) samt Hunt (1983) er 0,01-0,04% forringelse af afgrøden pr. time.
- U = udbytte, t/ha.
- V = værdi af udbytte, kr./t.
- X = planlægningsfaktor, som er udtryk for den relative placering af høsttidspunktet i forhold til det optimale høsttidspunkt, og dermed afgrødetabets størrelse.
- E = udnyttelsesfaktor, der udtrykker den del af totaltiden, som kan anvendes til mejetærskning. Denne kan fastlægges med baggrund i meteorologiske data.

Givet en øvre grænse på vandprocenten, kan udnyttelsesfaktoren, som tidligere anført, fastlægges med baggrund i meteorologiske data.

De totale omkostninger er mindst ved en bestemt kapacitet, og størrelsen heraf findes ved følgende ligning:

$$K_{opt} = \sqrt{\frac{AU}{cpe} \left[L + \frac{RAUV}{XE} \right]}$$

hvor

K_{opt} = optimal kapacitetsstørrelse, t/time.

Det ses heraf, at den optimale maskinstørrelse øges, når rettidsomkostningerne inddrages.

Reparations- og vedligeholdelsesomkostninger påvirker ikke den optimale kapacitet, da disse faktorer antages at være ens for et givet areal, uafhængigt af den benyttede kapacitet.

Samtidig ses det af optimalitetskriteriet, at en sænkning af udbytteprisen, V , betyder, at den optimale maskinstørrelse reduceres.

Beregningerne er her udført for én afgrøde, men modellen kan umiddelbart udvides til at tage hen-

syn til flere afgrøder samt overlappende modningsperioder.

I forbindelse med afgrøder, der ikke høstes helt uafhængigt af hinanden, kan den optimale kapacitet beregnes ved:

$$K_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{A_1 U_1}{cpe_1} \left[L + \frac{R_1 A_1 U_1 V_1}{X_1 E_1} \right] + \frac{A_2 U_2}{cpe_2} \left[L + \frac{R_2 A_2 U_2 V_2}{X_2 E_2} \right] + \dots}$$

hvor indeksene 1, 2 osv. angiver de forskellige afgrøder.

En vigtig parameter i omkostningsmodellen er kapacitetsangivelsen samt prisen pr. kapacitetsenhed. Det er derfor afgørende at få en præcis model for, hvorledes denne parameter er afhængig af mejetærskerens tekniske specifikationer.

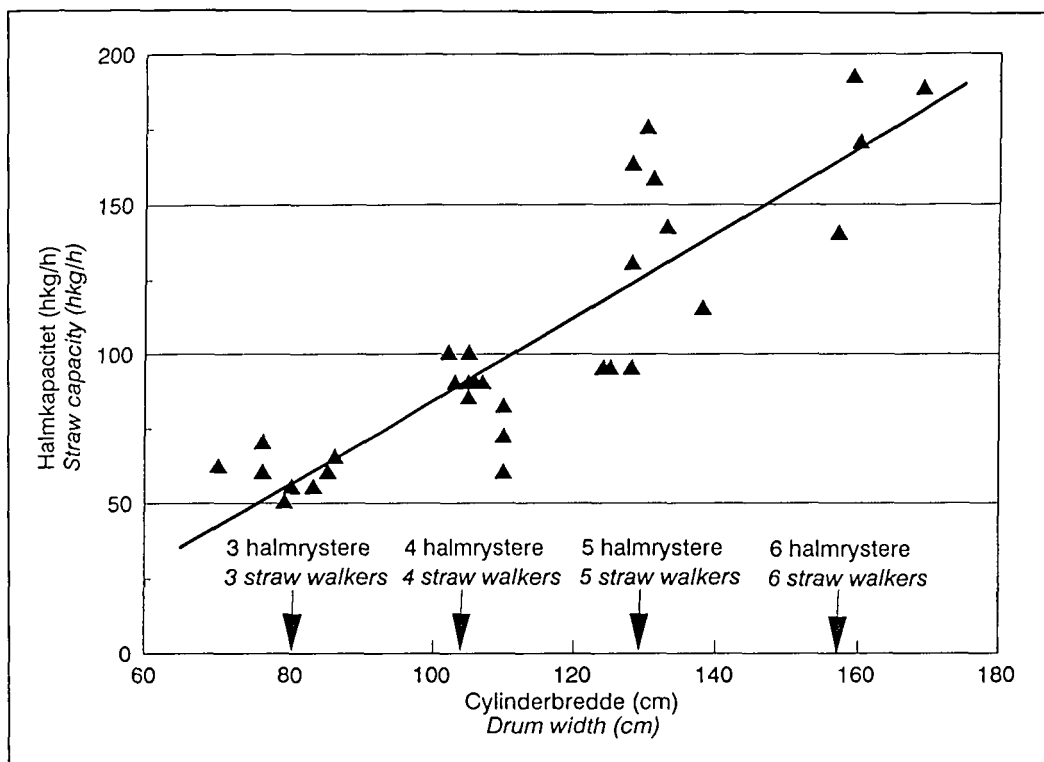
At størrelsesinddele mejetærskere med skærebordsbredden som kriterium er noget problematisk, da samme mejetærsker ofte fås med flere størrelser skærebord. Det er derfor ikke et helt entydigt kapacitetsmål og udtrykker principielt kun maskinens mulige arbejdhastighed.

Halmængden gennem maskinen er den afgørende faktor mht. kapacitet ved en bestemt spildprocent (Elrick, 1982). Udvælgelsen af karakte-

ristika for kapacitet bliver på grundlag heraf et spørgsmål om at finde de tekniske faktorer, der bedst indikerer cylinderens og rysternes udskilningsevne.

Cylinderbredde og rysterareal er her helt centrale faktorer, idet de udtrykker behandlingsarealet gennem maskinen. Faktisk er kun cylinderbredden helt entydig, mens rysterarealet kræver en nærmere specifikation af rysternes effektive bredde og længde, idet hovedparten af udskilningen sker på den forreste del af disse (Lundin & Claesson, 1985).

Figur 14 viser, på grundlag af undersøgelser fra Statens Maskinprovningar i Sverige, halmkapaciteten som funktion af cylinderbredden, der er udtryk for "behandlingsarealet" gennem maskinen.

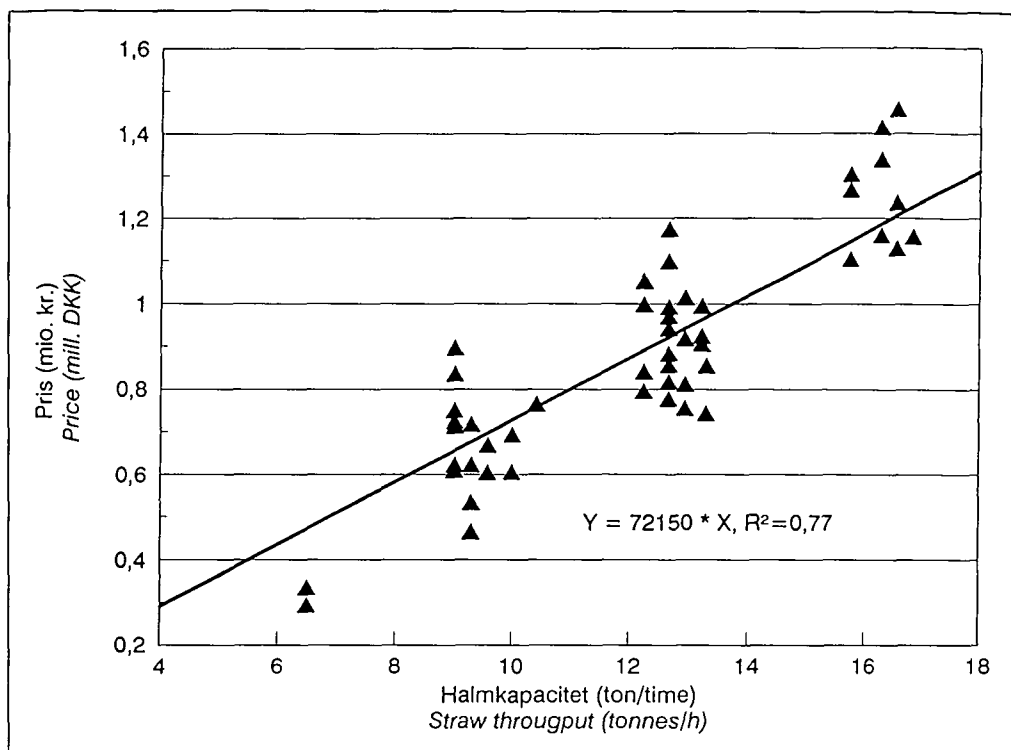


Figur 14 Halmkapacitet som funktion af cylinderbredde
 Straw throughput as a function of drum width

Punktkoncentrationerne på figuren identificerer mejetærskermarkedets 4 størrelsesgrupper, angivet ved henholdsvis 3, 4, 5 og 6 halmrystere. Data vedr. pris pr. kapacitetsenhed beregnes på

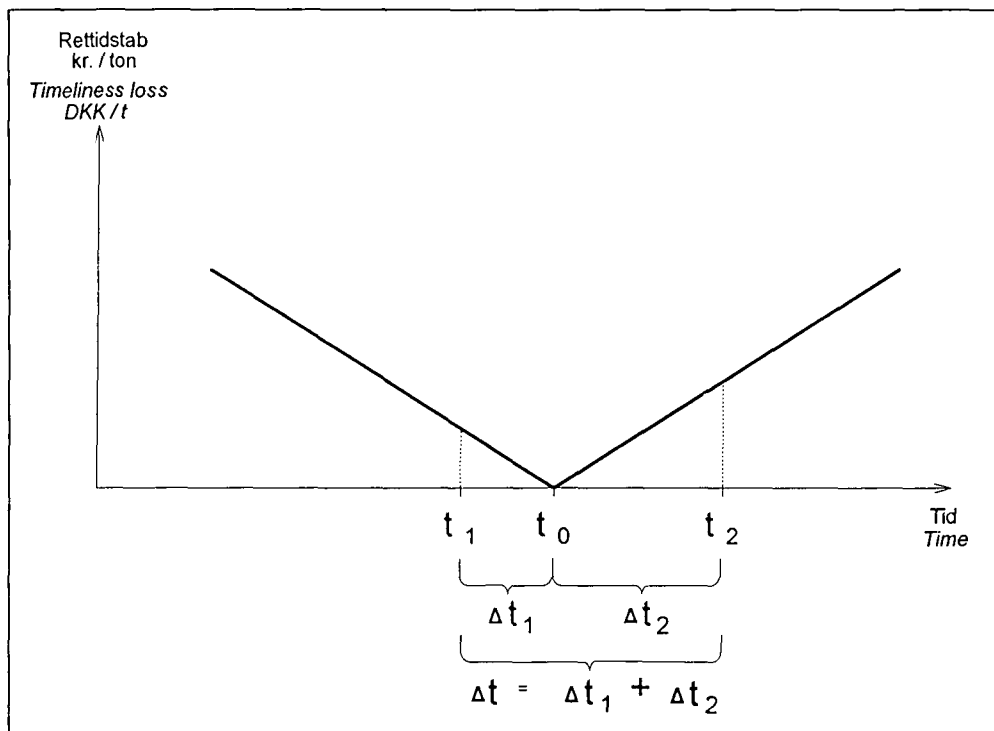
grundlag af officielle afprøvninger af mejetærskere (Statens Maskinprøvninger, 1970-1990) samt mejetærskerpriser (Landbrugets Maskinoversigt, 1992).

Figur 15 viser sammenhængen mellem halmkapacitet og pris. På baggrund heraf findes prisen pr. ekstra kapacitetsenhed (tons/time) at være ca. 72.000 kr. i 1992-priser.



Planlægningsfaktoren, X , er en koefficient, der udtrykker effekten af høstperiodens placering i forhold til optimalt høsttidspunkt. Denne faktor udtrykkes som en funktion af en variabel, α , der er tidsafstanden mellem det tidsmæssige midt-

punkt i høstperioden, $\frac{t_1 + t_2}{2}$, og det optimale høsttidspunkt, t_0 , målt relativt til høstperiodens samlede varighed, $\Delta t = t_2 - t_1$, jf. figur 16.

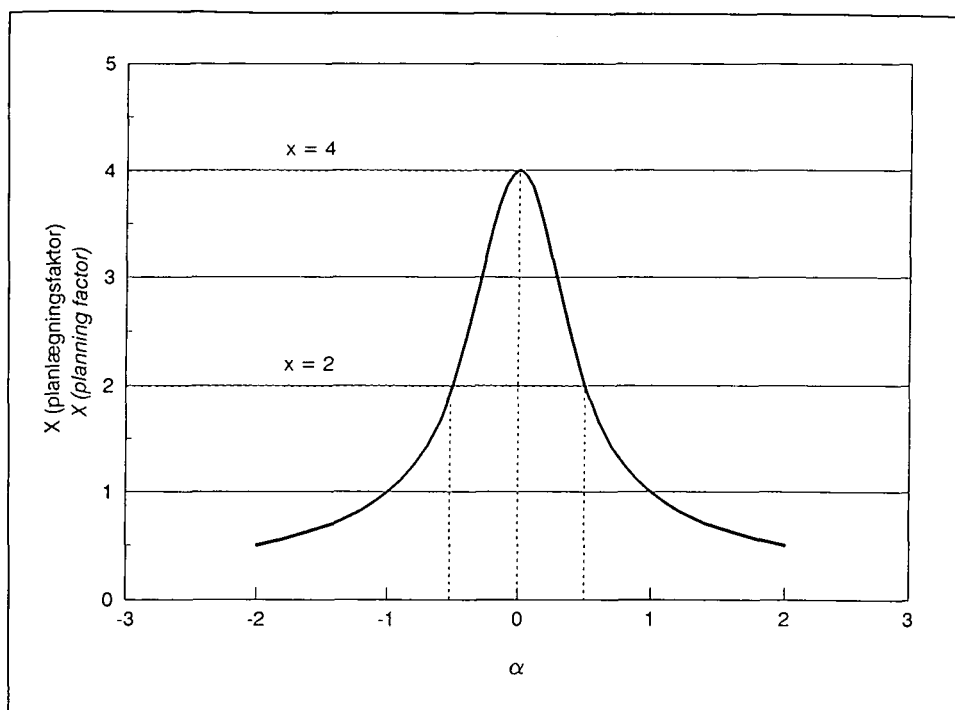


Figur 16 Principskitse af sammenhængen mellem rettidstab og høsttidspunkt. Det optimale høsttidspunkt er t_0 . Tidsintervallet $t_1 - t_2$ angiver en mulig høstperiode
Schematic diagram regarding the relation between timeliness loss and time of harvesting. The optimum time of harvesting is indicated as t_0 . The time interval $t_1 - t_2$ suggests a possible harvesting period

Det kan vises, at planlægningsfaktoren, X , kan udtrykkes ved funktionen:

$$X(\alpha) = \begin{cases} \frac{1}{\frac{1}{4} + \alpha^2} & \text{for } -\frac{1}{2} \leq \alpha \leq \frac{1}{2} \\ \frac{1}{|\alpha|} & \text{for } \alpha < -\frac{1}{2} \vee \alpha > \frac{1}{2} \end{cases}$$

Figur 17 viser grafisk planlægningsfaktoren, X , som funktion af α . Hvis høstperioden er placeret symmetrisk omkring det optimale høsttidspunkt t_0 , er α lig med 0, og X bliver lig med 4. Hvis høstperioden derimod udelukkende placeres umiddelbart før t_0 eller efter t_0 , er α lig med 0,5, og X bliver lig med 2.



Figur 17 Planlægningsfaktor, X , som funktion af α
Planning factor, X , as a function of α

Udnyttelsesfaktoren er, som beregnet i afsnit 5, udtryk for, hvor stor en brøkdelen af totaltiden der kan anvendes til mejetærskning. Den afhænger af kravene til vandindholdet i afgrøden (samt arbejdskraftens tilgængelighed).

Reparations- og vedligeholdelsesomkostninger er relativt vigtige dele af de totale maskinomkostninger. Udvikling af modeller for reparations- og vedligeholdelsesomkostninger kræver registrering af disse udgifter. Omend der i de senere år er set tiltag i retning af en præcis og differentieret opgørelse af disse udgifter, er datamaterialet stadig mangelfuldt som grundlag for en generaliseret model.

Rotz (1987) samt Rotz og Bowers (1991) har på grundlag af dataregistreringer i amerikansk landbrug udviklet en model, som beskriver de akkumulerede reparations- og vedligeholdelsesomkost-

ninger som en eksponentiel funktion af akkumuleret antal anvendte timer. På grundlag af forskelle i anvendelse kan modellen med tilhørende parametre dog ikke direkte overføres til danske forhold.

Til indsættelse i nærværende omkostningsmodel anvendes en forventet værdi for de gennemsnitlige reparations- og vedligeholdelsesomkostninger pr. time, udtrykt som en funktion af mejetærskens anskaffelsespris. Værdien beregnes med baggrund i normal, anvendt ved kalkulationer i Bedriftsløsningen (1993).

6.2 BEREGNINGSEKSEMPEL

En bedrift står over for at skulle anskaffe en ny selvkørende mejetærsker, og der ønskes en kalkulation af den maskinstørrelse (udtrykt ved kapaciteten), der medfører de laveste arbejds- og maskinomkostninger.

Markplanen antages at bestå af ærter (25 ha), at være uafhængige. Tabel 15 viser data og
vårrops (50 ha), vårbyg (25 ha) og vinterhvede øvrige forudsætninger for beregningseksemplet
(50 ha). Modningsperioderne antages endvidere (jf. afsnit 5.1).

Tabel 15 Forudsætninger for beregningseksempel

	Vinterhvede	Vårbyg	Vårrops	Ærter
A, ha	50	25	50	25
U _h , tons/ha	5,0	3,1	3,0	2,0
ε	0,70	0,70	0,66	0,66
R, time ⁻¹	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
U _k , tons/ha	7,0	4,4	2,0	4,0
V, kr./ton	1300	1300	1290	2000
E (gns.), 18% vandindhold	0,21	0,21	0,28	0,24
X	2	2	2	2
i	1	2	3	4

A = areal for den enkelte afgrøde.

U_h = halmudbytte.

ε = effektivitetsfaktor (jf. afsnit 2.1.1.4).

R = afgrødeforringelse pr. time (jf. afsnit 5.1).

U_k = kerneudbytte.

V = afgrødeværdi.

E = udnyttelsesfaktor (baseret på meteorologiske data for Karup - jf. tabel 13).

X = planlægningsfaktor (jf. afsnit 5.1).

i = arbitrær nummerering af afgrøden.

Øvrige forudsætninger for parametre, der indgår
i omkostningsmodellen (jf. afsnit 5.1):

C_f = 0,14

p = 70.000 kr./(tons halm/time)

L = 100 kr./time

b = 7,1 kr./(tons halm/time)

r = 0,00049.

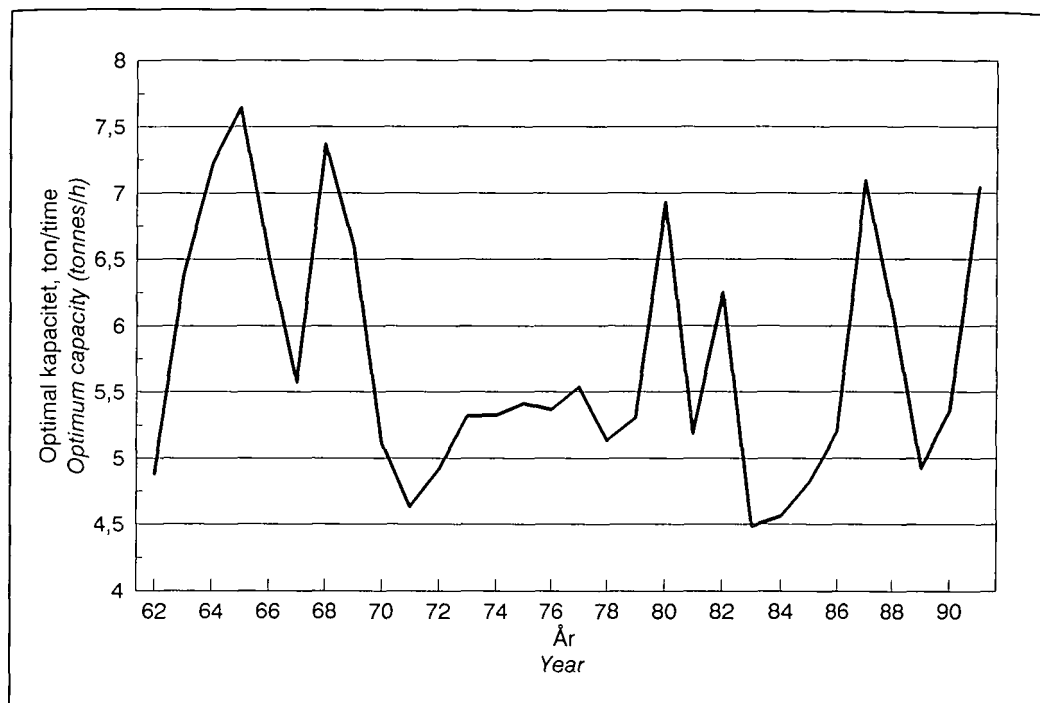
Den optimale maskinstørrelse (K_{opt}) beregnes ved
følgende udtryk:

$$K_{opt} = \left[\sum_{i=1}^4 \frac{A_i \times U_{h,i}}{c_f \times p \times e_i} \left(L + \frac{R \times A_i \times U_{k,i} \times V_i}{X_i \times E_i} \right) \right] -$$

hvor i = 1....4 repræsenterer afgrøderne vinter-
hvede, vårbyg, vårrops og ærter.

En afgørende forudsætning for optimeringsberegningen er størrelsen af E_i (udnyttelsesfaktoren), der, som tidligere nævnt, varierer meget fra år til år. Den bedste metode vil være at beregne den optimale kapacitet for hvert enkelt år (30 år) med tilknyttet udnyttelsesfaktor, beregnet på grund-

lag af de meteorologiske forhold. Den endelige kapacitet findes som gennemsnitsværdien af de enkelte års kapacitetskrav. Figur 18 viser den optimale kapacitets variation over årene for den anførte afgrødeplan.



Figur 18 Den optimale kapacitets variation
Variation of optimum capacity

Den gennemsnitlige optimale kapacitet beregnes til 5,7 tons halm/time, hvilket svarer til en nettoarealkapacitet i den høstede hvede på 1,1 ha/time.

Den årlige driftstid kan beregnes til 132 timer.

Ved en gennemsnitlig udnyttelsesfaktor på 0,21 varer den samlede høstperiode i alt 630 timer, eller 26 døgn.

De totale omkostninger (direkte + indirekte) beregnes ved følgende udtryk:

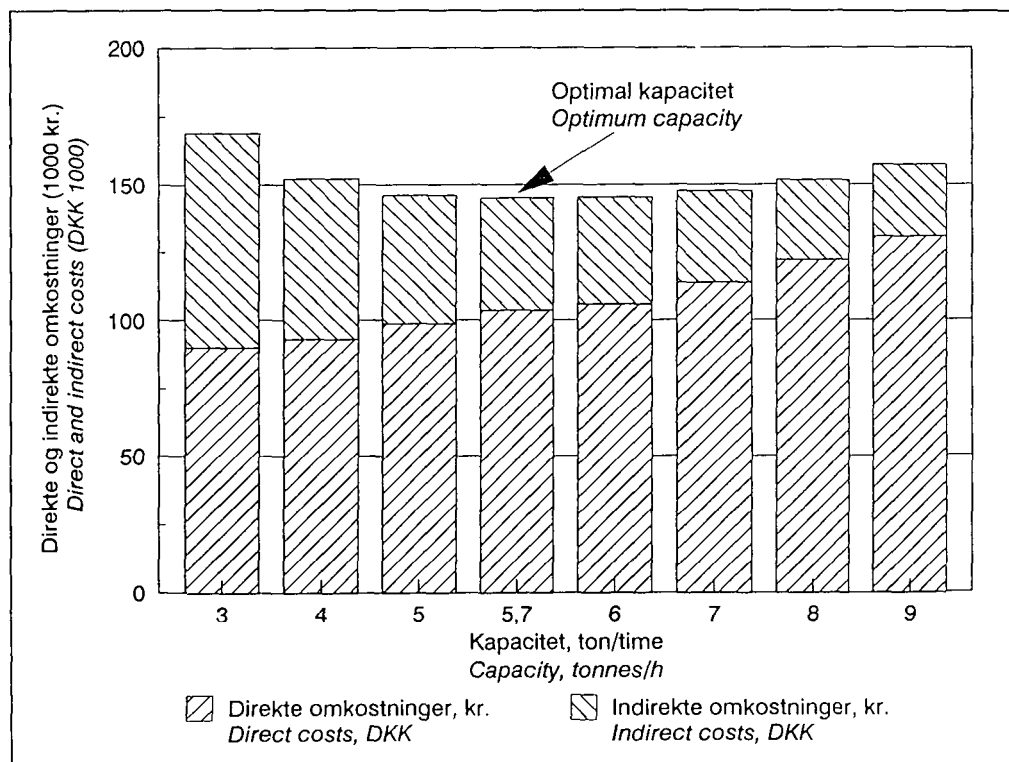
$$c = c_f \times p \times K_{opt} + \underbrace{\sum_{i=1}^4 \frac{A_i \times U_{k,i}}{K_{opt} \times e}}_{\text{Direkte omkostninger}} \left[rp \times K_{opt} + b \times K_{opt} + L + \underbrace{\frac{R \times A_i \times U_{k,i} \times V_i}{X_i \times E_i}}_{\text{Indirekte omkostninger}} \right]$$

Omkostningerne summeres i dette tilfælde gennemsnitligt til 145.310 kr., eller 968 kr./ha. Rettidingsomkostningerne udgør af dette totalbeløb 41.617 kr., eller 277 kr./ha.

Mejetærskeren er i det foregående dimensioneret på grundlag af gennemsnitsforhold og er således ikke dimensioneret til at klare år med meget fugtigt vejr og få operationelle høsttimer. I sådanne år vil rettidingsomkostningerne blive store, mens de til gengæld vil være mindre i tørre år. Beregninger kan vise, at det kan anbefales at vælge mejetærskerstørrelsen lidt større, end dimensioneringsberegningen viser, idet overkapacitet er billigere end underkapacitet. I forlængelse af ovenstående beregningseksempel kan det bereg-

nes, at en overkapacitet på 1 kapacitetsenhed koster 9,9 kr./ha ekstra, mens en underkapacitet på 1 kapacitetsenhed koster 14,9 kr./ha ekstra.

Figur 19 viser for ovennævnte eksempel de totale omkostninger, fordelt på direkte omkostninger (maskin- og arbejdsomkostninger) og indirekte omkostninger (rettidighedsomkostninger) som funktion af kapaciteten. For stigende kapacitet er rettidighedsomkostningerne faldende, mens de direkte omkostninger er stigende. Ved den optimale kapacitet (5,7 tons/time) er de totale omkostninger minimeret. Figuren viser endvidere, at kapaciteten kan varieres en del omkring optimalpunktet uden at påvirke totalomkostningerne væsentligt.



Figur 19 Omkostninger som funktion af massekapacitet (hkg/time) for mejetærskeren
Costs as a function of mass capacity (hkg/h) of the combine harvester

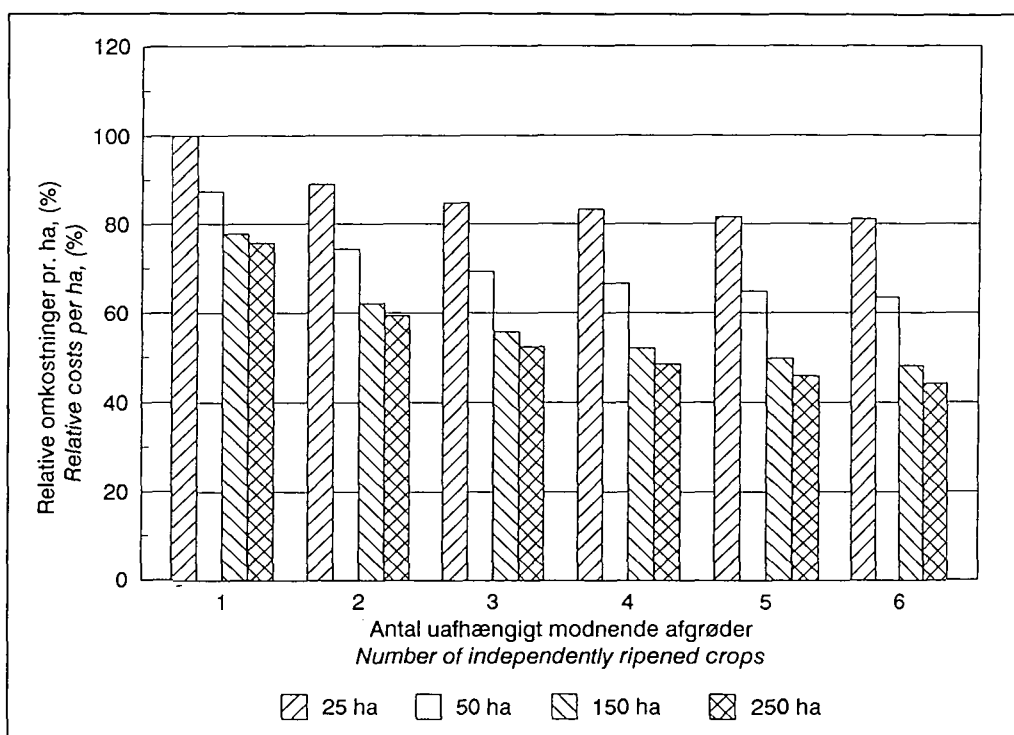
6.3 OPTIMERING AF MEJETÆRSKERHØST

Som vist i det foregående eksempel, er beregning af høstomkostninger samt valg af optimal mejetærskerstørrelse en kompliceret sag med mange influerende faktorer. Årsagen hertil er, at der skal tages hensyn til både tekniske, økonomiske, biologiske og klimatiske variable.

I det følgende omtales beregninger og resultater af nogle karakteristika vedr. optimeret mejetærskerhøst. Grundlaget for beregningerne vil være de beskrevne modeller i afsnit 6.1 samt det i afsnit 5.2 beskrevne eksempel.

6.3.1 Modningstidspunkt

Afgrødevalget (type og antal) spiller afgørende ind på størrelsen af rettidighedstab. Det ideelle er en spredning af modningstidspunkterne ud over høstperioden, således at afgrøderne modner uafhængigt af hinanden. Hvis det er muligt at praktisere et sådant afgrødevalg, vil høstomkostningerne kunne reduceres. Figur 20 viser de relative omkostninger som funktion af uafhængigt modnende afgrøder. Omkostningerne vedrører forskellige antal uafhængige afgrøder, fordelt på lige store andele af det samlede dyrkningsareal.



Figur 20 Relativ reduktion af høstomkostninger
Relative reduction of costs involved in harvesting

Normalt vil det være vanskeligt at etablere afgrøder med fuldstændig uafhængige modningsperioder. Der vil være en overlapning modningsperioderne imellem, og størrelsen af denne overlapning indvirker klart på høstomkostningerne.

Tabel 16 illustrerer høstomkostningernes reduktion, når modningsintervallet øges for 3 dyrkede afgrøder. En spredning af modningsinterval på 3 dage betyder, at afgrødernes modningstidspunkt ligger 3 dage forskudt.

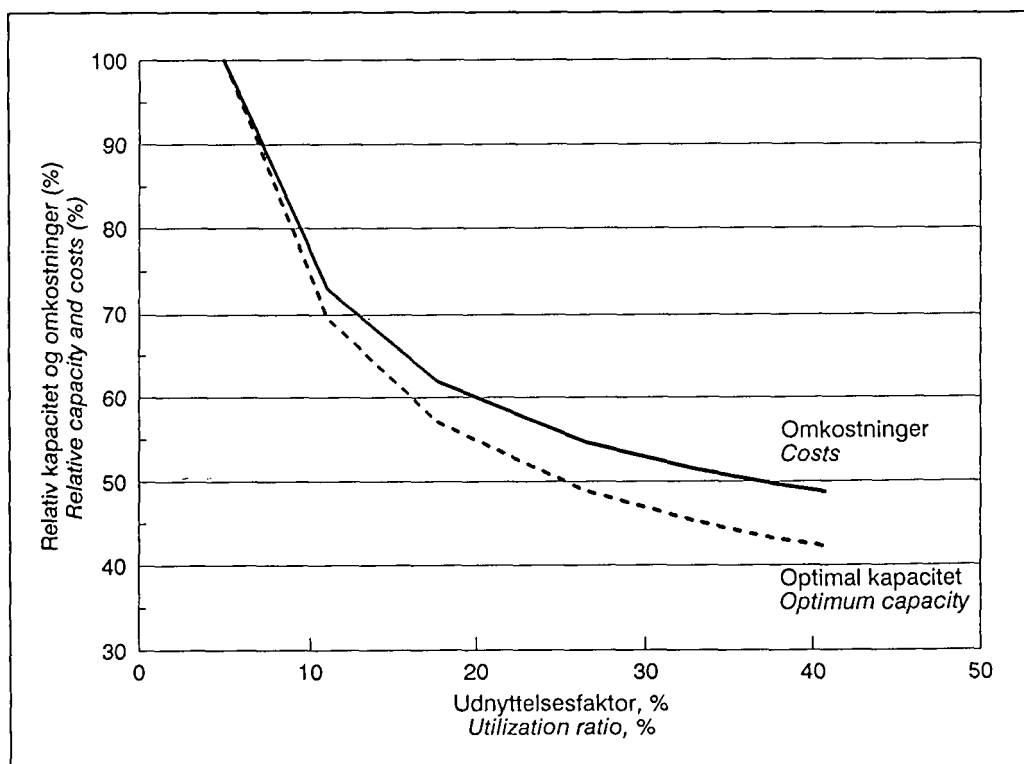
Tabel 16 Omkostningsreduktion ved spredning af modningsinterval. De økonomiske konsekvenser af rettidseffekten er indregnet

Spredning af modningsinterval, antal dage	0	3	6	9
Relative høstomkostninger (%)	100	94	84	80

6.3.2 Udnyttelsesfaktor

Udnyttelsesfaktoren angiver, som tidligere omtalt, andelen af potentiel operationstid i forhold til totaltid. Denne faktor er påvirket af forhold som klima, krav til vandindhold på høsttidspunktet, arbejdskraftens tilgængelighed m.m. I afsnit 5.2 er der foretaget beregninger af udnyttelsesfaktoren som funktion af klima og krav til vandindhold.

Høstomkostningerne og den optimale kapacitet påvirkes i høj grad af udnyttelsesfaktoren. Figur 21 viser den optimale kapacitet og totalomkostningerne som funktion af udnyttelsesfaktoren. Stigende potentiel driftstid bevirker en faldende optimal kapacitet og faldende omkostninger.



Figur 21 Udnyttelsesfaktorens indvirkning på optimal kapacitet og omkostninger
Effect of utilization ratio on optimum capacity and costs

6.3.3 Mejetærskerens effektivitet

Mejetærskerens effektivitet, som defineret i afsnit 4.1.1.4, påvirker i høj grad den nødvendige kapacitet, og dermed omkostningerne. Det vil ofte være lige så vigtigt at sikre sig en høj effektivitet som at vælge den korrekte kapacitet. I tabel 17 ses f.eks., for det i afsnit 6.2 anførte eksempel, omkostningerne pr. ha ved varierende grader af effektivitet med den mejetærsker, der er optimeret ved en effektivitet på 0,7.

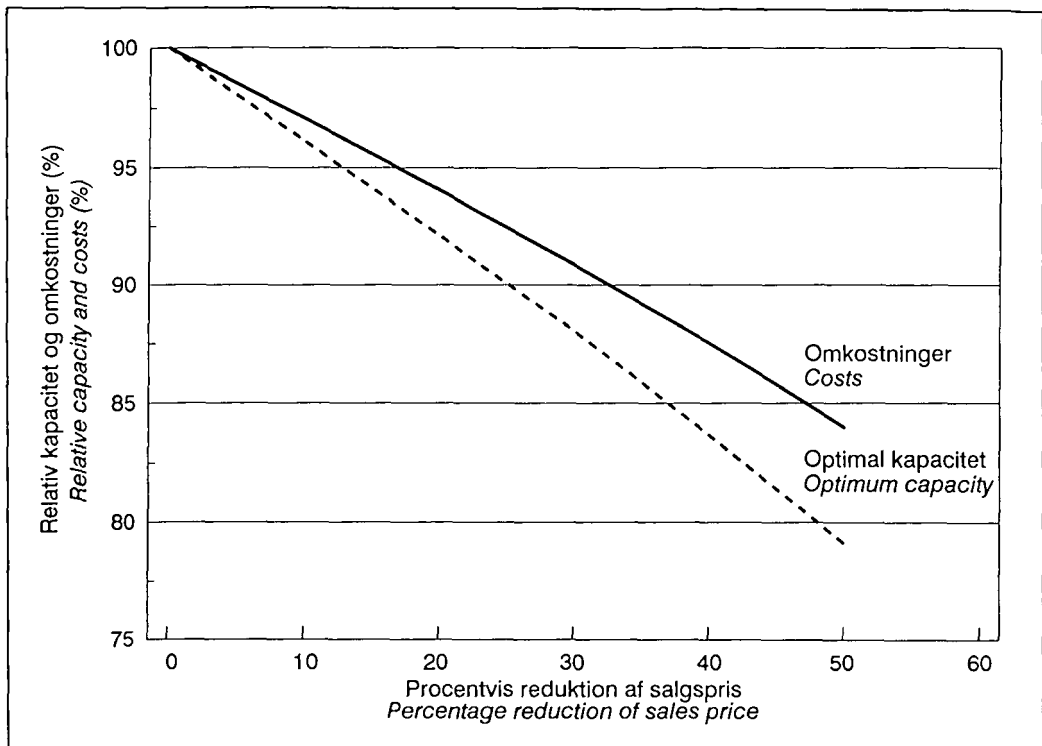
Tabel 17 Omkostninger pr. ha ved varierende grader af effektivitet

Effektivitet	Omkostninger, kr./ha
0,5	1140
0,6	1017
0,7	925
0,8	853
0,9	794

6.3.4 Værdi af høstet afgrøde

Ændrede relationer mellem omkostningerne til maskiner, arbejdskraft og produktpriser forskyder den optimale kapacitet opad eller nedad. For eksempel vil en reduktion af produktpriserne bevirke en reduceret optimal kapacitet, idet den

mindre værdi af produktet giver mere operationstid, da rettidseffekten nu ikke tillægges så stor økonomisk betydning. Figur 22 viser for faldende produktpriser virkninger på optimal kapacitet og omkostninger.



Figur 22 Optimal kapacitet og omkostninger som funktion af ændringer i produktpriser
 Optimum capacity and costs as a function of changes in product prices

Den aktuelle tendens til faldende produktpriser nødvendiggør ud fra en økonomisk synsvinkel en tilpasning af mejetærskerkapaciteten. Et fald på

30% (som er set de senere år) i produktpriserne bevirker således, at den optimale kapacitet er sænket 15%.

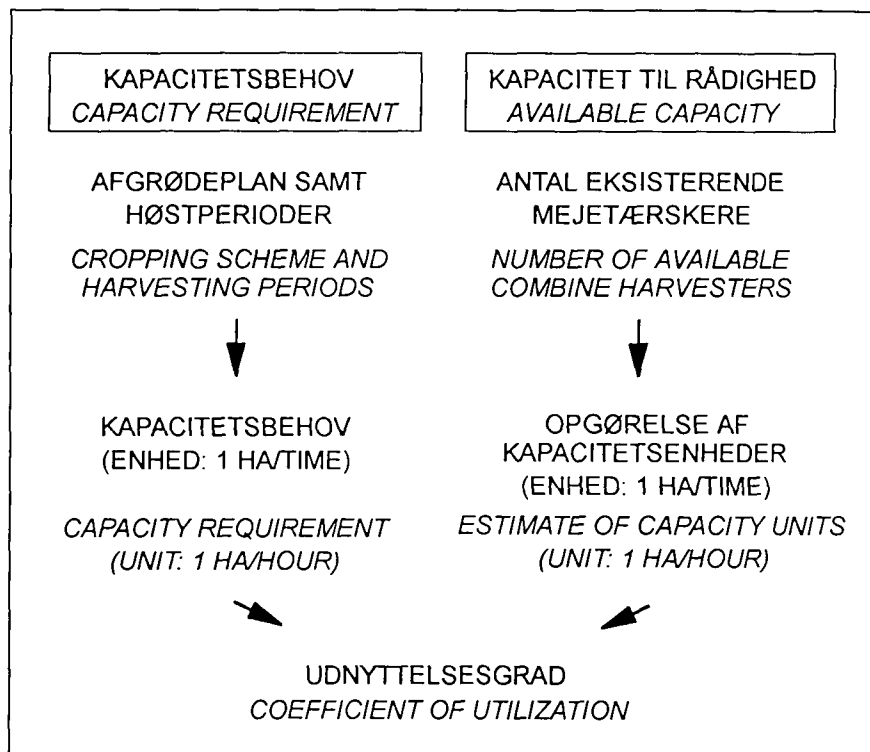
7 Udnyttelsesgrad

Når talen går på kapacitetsudnyttelse (reel i forhold til optimal) af landbrugets maskiner, inddrages mejetærskeren ofte som utilstrækkeligt udnyttet, idet den korte og specifikke anvendelse fremhæves. Dette problem aktualiseres endvidere til stadighed på baggrund af den teknologiske udvikling, hvis resultat er højeffektive, men

uhyre kapitalkrævende maskiner. Samtidig med, at teknologien må anvendes for produktivitetsens skyld, må der foretages en realistisk vurdering af perspektiverne for udnyttelsesgraden af den pågældende maskine. På det langsigtede plan er der helt klart ikke råd til en unødvendig overmekanisering.

Med udgangspunkt i en kapacitetsmæssig kortlægning af den eksisterende mejetærskerflåde (på bedrifts- eller landsniveau) samt kapacitetsbehovet for de høstede afgrøder kan udnyttelsesgraden beregnes under forskellige forhold. Som udtryk for vejrforholdenes variation anvendes de tidligere omtalte simuleringer af udnyttelsesfaktoren for henholdsvis Øst- og Vestdanmark (repræsenteret ved Værløse og Karup).

Udnyttelsesgraden defineres som forholdet mellem et beregnet kapacitetsbehov ved spidsbelastning i en aktuel høstsæson og den til rådighed værende kapacitet. Forudsætningerne herfor er, at kapacitetsbehov og kapacitet til rådighed udtrykkes i samme enhed. Til dette defineres en "standardmejetærsker" med kapaciteten 1,0 ha/time. Figur 23 viser princippet for beregning af kapacitetsbehov og kapacitet til rådighed.



Figur 23 Beregning af udnyttelsesgrad
Calculation of coefficient of utilization

Forskellige afgrødearealer omregnes til en "standardafgrøde", defineret som en vårbygafgrøde med et udbyttelniveau på 45 hkg/ha. På baggrund af målte kapaciteter (se afsnit 2) i andre afgrøder og med andre udbyttelniveauer korrigeres arealerne for de enkelte afgrøder i relation til den definerede "standardafgrøde".

Udgangspunktet er en sammensætning af afgrødetyper med tilknyttede oplysninger omkring den normale høstperiode (Markmekanisering, 1984; Boesen, 1994; Pedersen, 1994). Overlappende høstperioder vurderes, og den mest kapacitetskrævende delperiode identificeres som udtryk for den maksimale kapacitet, høstsystemet må be-

sidde. Variationen i kapacitetskravet beregnes som sagt med baggrund i udnyttelsesfaktoren som funktion af vejrforholdene (se afsnit 5). Som udtryk for den statistiske fordeling gennemføres beregninger af kapacitetskravet for bedste år, 20, 50 og 80% fraktil, og værste år.

Den aktuelle til rådighed værende kapacitet beregnes ved en størrelsesinddeling af mejetærsker-parken samt en omregning til kapacitetsenheden 1,0 ha/time på baggrund af de enkelte mejetærskerstørrelsers målte kapaciteter i praksis (se afsnit 7.2).

7.1 UDNYTTELSESGRAD PÅ BEDRIFTS-NIVEAU

I det følgende gennemgås en bedrift med hensyn til høstsystemets udnyttelsesgrad. Der er for bedriften indhentet oplysninger omkring afgrødeplan, arealer m.m., og disse oplysninger er anvendt som udgangspunkt for en vurdering af udnyttelsesgraden.

Eksempel

Bedriften er beliggende på sandblandet lerjord, og arealtilliggendet er på 120 ha. Afgrødeplanen omfatter nedenstående afgrøder:

<u>Areal, ha</u>	<u>Afgrøde</u>	<u>Høstperiode¹⁾</u>
52,0	Vinterhvede	20/8 - 30/8
27,5	Bælgsæd	10/8 - 20/8
16,5	Vinterraps	1/8 - 10/8
12,0	Frøgræs	10/7 - 20/7
12,0	Vinterbyg	20/7 - 30/7

¹⁾ Landboorganisationernes faglige Landscenter (1984).

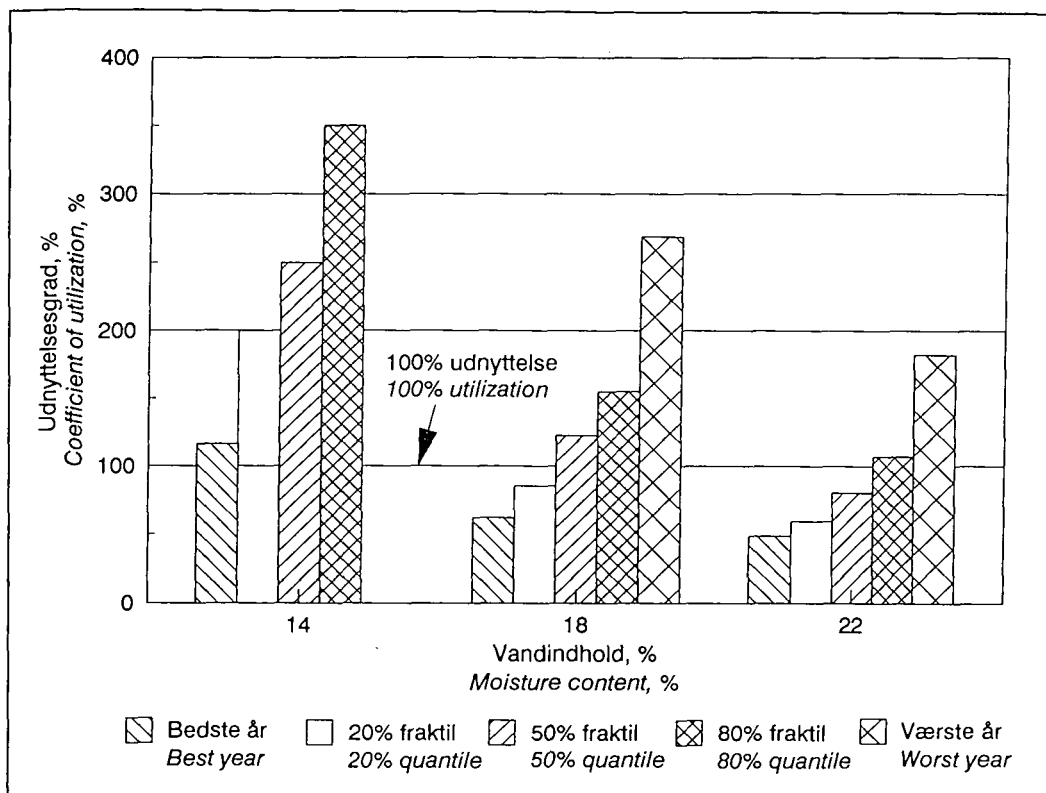
Som det ses af afgrødeplanen, er modningstidspunkterne rimeligt spredte for de forskellige afgrøder, og der er således ingen overlappende høstperioder, hvilket indikerer muligheden for en god udnyttelse af mejetærskerkapaciteten.

Den aktuelle mejetærsker, der er til rådighed, er på 14 fod (4,3 m skærebredde) med en bruttokapacitet på 1,3 ha/time, hvilket ved en effektivitetsfaktor på 0,7 giver en nettokapacitet på 1,9 ha/time.

I figur 24 er udnyttelsesgraden vist som funktion

af vandindhold i afgrøden samt vejrforhold.

Der konstateres en stor spredning i udnyttelsesgraden alt efter, hvilket statistisk mål der benyttes som repræsentant for vejrforholdene - 20, 50 og 80% fraktil osv. Den del af søjlerne, som ligger over linien for 100% udnyttelse, er udtryk for, at det ikke under de beregningsmæssige mål for vejrforholdene samt øvrige beregningsforudsætninger vedr. høstperiodelængder (rettidseffekt) har været muligt at klare høsten under de anførte øvre grænser for vandindhold. En højere grænse har således måttet accepteres.



Figur 24 Beregnet udnyttelsesgrad
Calculated coefficient of utilization

Til illustration af udnyttelsesgradens variation som funktion af tiden viser tabel 18 denne for august måned, inddelt i 5-dages perioder. Ved

dimensionering af høstsystemet er spidsbelastningsperioden (her 20/8 - 30/8) en kritisk faktor.

Tabel 18 Udnyttelsesgrad som funktion af tiden ved 18% vandindhold og vejrforholdene, repræsenteret ved 50% fraktilen

Dato	Udnyttelsesgrad
1/8 - 5/8	33
5/8 - 10/8	33
10/8 - 15/8	64
15/8 - 20/8	64
20/8 - 25/8	121
25/8 - 30/8	121

Afgrødesammensætningen har stor betydning for kapacitetsbehovet, og dermed udnyttelsesgraden. For udvalgte afgrødesammensætninger er der gennemført konsekvensberegninger vedr. mejetærskerkapacitet under normale og unormale vejr-

betingelser. I tabel 19 er disse beregninger opstillet for 2 afgrødesammensætninger, hvor den første har en koncentreret samling af modningstidspunkter, mens disse for den anden er mere spredte.

Tabel 19 Relativt kapacitetsbehov for forskellige afgrødesammensætninger og vejrforhold. 80% fraktilen angiver behovet, som er tilstrækkeligt i 80% af sæsonerne. Sædskifte I omfatter 10% vintersæd, mens sædskifte II omfatter 85%

Afgroeder	Ha	Kapacitetsbehov (netto)				
		Bedste år	20% fraktil	50% fraktil	80% fraktil	Vørste år
SÆDSKIFTE I						
Vinterhvede	12	15	17	25	51	100
Vårbyg	36					
Vårrops	12					
Ærter	12					
SÆDSKIFTE II						
Vinterhvede	24	8	10	14	26	50
Vinterraps	12					
Vinterbyg	12					
Græsfør	12					
Vårbyg	12					

Kapacitetsbehovets afhængighed af vejrforholdene iagttages tydeligt, men derudover ses også afgrødesammensætningens betydning. Kapacitetsbehovet halveres således ved at gå fra sædskifte I til sædskifte II. Det skal understreges, at forudsætningerne i alle tilfælde er, at afgrøderne bjærges med samme vandindhold og samme værdi for rettidseffekt.

7.2 UDNYTTELSESGRAD PÅ LANDSPLAN

Udnyttelsesgraden for landet som helhed beregnes på tilsvarende måde som udnyttelsesgraden på bedriftsniveau. Med hensyn til vejrforholdene vil landet være repræsenteret ved henholdsvis

Karup og Værløse (Vest- og Østdanmark).

Det samlede areal med mejetærskerhøstede afgrøder udgjorde i 1992/93 1,78 mio. ha. I forbindelse med beregning af udnyttelsesgrad betragtes kun august måned, og det høstede areal beregnes i denne måned på basis af normale høstperioder (Markmekanisering, 1984; Boesen, 1994; Pedersen, 1994) til 1,54 mio. ha. Ved hjælp af korrektionsfaktorer for afgrødetype, udbyttelniveau, lejesæd m.m. (jf. afsnit 6.1) beregnes de tilsvarende "standardafgrødearealer" - jf. tabel 20.

Tabel 20 Høstede afgrøder i august måned

Afgrøde	Areal (ha) (tusinde)	Korrektions- faktor	Høstperiode	Areal for standard- afgrøde (tusinde)
Vinterhvede	610	0,68	20/8 - 30/8	798
Vinterrug	79	0,52	10/8 - 20/8	135
Vårbyg	538	0,73	10/8 - 25/8	656
Havre	31	0,73	20/8 - 30/8	38
Bælgsæd	121	0,65	10/8 - 20/8	166
Vinterraps	137	0,71	1/8 - 20/8	172
Vårraps	27	0,71	15/8 - 25/8	34

Ved beregningen af areal for standardafgrøde er totalarealerne fratrasket den andel, som maskinstationerne høster. Maskinstationernes andel skønnes, på baggrund af diverse oplysninger (bl.a. Kjeldahl, 1994), at være på ca. 11%, og det resterende areal er - med den usikkerhed, der hersker ved ansættelsen af de 11% - alene et udtryk for det areal, "egenmekaniseringen" bearbejder.

Med basis i de simulerede udnyttelsesfaktorer (afsnit 5.2) beregnes antal høsttimer pr. dag,

hvorefter kapacitetsbehovet i de enkelte delperioder i august måned (delperiode = 5 dage) beregnes og udtrykkes ved nødvendigt antal standardmejetærskere med enheden 1,0 ha/time ved høst af standardafgrøde.

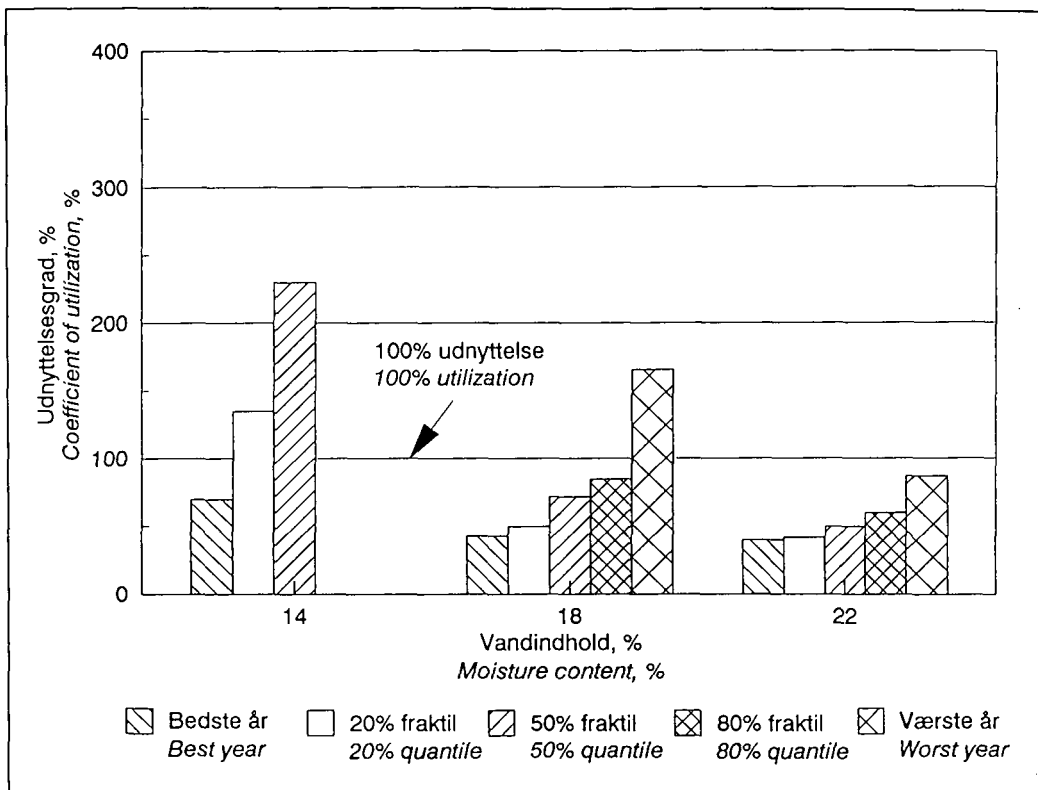
På grundlag af data vedr. kapacitetsmålinger (se afsnit 3) samt statistiske oplysninger omkring antallet af mejetærskere samt en skønnet størrelsesfordeling omregnes totalantallet af mejetærskere til et antal standardmejetærskere med kapacitetsenheden 1,0 ha/time - jf. tabel 21.

Tabel 21 Beregning af antal standardmejetærskere

Skærebordsbredde (m)	Antal mejetærskere	Nettokapacitet (ha/time)	Antal standard- mejetærskere
< 3,4	22402	1,28	28674
3,4 - 4,3	5882	1,57	10804
> 4,5	3309	2,14	7081
I alt	31460		46559

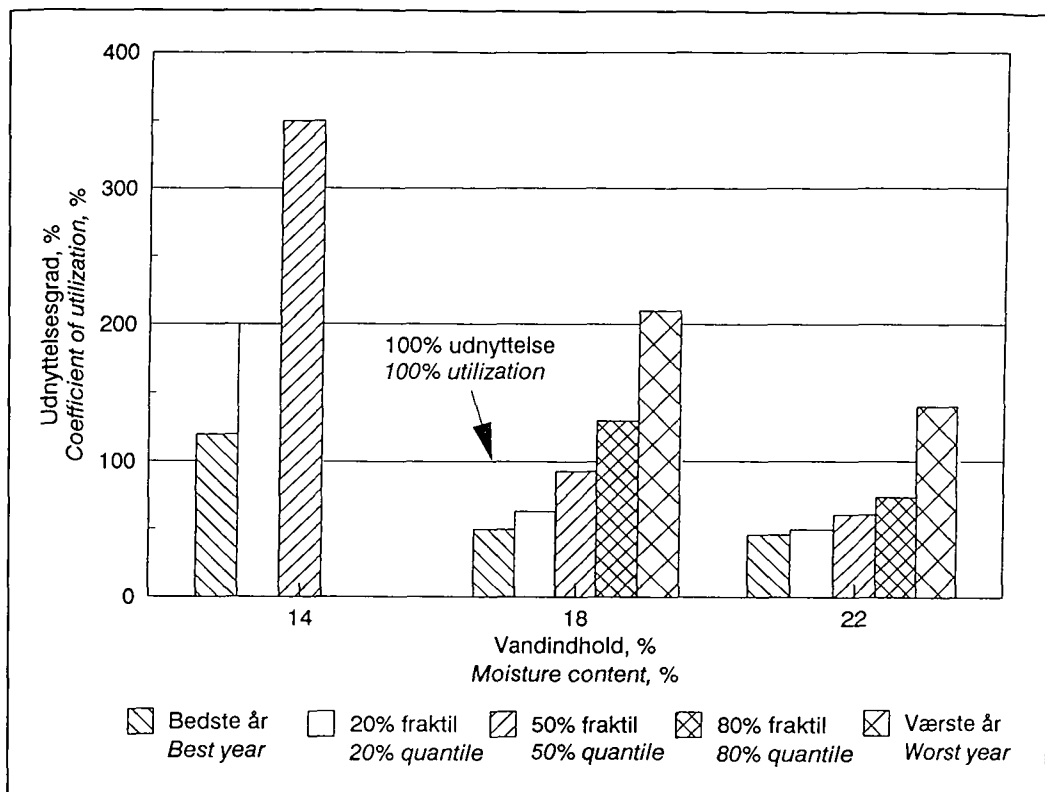
Da både det beregnede kapacitetsbehov og den eksisterende kapacitet er udtrykt ved antal standardmejetærskere, er en beregning afudnyttelses-

graden nu mulig. Figur 25 viser udnyttelsesgraden som funktion af vandindholdet i afgrøden og forskellige mål for vejrforholdenes variation.



Figur 25 Udnyttelsesgrad for vejrforhold, repræsenteret ved Værløse (Østdanmark)

Coefficient of utilization for weather conditions represented by Værløse (Eastern Denmark)



Figur 26 Udnyttelsesgrad for vejrforhold, repræsenteret ved Karup (Vestdanmark)

Coefficient of utilization for weather conditions represented by Værløse (Western Denmark)

Mens figur 25 viser udnyttelsesgraden for Værløse, viser figur 26 tilsvarende udnyttelsesgraden for Karup.

Generelt må der for begge lokaliteter konstateres en meget stor spredning i udnyttelsesgraden alt efter, hvilke år i den 30-års periode man benytter som repræsentant for vejrforholdene - 20% fraktil, 80% fraktil osv. Som tidligere nævnt, er den del af søjlerne, som ligger over linien for 100% udnyttelse, udtryk for, at det ikke under de beregningsmæssige forudsætninger har været muligt at klare høsten under de anførte grænser for vandindhold. En højere grænse har måttet accepteres. Hermed understreges helt klart vigtigheden af, at det kun er muligt at udtale sig om udnyttel-

sesgraden på baggrund af nærmere specificerede forudsætninger og med de forbehold, som disse sætter.

Relativt viser figur 25 og 26 en relativt højere udnyttelse i den vestlige del (Karup), end i den østlige del (Værløse) af landet. Dette er naturligvis direkte en afspejling af forskelle i vejrforholdene, og dermed i antallet af potentielle høsttimer.

I forbindelse med udstikning af et niveau for udnyttelsen må det være naturligt først at frasortere værste år. Sjældent vil det være økonomisk/teknisk forsvarligt at gardere sig mod et sådant ekstremum, ligesom det analytisk set ikke har

megen værdi. Optimalitetsberegninger har desuden vist, at det økonomisk er fordelagtigt med en vis overkapacitet i forhold til gennemsnitsåret, jf. side 53.

På baggrund heraf kunne det være rimeligt at fokusere på 80% fraktilen. Med baggrund i figur 25 og 26 kan det konkluderes, at den til rådighed værende kapacitet i 80% af sæsonerne er tilstrækkelig til at klare høsten ved vandprocenter fra 16-17 og opefter. Nævnte grænse gælder for vejrforhold, repræsenterende Vestdanmark, mens den ligger højere (18-19%) for vejrforhold, repræsenterende Østdanmark.

Ved beregning af udnyttelsesprocenterne er der kalkuleret med en ensartet teknisk/kapacitetsmæssig mejetærskerpark. I praksis er dette naturligvis ikke tilfældet. En vis del af mejetærskerne er teknologisk forældede og er således ikke sammenlignelige med nyere maskiner. Udnyttelsesprocenterne kan følgelig være lidt højere, end beregningerne viser.

En vigtig forudsætning ved de viste beregninger er høstperiodens længde for de enkelte afgrøder. Denne er her anført på grundlag af gennemsnitsbetragtninger, hvad angår afgrødetyper, sorter m.v. Det er klart, at hvis disse periodeangivelser ændres, vil det også påvirke beregningerne af udnyttelsesgraden.

Betragtes udviklingen med hensyn til afgrødesammensætning og høstkapacitet de seneste 8-9 år, er andelen af vinterafgrøder øget mærkbart, med en større spredning af høsttidspunkterne til følge. I den mest kapacitetskrævende høstperiode er kapacitetskravet således mindsket ca. 20%, mens antallet af mejetærskere er reduceret med 11%. Ved en sammenligning med tidligere beregninger (Sørensen, 1986) ses en tendens til en dårligere udnyttelse af høstkapaciteten, når udnyttelsesgraden beregnes på grundlag af den mest krævende spidsbelastningsperiode. Dette skyldes, at den øgede spredning af modningstidspunkterne kapacitetsmæssigt betinger en større reduktion af mejetærskerantallet, end der rent faktisk er sket.

8 Konklusion og diskussion

På grundlag af studier af høstoperationer i praksis er der opstillet modeller for forventet arbejdsbehov og maskinkapacitet for mejetærskning samt transport af høstet materiale til lager. Modellerne indgår som en del af et edb-baseret program til beslutningsstøtte omkring den driftstekniske analyse af arbejds- og maskinoperationer i jordbrugets forskellige produktionstyper. For høstoperationernes vedkommende beregnes arbejdsbehov og maskinkapacitet på grundlag af brugerdefinerede forudsætninger som markstørrelse, markform, maskinstørrelse, arbejdhastighed, afgrødeudbytte m.m.

Resultaterne fra arbejdsstudierne viser signifikante forskelle i præstationerne for ellers sammenlignelige arbejds- og maskinoperationer, indeholdt i høstsystemet. Markeffektiviteten som udtryk for forholdet mellem bruttokapacitet og teoretisk kapacitet varierer fra 66 til 82%. Form og størrelse af marken, kørselsmønster, mejetærskerens manøvreringsegenskaber, evner og erfaring hos føreren, afgrødeforhold m.m. er alle faktorer af enten teknisk eller biologisk karakter, som påvirker arbejdsbehovet og maskinkapaciteten. På denne baggrund er det afgørende for den driftstekniske planlægningsanalyse, at forudsæt-

ninger af ovennævnte typer i videst muligt omfang beskrives og kvantificeres.

Til brug for den strategiske planlægning af nødvendig mejetærskerkapacitet er der opstillet en model for afgrødens vandindhold som funktion af meteorologiske variable. Modellens parametre, udtrykkende den enkelte afgrødes karakteristika mht. vandoptagelse henholdsvis vandafgivelse, er bestemt ved sammenhørende målinger af vandindholdet i stående afgrøde og meteorologiske variable som temperatur, relativ fugtighed, vindhastighed, dug og nedbør. Parametrene er kvantificeret for afgrøderne byg, hvede, rug, raps, ærter og frøgræs.

Modellen for vandindholdets variation som funktion af meteorologiske variable er anvendt som grundlag for beregning af potentiel høsttid, udtrykt ved antal høsttimer ved bestemte grænser for vandindhold i afgrøden. Vandindholdet i den ikke-høstede afgrøde i modenhedsperioden er simuleret med 30 års meteorologiske data som input (for Vest- henholdsvis Østdanmark) i form af temperatur, relativ fugtighed eller nedbør. Udnyttelsesfaktoren, defineret ved den potentielle operationstid i procent af totaltiden, er beregnet for vandindholdet under visse øvre grænser (14, 18 og 22%).

Udnyttelsesfaktoren varierer naturligt som funktion af kravet til vandindholdets størrelse samt afgrødetype. Ved en vurdering af udnyttelsesfaktorens variation afgrøderne imellem skal det bemærkes, at denne variation dels kan henføres til en forskellighed i den biologiske reaktion over for meteorologiske faktorer, dels til en forskel i modenhedsperiodens tidsmæssige placering i høstsæsonen. Det kan nævnes, at udnyttelsesfaktoren er 15-25% højere for vinterbyg end for vårbyg, samt at udnyttelsesfaktoren for lave vandprocenter er markant lavere for raps end for kornafgrøder (også forskellige krav til afgrødernes vandindhold for sikker opbevaring).

Den signifikante forskel i vejrforhold for henholdsvis Vest- og Østdanmark betyder, at ud-

nyttelsesfaktoren er 15-40% lavere for Østdanmark end for Vestdanmark. Estimering af udnyttelsesfaktoren kræver således en samtidig specifikation af krav til vandindhold i høstperioden, geografisk lokalitet samt afgrødetype.

Høstoperationen er en af de dyreste arbejdsoperationer i planteproduktionen. Investeringsomkostningerne ved høstmateriellet er meget høje og en betydelig del af totalomkostningerne, hvorfor der er behov for at kunne tilpasse og optimere kapaciteten af disse maskiner. Overkapacitet øger omkostningerne, mens underkapacitet bl.a. øger afgrødeomkostningerne ved, at afgrøden ikke høstes rettidigt. Tilpasning af maskinkapaciteten til det aktuelle behov må baseres på en analyse af "rene" maskinomkostninger og rettidssomkostninger i form af afgrødetab m.m. På grundlag heraf er der opstillet en model for den optimale maskinkapacitet som funktion af faste og variable omkostninger, pris pr. kapacitetsenhed, afgrødeareal, udbyttelniveau, markeffektivitet, rettidseffekt, udnyttelsesfaktor m.m. Som udtryk for sidstnævnte faktor anvendes resultaterne fra undersøgelsen vedr. potentiel høsttid.

Til illustration af optimeringsmodellens præstationsevne estimeres den optimale kapacitet for en bedrift med en markplan, bestående af 4 afgrøder, nemlig vinterhvede (50 ha), vårbyg (25 ha), vårraps (25 ha) samt ærter (25 ha). Som udnyttelsesfaktor benyttes værdierne for de enkelte år i den tidligere nævnte 30-års periode. Den optimale kapacitet beregnes for de enkelte år, mens den endelige kapacitet findes som en gennemsnitsværdi for disse år. Med definerede forudsætninger omkring faktorer som forrentning, reparationsindeks, udbytte, afgrødeværdi m.m. beregnes den optimale kapacitet til 1,1 ha/time. Supplerende beregninger viser endvidere, at underkapacitet er ca. 50% dyrere i ekstra omkostninger pr. ha end overkapacitet.

Optimering af høstoperationerne i relation til omkostninger kræver hensyntagen til både tekniske, økonomiske, biologiske og klimatiske faktorer. Afgrødevalget spiller ind, og høstomkost-

ningerne vil kunne reduceres, hvis det er muligt at sprede modningstidspunkterne. Ved at gå fra 1 modnende afgrøde på et givet areal til 6 uafhængigt modnende afgrøder (fordelt på lige store dele af dyrkningsarealet) vil høstomkostningerne kunne reduceres med 20-30%. Normalt vil det være vanskeligt at etablere afgrøder med fuldstændig uafhængige modningsperioder, idet der vil være en overlapning. At denne overlapning bør være mindst mulig, illustreres af, at en spredning af modningsintervallet på 0 dage i forhold til 9 dage betyder en reduktion af høstomkostningerne på 20%.

Udnyttelsesfaktoren, udtrykt som andelen af potentiel operationstid i forhold til totaltid, påvirker i høj grad den optimale kapacitet, og dermed omkostningerne. En forøgelse af udnyttelsesfaktoren fra 20 til 40% betyder således en reduktion af den optimale kapacitet med ca. 12% og en reduktion af omkostningerne i samme størrelsesorden. Relativt fås det største fald i kapacitetskrav og omkostninger ved ændringer af udnyttelsesfaktoren i intervallet 10 til 20%.

Mejetærskerens effektivitet, udtrykt ved forholdet mellem bruttokapacitet og teoretisk kapacitet, påvirker også den optimale kapacitet og omkostningerne mærkbart. En forøgelse af effektiviteten fra 0,5 til 0,9 (mejetærsker med bedre manøvreegenskaber, regulær markform m.m.) betyder, alt andet lige, en reduktion af omkostningerne på ca. 30% pr. ha.

Et andet forhold, som påvirker den optimale kapacitet, er ændrede relationer mellem maskin-, arbejds- og afgrødepriser. En reduktion af produktpriser betyder en mindre optimal kapacitet, idet den mindre værdi af afgrøden medfører længere operationstid, da rettidseffekten nu ikke tillægges så stor økonomisk betydning. Hvis f.eks. produktpriserne reduceres 30%, betyder dette, at

den optimale kapacitet og tilhørende omkostninger reduceres ca. 15%.

Med udgangspunkt i en kapacitetsmæssig analyse af den eksisterende mejetærskerflåde på landsplan samt kapacitetsbehovet i forbindelse med de aktuelt høstede afgrøder er udnyttelsesgraden estimeret på landsplan. Udnyttelsesgraden er defineret som forholdet mellem et beregnet kapacitetsbehov og den til rådighed værende kapacitet.

Når vejrforholdene inddrages via forannævnte udnyttelsesfaktor, beregnes udnyttelsesgraden for henholdsvis Vest- og Østdanmark. Det kan konkluderes, at den til rådighed værende kapacitet i 80% af sæsonerne er tilstrækkelig til at klare høsten med vandprocenter fra 16-17 og opefter. Dette gælder for vejrforhold, repræsenterende Vestdanmark, mens grænserne for vandprocenten ligger højere (18-19%) for vejrforhold, repræsenterende Østdanmark. Ved beregningerne er høstperiodens længde anført på basis af gennemsnitsforhold mht. afgrødetyper, sorter m.v. Disse angivelser er afgørende for beregningen af udnyttelsesgrad og bør specificeres sammen med denne.

Afgrødesammensætningen inden for planteavl er de seneste 8-9 år ændret mod en større andel af vintersædsafgrøder, hvilket har medført en større spredning af høsttidspunkterne. Kapacitetskravet i forbindelse med høst er således reduceret ca. 20%. Tilsvarende er mejetærskerantallet reduceret 11%, mens kapaciteten kun er reduceret 7% på grund af, at de enkelte mejetærskere er blevet større. Der ses således en tendens til en dårligere udnyttelse af høstkapaciteten, idet den øgede spredning af modningstidspunkterne kapacitetsmæssigt betinger en større reduktion af mejetærskerantallet, end der faktisk er sket.

Anerkendelser

Tilvejebringelse af data i forbindelse med nærværende projekt er gennemført dels på Forskningscenter Bygholm, dels på en række udvalgte landbrug. Forskningscenter Bygholm vil gerne takke de landmænd, der har medvirket som forsøgsværter ved projektets gennemførelse. Endvidere takkes de maskinkonsulenter og fabrikanter/

forhandlere, der har været behjælpelige ved udpegningen af forsøgsværter. Landbrugstekniker Henrik Mortensen og landbrugstekniker Torben Helsted Pedersen takkes for omhyggelig gennemførelse af arbejdsstudier hos forsøgsværter. Seniorforsker Henning T. Søgaard takkes for udbytterige diskussioner i rapportskrivningsfasen.

Litteratur

- ASAE, 1990. Agricultural Machinery Management Data. American Society of Agricultural Engineers.
- Atzema, A.J., 1994. A Model for the Prediction of the Moisture Content of Cereals at Harvesting Time with Realtime Weather Data. Department of Meteorology, Wageningen University.
- Audsley, E. & Boyce, D.S., 1974. Use of Weather Uncertainty, Compaction and Timeliness in the Selection of Optimum Machinery for Autumn Field Work - A Dynamic Programme. J. Agric. Engng. Res., Vol. 29, pp. 29-40.
- Bell, J.W., 1977. The Cost of Combine Breakdown and Delayed Harvesting. Farm Management Review, Issue No. 10, NOSCA, pp. 29-40.
- Bender, D.A., Peart, R.M., Barret, J.R., Doster, D.H. & Baker, T.G., 1984. Optimizing Cropping Systems Using Simulation and Linear Programming. ASAE Paper No. 84-5017, St. Joseph, MI:ASAE.
- Boesen, B., 1994. Oplysninger vedr. data for modningsperioder. Afdeling for Sortsafprøvning, Tystofte, Skælskør.
- Cairol, D. & Jannot, P.H., 1990. Linear Programming as an Aid to Decision-making for Investments in Farm Equipment. CEMAGREF Farm Management and Economics Division, France. AgEng 1990.
- Chia Chung, C. & Morey, R.V., 1989. Comparison of Four EMC/ERH Equations. Transactions of the ASAE, 32(3):983-990.
- Chung, D.S. & Pfof, H.B., 1967. Adsorption and Desorption of Water Vapor by Cereal Grains and their Products. Part II: Development of the General Isotherm Equation. Transaction of the ASAE, 10(4):552-555.
- Claesson, S., Svedsater, S.Å. & Åberg, E., 1972. Skordetröskning. Meddelande nr. 344, Jordbrukstekniska Institutet, Uppsala, Sverige.
- Crampin, D.J. & Dalton, G.E., 1971. The Determination of Moisture Content of Standing Grain from Weather Records. J. Agric. Engng. Res., 16/11:88-91.
- Crisp, J. & Woods, J.L., 1994. The Drying Properties of Rapeseed. J. Agric. Engng. Res., 57:89-97.
- Danmarks Statistik, 1992/93. Landbrugsstatistik 1992/93.
- De Landbrugstekniske Undersøgelser, 1971. Arbejdsforbrugets afhængighed af markform, markstørrelse m.m. Beretning nr. 8, Landbrugets Rationaliseringsfond, De Landbrugstekniske Undersøgelser, Ørritslevgård, Otterup.
- Edwards, W. & Boehje, M., 1980. Machinery Selection Considering Timeliness Losses. Transactions of the ASAE, 23(4): 810-815,821.
- Elrich, J.D., 1982. How to Use and Choose Combines. Publication No. 88, East Scotland College of Agriculture, Edinburgh.
- Gesslin, S., 1959. Stråsadens mognadsforløp och skordemetoderna. Vaxtödling 13.
- Halsey, G., 1948. Physical Adsorption on Non-uniform Surfaces. J.Chem.PHYS., 16:931-937.
- Heger, K., 1973. Abschätzung des Witterungsrisikos auf die Ernte des Getreibes mit dem Mahdrescher unter Benutzung eines agrarmeteo-

- rologischen Modells. J. Agric. Engng. Res., 33:29-32.
- Hunt, D., 1983. Farm Power and Machinery Management. Iowa State University Press, Ames, Iowa.
- Jørgensen, B. & Have, H., 1984. Teknisk økonomisk sammenligning af mejetærsker/mejesnitersystemet. Jordbrugsteknisk Institut, KVL, Meddelelse nr. 48.
- Kimball, B.A. & Bellamy, L.A., 1986. Generation of Diurnal Solar Radiation, Temperature and Humidity Patterns. Energy in Agriculture, 5:185-197.
- Landbrugets Maskinoversigt, 1992. Landsudvalget for Bygninger og Maskiner.
- Landskalkuler, 1993. Landbrugets Informationskontor.
- Landøkonomisk Oversigt, 1993. De danske Landboforeninger.
- Lehoczky, L. & Nacsady, A., 1980. Foreseeable Developments in Self-propelled Harvesting Machines. AGRI/MECH Report No. 86, FAO/ECE/AGRI/WP, 2/38. Economic Commission for Europe, United Nations, New York.
- Lundin, G. & Claesson, S., 1985. Skordetrøskning. Meddelande nr. 409. Jordbrugstekniska Institutet, Uppsala, Sverige.
- McClendon, R.W., Wetzstein, M.E. & Edwards, L.H., 1987. Risk Efficiency of Machinery Selection for Double Cropping via Simulation. Transaction of the ASAE, 30(5):1259-1265.
- Markmekanisering, 1984. Mejetærskning. Landboorganisationernes faglige Landscenter.
- Nielsen, V. & Sørensen, C.G., 1993. "DRIFT" Et program for beregning af ARBEJDSBEHOV, ARBEJDSKAPACITET, ARBEJDSBUDGET, ARBEJDSPROFIL. Statens Jordbrugstekniske Forsøg, Beretning nr. 53, 124 pp.
- Nilsson, B., 1972. Optimering av maskinkapacitet vid spanmålsskord. Rapport nr. 11. Institutionen för arbetsmetodik och teknik, Lantbrukshögskolan, Uppsala.
- Olsen, C.C. & Hansen, P.E., 1977. Høsttid i havre og byg. Beretning nr. 1489. Statens Planteavlsvforsøg, Rønhave.
- Pedersen, J.B., 1994. Oplysninger vedr. modningsperioder. Landskontoret for Planteavl, Landbrugets Rådgivningscenter, Århus.
- Pixton, S.W. & Warburton, S., 1977. The Moisture Content/Equilibrium Relative Humidity Relationship and Oil Composition of Rapeseed. J. Stored Prod. Res. 13:77-81.
- Rotz, C.A., 1987. A Standard Model for Repair Costs of Agricultural Machinery. Transactions of the ASAE, Vol. 3(1).
- Rotz, C.A. & Bowers, W., 1991. Repair and Maintenance Cost for Agricultural Equipment. ASAE Paper, No. 911531.
- Smith, E.A., Bailey, P.H. & Ingram, G.W., 1981. Prediction of the Field Moisture Content of Mature Barley and Wheat by Commonly Used Drying Equations. Journal of Agricultural Engineering Research, 26:171-178.
- Statens Maskinprovningar, 1970-90. Mejetærskerprøvninger. Uppsala.
- Sørensen, C.G., 1986. Mejetærskeren: Vurdering af udnyttelsesgrad samt faktorer for optimal maskinoperation. Hovedopgave i landbrugsmaskiner, Jordbrugsteknisk Institut, Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole, København.
- Sørensen, C.G., 1990. Kvantificering af høstpe-

- riode. Projektrapport ved Nordisk forskerkursus i Måleteknik og Databehandling. Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole, København.
- Thomson, T.L., Peart, R.M. & Foster, G.H., 1968. Mathematical Simulation of Corn Drying - A New Model. Transactions of the ASAE, 24(3):582-586.
- Tsai, Y.J., Jones, J.W. & Mishoe, J.W., 1987. Optimizing Multiple Cropping Systems: A Systems Approach. Transaction of the ASAE, 30(6):1554-1561.
- Van Elderen, E. & Van Hoven, S.P.J.H., 1973. Moisture Content of Wheat in the Harvesting Period. J. Agric. Engng. Res., 18:71-93.
- Van Kampen, J.H., 1969. Optimizing Harvesting Operations on a Large-Scale Grain Farm. Rijksdienst voor de Ijsselmeerploders, Zwolle.
- Wintersteiger, 1990. Wintersteiger Division Seedmech, Austria.
- WMO, 1974. Manual on Codes. Volume I. World Meteorological Organization, No. 306.

Appendiks A

I tabel 13 og 14, side 41 og 42, vises de gennemsnitlige udnyttelsesfaktorer som funktion af afgrødetype, vandindhold samt geografisk betingede meteorologiske data. For at give en oversigt over de enkelte års udnyttelsesfaktor i perio-

den 1962-1991 er disse vist i tabel A1 og A2. I de samme tabeller er der endvidere anført statistiske mål som gennemsnit, spredning, minimum og maksimum samt 20, 50 og 80% fraktiler.

Tabel A1 Udnyttelsesfaktor for de anvendte simuleringsår. Baseret på meteorologiske data for Karup

ÅR	Vårbyg			Vinterbyg			Vinterhvede			Vinterrug		
	14%	18%	22%	14%	18%	22%	14%	18%	22%	14%	18%	22%
1962	0,0	18,7	34,2	0,0	22,7	39,4	0,0	15,1	31,3	0,0	5,6	32,6
1963	0,0	10,3	24,0	0,4	33,0	46,1	0,0	5,9	22,4	0,0	17,5	29,4
1964	0,0	17,9	32,4	0,0	10,3	33,0	1,3	16,2	33,8	0,0	35,4	41,3
1965	0,9	8,7	27,7	0,0	5,0	16,7	0,0	7,0	26,3	0,0	27,8	42,9
1966	0,0	21,9	33,1	0,0	15,1	33,0	0,8	19,6	32,0	0,0	35,4	38,2
1967	0,7	13,5	36,4	4,1	27,8	41,7	0,0	34,3	40,2	1,3	35,0	46,1
1968	3,6	21,9	29,8	3,0	35,8	46,9	3,3	20,7	34,9	3,7	20,7	35,0
1969	9,2	39,7	39,3	20,7	37,0	44,5	4,2	21,1	31,3	13,4	37,4	43,3
1970	3,9	27,8	36,0	4,1	21,1	28,6	8,8	29,4	35,9	10,4	37,0	40,1
1971	1,0	6,4	22,2	3,4	12,7	21,1	2,9	25,6	40,5	3,7	30,2	38,6
1972	0,0	5,8	21,5	0,0	5,0	10,0	0,0	7,0	18,1	0,0	13,9	33,4
1973	3,9	19,5	30,6	9,8	39,4	46,9	0,0	26,0	37,7	1,7	25,8	38,6
1974	0,5	23,1	32,4	9,0	39,0	47,7	0,0	26,4	40,5	1,7	27,8	42,1
1975	16,8	38,6	41,9	0,0	2,0	17,9	4,6	13,2	18,8	21,8	36,6	39,7
1976	12,4	15,9	36,0	0,0	13,9	33,8	0,0	20,3	37,7	4,0	45,3	47,7
1977	2,5	13,5	20,4	0,0	12,3	29,4	4,6	24,9	31,3	10,4	37,0	40,5
1978	2,1	23,8	32,8	11,3	19,5	29,4	4,2	31,6	35,9	5,0	34,6	41,3
1979	1,4	8,7	14,0	0,8	9,9	27,4	0,0	9,4	16,7	1,7	7,6	9,1
1980	0,0	9,5	30,6	4,1	17,9	27,8	0,0	15,1	27,4	0,0	13,9	31,4
1981	0,0	7,0	20,0	0,8	7,2	20,3	0,0	12,4	30,2	0,3	14,7	29,4
1982	3,2	14,7	26,2	4,1	32,2	47,7	0,0	6,1	13,9	0,0	6,4	23,1
1983	6,0	32,2	38,6	14,7	35,0	43,7	10,0	32,0	38,4	15,1	40,5	43,7
1984	7,1	35,8	43,0	0,0	33,0	45,7	5,0	28,6	39,5	8,4	45,7	47,7
1985	6,0	33,8	40,8	11,3	35,0	42,9	8,4	35,0	40,9	15,7	34,2	42,5
1986	0,7	27,4	32,0	5,6	37,4	44,5	0,8	21,5	31,3	7,4	28,2	36,2
1987	4,6	33,8	43,7	0,0	21,5	29,8	6,7	36,5	42,7	0,0	23,5	34,2
1988	1,1	22,3	36,4	6,0	35,8	46,1	2,9	26,4	39,1	7,7	38,2	46,1
1989	16,4	40,0	39,3	0,8	29,8	47,3	15,5	39,2	38,4	22,1	41,7	43,3
1990	0,0	22,7	36,0	8,7	26,6	41,3	0,0	21,5	35,2	11,4	47,7	47,7
1991	0,0	6,0	35,3	0,0	15,1	47,7	0,0	6,0	34,5	0,0	14,3	43,7
Gennemsnit	3,5	20,7	32,2	4,1	22,9	35,9	2,8	21,1	32,6	5,6	28,6	38,3
Maksimum	16,8	40,0	43,7	20,7	39,4	47,7	15,5	39,2	42,7	22,1	47,7	47,7
Minimum	0,0	5,8	14,0	0,0	2,0	10,0	0,0	5,9	13,9	0,0	5,6	9,1
Spredning	4,7	10,8	7,5	5,3	11,8	11,1	3,9	9,9	7,9	6,7	12,2	8,2
80% fraktil	0,0	9,4	25,8	0,0	11,9	27,7	0,0	11,8	27,2	0,0	14,6	33,2
50% fraktil	1,2	20,7	32,9	1,9	22,1	40,3	0,8	21,3	34,7	2,7	32,2	40,3
20% fraktil	6,0	32,5	38,7	8,7	35,1	46,3	4,7	29,8	39,2	10,6	37,5	43,7

fortsættes.....

Tabel A1 fortsat.....

ÅR	Vårrops			Vinterraps			Bælgsæd			Frøgræs		
	14%	18%	22%	14%	18%	22%	14%	18%	22%	14%	18%	22%
1962	3,7	25,1	34,5	10,0	29,9	38,0	0,0	11,7	35,9	0,0	0,0	4,6
1963	5,4	28,1	37,5	8,2	23,5	33,5	0,0	6,0	29,2	0,0	0,0	11,7
1964	0,0	18,7	32,1	4,6	26,0	39,9	0,0	21,7	39,1	0,0	0,0	8,4
1965	3,7	17,7	20,1	0,0	15,3	33,5	0,0	3,6	35,6	0,0	2,9	15,9
1966	5,7	26,1	34,5	1,8	10,0	23,3	0,0	29,9	34,5	0,0	4,6	26,4
1967	8,0	20,1	32,5	16,0	31,7	39,2	0,0	36,3	41,6	0,0	12,6	33,9
1968	10,4	29,8	35,5	26,3	40,9	45,2	1,3	28,5	41,3	0,0	0,0	0,0
1969	18,1	37,8	40,2	34,1	38,4	45,2	2,9	21,7	31,3	0,0	17,2	45,6
1970	20,8	36,5	39,5	22,4	35,9	41,0	7,9	36,3	38,4	0,0	0,0	0,0
1971	24,4	38,2	40,2	10,7	20,6	27,9	1,3	31,7	37,7	0,0	0,0	7,1
1972	14,4	31,8	38,5	0,0	7,1	17,3	0,0	4,3	30,9	0,0	0,0	11,3
1973	14,4	31,8	37,8	27,7	39,8	44,8	0,0	33,4	42,7	0,0	8,4	15,5
1974	12,1	26,4	34,1	28,1	40,5	45,2	0,0	35,6	42,7	0,0	9,2	23,4
1975	19,7	35,5	40,2	0,0	11,7	23,7	2,9	12,8	18,5	0,0	0,0	0,0
1976	10,4	23,1	32,5	8,5	27,0	39,9	0,0	38,1	42,7	0,0	0,0	17,2
1977	9,4	20,1	29,5	7,1	22,4	33,1	2,9	19,2	29,2	0,0	0,0	0,8
1978	15,7	30,5	32,8	27,0	36,6	42,2	0,0	33,1	39,5	0,0	11,3	20,9
1979	12,7	27,1	31,5	4,6	16,4	34,3	0,0	12,8	18,1	0,0	0,0	10,0
1980	16,4	30,5	32,5	8,9	17,8	26,4	0,0	9,6	33,1	0,0	3,8	6,7
1981	12,4	29,8	32,8	11,7	23,8	33,9	0,0	9,2	23,1	0,0	0,0	0,0
1982	33,5	39,8	40,2	19,9	38,4	45,2	2,1	15,3	28,8	0,0	6,3	33,1
1983	21,4	39,5	40,2	27,0	36,6	43,3	3,3	34,1	39,8	0,0	12,6	40,6
1984	19,1	35,5	38,5	11,4	35,9	45,2	6,3	41,3	42,7	0,0	6,3	44,4
1985	12,4	33,8	36,2	6,4	25,3	32,0	0,0	24,5	42,0	0,0	3,8	7,1
1986	3,7	16,1	31,8	19,6	41,3	45,2	0,0	31,7	39,8	0,0	3,3	12,1
1987	7,0	28,8	35,8	2,8	13,9	26,4	5,9	36,6	42,7	0,0	0,0	0,0
1988	13,1	25,1	32,8	20,6	36,3	43,7	0,0	25,6	40,9	0,0	2,5	15,1
1989	16,4	34,5	36,2	21,0	34,9	44,1	18,4	37,3	40,5	0,0	14,2	25,9
1990	1,7	16,1	40,2	12,4	37,0	45,2	0,0	19,9	30,9	0,0	5,9	34,7
1991	0,0	18,7	38,5	2,8	25,9	45,2	0,0	19,2	42,8	0,0	0,0	15,0
Gennemsnit	12,2	28,4	35,3	13,4	28,0	37,4	1,8	24,0	35,9	0,0	4,2	16,2
Maksimum	33,5	39,8	40,2	34,1	41,3	45,2	18,4	41,3	42,8	0,0	17,2	45,6
Minimum	0,0	16,1	20,1	0,0	7,1	17,3	0,0	3,6	18,1	0,0	0,0	0,0
Spredning	7,7	7,2	4,4	10,0	10,4	8,2	3,8	11,5	7,2	0,0	5,1	13,9
80% fraktil	5,0	20,1	32,5	4,3	17,5	31,2	0,0	12,6	30,6	0,0	0,0	3,8
50% fraktil	12,4	29,3	35,6	11,0	28,5	39,9	0,0	25,1	38,8	0,0	2,7	13,6
20% fraktil	18,3	35,5	39,6	23,2	37,3	45,2	2,9	35,7	42,1	0,0	8,5	27,7

Tabel A2 Udnyttelsesfaktor for de anvendte simuleringsår. Baseret på meteorologiske data for Værløse

ÅR	Vårbyg			Vinterbyg			Vinterhvede			Vinterrug		
	14%	18%	22%	14%	18%	22%	14%	18%	22%	14%	18%	22%
1962	1,7	39,3	21,3	0,0	14,6	35,3	1,7	39,3	47,9	0,0	28,4	28,4
1963	0,4	20,9	26,2	8,4	41,8	45,9	0,0	17,6	39,4	2,1	21,1	40,6
1964	0,0	14,2	34,5	0,0	15,5	36,5	0,0	12,6	41,0	0,0	28,8	43,8
1965	0,0	11,7	43,0	0,0	7,5	29,6	0,0	12,1	43,0	0,0	34,9	47,5
1966	0,0	15,9	31,3	0,0	17,6	39,4	0,0	17,2	31,7	0,0	37,3	43,4
1967	0,0	16,7	26,4	8,8	30,5	47,1	0,8	26,4	42,2	1,7	34,1	41,0
1968	2,1	13,8	28,4	0,8	29,7	47,9	0,0	11,7	28,8	3,3	15,0	34,5
1969	10,5	34,3	46,3	17,6	34,3	43,0	1,3	15,9	33,7	5,9	34,1	43,4
1970	7,5	33,5	38,6	0,0	20,1	34,1	5,4	31,0	38,2	13,8	37,3	39,0
1971	5,0	25,9	37,3	12,6	36,4	46,7	8,0	46,0	48,7	19,7	41,4	44,2
1972	9,6	25,9	30,0	6,3	40,2	46,3	7,1	38,5	45,9	4,2	30,0	40,2
1973	4,6	21,3	32,1	10,0	42,7	47,9	0,0	28,9	40,6	2,1	26,8	36,5
1974	4,2	20,9	33,3	10,9	39,7	45,1	0,0	28,9	40,2	1,7	26,4	36,5
1975	15,0	43,0	48,7	4,2	27,2	41,8	12,6	27,2	41,4	28,0	39,4	46,3
1976	20,0	14,2	35,3	2,0	14,6	30,4	26,0	29,3	44,6	0,0	45,5	48,7
1977	4,6	20,1	26,8	0,0	18,4	29,6	1,3	28,0	37,7	5,4	45,1	48,7
1978	3,8	40,2	48,7	13,0	36,8	48,3	9,2	33,1	41,4	16,3	46,7	48,7
1979	6,7	41,0	46,7	7,5	37,7	42,2	0,0	28,9	36,9	11,7	43,0	46,7
1980	0,0	16,7	29,2	7,1	33,1	42,6	0,0	13,4	32,9	2,5	26,0	37,3
1981	4,2	25,5	36,9	8,4	34,7	38,6	13,0	34,3	38,6	1,3	26,0	37,3
1982	11,7	28,0	41,0	30,0	44,0	48,7	3,3	17,2	42,2	3,3	16,6	40,6
1983	17,0	44,0	48,7	25,1	44,8	48,7	18,0	46,1	48,7	27,0	45,0	48,7
1984	13,8	42,0	48,7	6,7	44,2	48,7	11,3	46,0	48,7	18,8	46,0	48,7
1985	7,1	45,6	48,7	8,4	38,1	47,1	7,9	43,1	48,7	8,4	39,0	42,2
1986	10,0	34,7	42,2	7,9	37,7	41,8	5,9	30,1	42,2	12,1	37,3	39,4
1987	0,0	11,7	27,6	0,0	6,3	28,4	0,0	13,8	27,2	0,0	11,8	34,9
1988	0,0	16,3	43,0	2,9	33,5	48,7	0,0	20,5	38,6	12,6	45,5	48,7
1989	12,1	39,7	40,6	4,2	41,0	43,8	10,0	38,1	40,2	22,6	37,3	40,6
1990	2,1	28,5	35,3	14,2	41,8	45,9	2,1	28,5	35,3	12,6	47,1	48,7
1991	0,0	11,7	43,8	0,0	6,3	48,7	0,0	13,8	48,7	0,0	22,3	48,7
Gennemsnit	5,8	26,6	37,4	7,2	30,4	42,3	4,8	27,2	40,5	7,9	33,8	42,5
Maksimum	20,0	45,6	48,7	30,0	44,8	48,7	26,0	46,1	48,7	28,0	47,1	48,7
Minimum	0,0	11,7	21,3	0,0	6,3	28,4	0,0	11,7	27,2	0,0	11,8	28,4
Spredning	5,8	11,4	8,2	7,4	12,3	6,6	6,4	11,0	5,9	8,6	10,2	5,4
80% fraktil	0,0	15,6	29,1	0,0	17,2	36,3	0,0	15,5	36,6	0,0	26,0	37,3
50% fraktil	4,4	25,7	37,1	6,9	34,5	44,4	1,5	28,7	40,8	3,8	36,1	42,8
20% fraktil	10,7	39,8	46,3	11,2	41,2	48,0	9,4	38,2	46,3	14,3	45,1	48,7

fortsættes.....

Tabel A2 fortsat.....

ÅR	Vårraps			Vinterraps			Bælgsæd			Frøgræs		
	14%	18%	22%	14%	18%	22%	14%	18%	22%	14%	18%	22%
1962	7,9	36,2	44,9	3,8	20,7	36,6	0,0	41,0	50,2	0,0	10,0	13,5
1963	4,1	29,8	40,9	21,8	39,4	42,9	0,0	13,8	42,3	0,0	0,0	5,3
1964	6,0	33,4	44,5	4,1	36,6	45,7	0,0	7,1	34,3	0,0	0,0	13,5
1965	0,0	22,3	38,2	0,0	20,3	40,9	0,0	25,5	46,0	0,0	0,0	9,6
1966	4,1	21,1	23,8	1,9	16,7	33,0	0,0	4,2	41,8	0,0	3,5	18,3
1967	6,4	31,0	40,9	16,9	39,4	47,3	0,0	35,1	40,6	0,0	5,5	30,3
1968	9,0	23,8	38,6	24,1	45,7	47,7	0,0	42,7	49,0	0,0	15,1	39,0
1969	11,7	35,4	42,1	31,6	45,7	47,7	0,0	33,5	48,5	0,0	0,0	0,0
1970	20,3	44,9	47,7	10,5	25,8	31,0	0,0	25,5	36,8	0,0	20,6	46,1
1971	23,3	43,3	46,9	26,0	43,7	47,7	7,0	42,7	45,2	0,0	0,0	0,0
1972	27,5	45,3	47,7	25,2	43,7	46,9	8,0	37,2	44,4	0,0	0,0	8,2
1973	16,2	37,8	45,7	30,1	44,5	47,3	8,5	5,0	36,4	0,0	0,0	13,0
1974	16,2	37,8	44,9	29,0	42,1	44,1	0,0	39,3	50,2	0,0	10,0	17,8
1975	13,6	31,4	40,5	8,7	31,8	39,4	9,0	41,8	50,2	0,0	11,0	26,9
1976	22,2	42,1	47,7	8,3	21,9	29,0	10,0	15,1	21,8	0,0	0,0	0,0
1977	11,7	27,4	38,6	12,4	25,0	30,2	0,0	44,8	50,2	0,0	0,0	19,7
1978	10,5	23,8	35,0	27,9	45,3	47,7	0,0	22,6	34,3	0,0	0,0	1,0
1979	17,7	36,2	39,0	21,1	38,2	42,5	0,0	38,9	46,4	0,0	13,6	24,1
1980	14,3	32,2	37,4	18,1	37,4	42,9	0,0	15,1	21,3	0,0	0,0	11,5
1981	18,5	36,2	38,6	27,1	46,9	47,7	0,0	11,3	38,9	0,0	4,5	7,7
1982	13,9	35,4	39,0	42,9	46,0	47,7	5,0	10,9	27,2	4,2	0,0	35,0
1983	37,7	47,3	47,7	33,5	44,5	47,7	9,0	18,0	33,9	0,0	7,5	38,0
1984	24,1	46,9	47,7	26,7	46,9	47,7	0,0	40,2	46,9	0,0	15,1	42,0
1985	21,5	42,1	45,7	14,3	34,6	44,1	0,0	48,5	50,2	0,0	7,5	33,0
1986	13,9	40,1	42,9	31,3	44,5	45,7	0,0	28,9	49,4	0,0	4,5	8,2
1987	4,1	19,1	37,8	0,0	15,9	37,0	0,0	37,2	46,9	0,0	4,0	14,0
1988	7,9	34,2	42,5	15,4	35,8	43,7	0,0	43,1	50,2	0,0	0,0	0,0
1989	14,7	29,8	39,0	18,1	26,6	33,8	7,1	30,1	48,1	0,0	3,0	17,3
1990	18,5	40,9	42,9	33,5	45,0	47,7	0,0	43,9	47,7	0,0	17,1	28,1
1991	1,9	19,1	47,7	1,1	26,2	47,7	0,0	23,4	36,4	0,0	7,0	37,5
Gennemsnit	14,0	34,2	41,9	18,9	35,9	42,7	2,1	28,9	42,2	0,0	5,3	18,6
Maksimum	37,7	47,3	47,7	42,9	46,9	47,7	10,0	48,5	50,2	0,0	20,6	46,1
Minimum	0,0	19,1	23,8	0,0	15,9	29,0	0,0	4,2	21,3	0,0	0,0	0,0
Spredning	8,4	8,3	5,2	11,8	10,1	6,1	3,7	13,7	8,4	0,0	6,2	14,0
80% fraktil	6,3	26,7	38,6	7,5	25,7	36,9	0,0	14,8	36,0	0,0	0,0	7,2
50% fraktil	13,9	35,4	42,3	19,6	38,8	44,9	0,0	31,8	45,6	0,0	3,8	15,6
20% fraktil	20,6	42,1	47,1	29,2	45,1	47,7	7,0	42,0	49,5	0,0	10,2	33,4

Appendiks B

Table 1 Data concerning work study

Combine model:	Combine 1	Gross capacity:	(hours/ha):	0.47	
Crop:	Winter wheat	Gross capacity:	(ha/hour):	2.13	
Moisture percentage:	14.8	Gross capacity:	(hkg/hour):	196.7	
Harvested area:	6.04 ha				
Yield:	92.45 hkg/ha	Net capacity:	(hours/ha):	0.45	
Effective working width:	5.72 m	Net capacity:	(ha/hour):	2.21	
Forward speed:	3.87 km/h	Net capacity.:	(hkg/hour):	204.5	
Stubble length:	20 cm				

Codes	Principal work	Emptying grain	Empty driving in other respects	Control of machine	Adjustment of machine
	02	03	06	43	44
Sum (cmin) ¹⁾	14424	1950	12	0	0

Codes	Preparation of principal work	Termination of principal work	Crop stops	Mechanical stops	Instruction of driver
	45	46	71	73	78
Sum (cmin)	0	0	174	0	0

Codes	Turnings 180°, around	Turnings 180°, 1 rear	Turnings 90°, 1 rear	Turnings 90°, 1 rear	Not included in time study
	81	82	86	96	790
Sum (cmin)	317	0	0	0	1726

¹⁾ cmin = 1/100 min

Table 2 Parameter estimate

Crop	p			k			s		
	Aver. ¹⁾	S.d. ²⁾	CON ³⁾	Aver. ¹⁾	S.d. ²⁾	CON ³⁾	Aver. ¹⁾	S.d. ²⁾	CON ³⁾
Spring barley	0.30	0.15	0.28-0.32	8.12	4.36	3.11-13.13	1.14	0.80	0.68-1.60
Winter wheat	0.38	0.11	0.37-0.39	4.65	3.77	1.85-7.45	1.62	1.35	0.73-2.31
Winter rye	0.60	0.31	0.56-0.64	4.15	2.50	1.28-7.02	3.45	2.15	1.30-5.60
Seed grass	0.41	0.13	0.39-0.43	6.30	3.50	1.80-10.8	3.25	2.10	1.38-5.12
Peas	0.27	0.15	0.25-0.29	3.29	1.86	1.16-5.43	2.99	1.68	1.81-4.17
Rape, direct	0.35	0.19	0.31-0.38	5.50	3.15	1.15-7.50	1.81	0.94	0.10-3.53
Rape, mowed	0.33	0.09	0.32-0.34	8.68	2.68	0.54-16.82	1.64	1.10	0.66-2.62
All crops	0.40	0.13	0.39-0.41	5.81	3.30	4.87-6.74	2.09	1.96	1.61-2.56

p = minutes per turning

k = headland turnings per field

s = crop stops, tending of machine, min per ha

¹⁾ Aver. = average

²⁾ S.d. = standard deviation for individual measurements

³⁾ CON = 95% confidence interval of average

Table 3 Parameters in model for net capacity

Crop	b	a	R ² ¹⁾
Winter/spring barley	30.3	-15.8	0.71
Winter wheat	38.6	-37.2	0.70
Winter rye	37.5	-78.9	0.79
Winter/spring rape	22.3	-28.6	0.72
Peas	30.1	-31.9	0.80
Seed grass	4.4	0.1	0.76

¹⁾ R² = extent of variation of response variable (net capacity), explained by the model

Table 4 Parameter estimate

Operation	Parameter	Average value	Standard deviation for individual measurements	Confidence interval ¹⁾
Emptying tank of combine	m_m	1.62	0.49	1.5-1.7
Reloading/ transport wagon	m_v	10.35	6.50	7.8-13.0
Unloading at store	m_a	2.41	0.81	2.2-2.6
m_m = time consumed by combine when travelling to and from field + preparation and termination of emptying, min per emptying m_v = time consumed by transport unit when travelling to and from field + preparation and termination of reloading, min per reloading m_a = time consumed by transport unit when travelling to and from field + preparation and termination of unloading, min per unloading ¹⁾ = 95% confidence interval for average				

Table 5 Parameter estimate for tank load and emptying capacity as a function of cutting width

Crop	b	a	R^2 ¹⁾
<u>Grain</u> : Tank load size	0.91	-1.78	0.75
Emptying capacity	30.61	-27.10	0.71
<u>Rape</u> : Tank load size	0.90	-1.65	0.65
Emptying capacity	29.51	-26.40	0.72
<u>Seeds</u> : Tank load size	0.42	-0.49	0.59
Emptying capacity	1.37	12.90	0.65
<u>Peas</u> : Tank load size	0.85	-1.72	0.70
Emptying capacity	15.68	56.81	0.75

¹⁾ = extent of variation of response variable (tank load size or emptying capacity), explained by the model

Table 6 Combine harvesting and transport of grain and seeds

Field size:	<i>4.0 ha</i>								
Field shape (16 options):	<i>2</i>			<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	
				1:4	1:2	1:1	triangular	polygonal	
Transport speed:	<i>18 km/h</i>								
Transport distance:	<i>500 m</i>								
Load weight/transport:	<i>6000 kg</i>								
Grain tank emptied during operation:	yes/no: <i>yes</i>								
Cutting width	<i>4.2 m</i>								
Crop	Yield	Actual width of swaths	Harvesting	Loading	Transport	Unloading	Waiting time	Total	Capacity
	t/ha	m	min/ha	min/ha	min/ha	min/ha	min/ha	hours/ha	ha/hour
Barley	<i>6.0</i>	3.96	43	15.1	4.8	2.1	21	1.59	1.38
Wheat	<i>7.5</i>	3.96	52	18.8	6.0	2.6	25	1.92	1.14
Rye	<i>5.0</i>	3.96	59	12.6	4.0	1.8	41	2.18	1.01
Rape	<i>3.0</i>	3.96	46	7.5	2.4	1.1	35	1.68	1.31

Figures in italics are user specified

Table 7 Combine capacity on accepted 18% moisture content of grain

			"Fine weather" ¹⁾ (200 harvesting hours)	"Average weather" ¹⁾ (130 harvesting hours)	"Bad weather" ¹⁾ (58 harvesting hours)
Width of cutter bar	Net capacity	Gross capacity	Seasonal capacity		
(m)	(ha/hour)	(ha/hour)	(ha/season)	(ha/season)	(ha/season)
3.5	1.6	1.2	227	172	50
4.1	1.9	1.4	265	200	59
4.7	2.1	1.6	302	229	67

¹⁾ The terms "Fine weather", "Average weather" and "Bad weather" refer to maximum, average and minimum number of harvesting hours, defined by 30 years of Værløse weather data, cf. Chapters 5 and 6. The harvesting period is fixed at 20 days

Table 8 Efficiency factor and capacity

Crop	$\epsilon^{1)}$ %	e m	Gross capacity ha/h	Theoretical capacity ²⁾ ha/h
Barley	0.70	2.70-6.00	0.82-2.87	1.12-3.58
Wheat	0.70	4.20-6.00	0.80-2.68	1.18-3.17
Rye	0.73	2.20-6.00	0.57-2.54	0.81-3.91
Rape	0.66	2.70-6.00	0.80-1.90	1.06-3.52
Peas	0.66	4.20-6.00	1.10-1.98	1.58-3.25
Seed grass	0.82	3.51-5.80	0.70-1.67	0.82-1.90

ϵ = field efficiency (aver.)

e = working width (m)

1) The efficiency factor is indicated as the operational efficiency defined as the ratio of gross capacity and theoretical capacity

2) The theoretical capacity is calculated during combining at full cutting width

Table 9 Work budget on combine harvesting

Method	Period	Field no.	No. of men	Hours per ha.	No. of treat- ments	Area ha	Ca- pacity ha/hour
6.0 m swath; combine WHEAT	35	14	2	1.32	1	7.0	1.67
6.0 m swath; combine WHEAT	35	11	2	1.31	1	15.5	1.68
6.0 m swath; combine WHEAT	35	3-1	2	1.25	1	28.0	1.75
6.0 m swath; combine WHEAT	35	2	2	1.23	1	38.0	1.79
6.0 m swath; combine WHEAT	36	1	2	1.26	1	25.0	1.74
6.0 m swath; combine RYE	34	15-3	2	1.64	1	2.3	1.34
6.0 m swath; combine RYE	34	15-2	2	1.59	1	4.3	1.38
6.0 m swath; combine RYE	34	15-1	2	1.68	1	14.5	1.31
6.0 m swath; combine RYE	35	13	2	1.55	1	9.0	1.42
6.0 m swath; combine RYE	35	4	2	1.49	1	16.0	1.47
6.0 m swath; combine RYE	35	3	2	1.48	1	10.0	1.48
6.0 m swath; combine BARLEY	35	7	2	1.03	1	10.0	2.15
6.0 m swath; combine BARLEY	35	6	2	1.06	1	16.0	2.08
6.0 m swath; combine BARLEY	35	6	2	1.05	1	20.0	2.10
6.0 m swath; combine PEAS	34	18	2	1.93	1	12.0	2.37
6.0 m swath; combine PEAS	34	5-1	2	0.88	1	9.0	2.50
6.0 m swath; combine PEAS	34	7-1	2	0.88	1	11.0	2.51
6.0 m swath; combine SEED GRASS	33	12	1	1.26	1	17.0	0.98
6.0 m swath; combine SEED GRASS	33	8-1	1	1.26	1	12.0	0.98
6.0 m swath; combine SEED GRASS	34	7-2	1	1.24	1	4.5	0.99
6.0 m swath; combine SEED GRASS	34	5	1	1.24	1	5.0	0.99
6.0 m swath; combine SEED GRASS	33	5	1	1.25	1	10.0	1.00
6.0 m swath; combine SEED GRASS	32	5	1	1.25	1	15.0	1.00
6.0 m swath; combine SEED GRASS	32	17	1	1.26	1	14.0	0.98
6.0 m swath; combine SEED GRASS	32	1-1	1	1.25	1	13.0	0.99

Table 10 Models for equilibrium moisture content

Crops	Model	Parameters		
		A	B	C
Barley	$RH_e = \exp \left[-\frac{A}{T + C} \times \exp (-BM_e^B) \right]$	475.12	0.14843	71.996
Wheat	$RH_e = 1 - \exp (-A(T + C) \times M_e^B)$	0.00001	2.54556	64.346
Rye	$RH_e = \exp \left[-\frac{A}{T + c} \times \exp (-BM_e^B) \right]$	475.12	0.15184	71.996
Rape	$RH_e = \exp (-\exp (A + B \times T) \times m_e^{-C})$	3.00260	0.0049	1.76070
Peas	$RH_e = 1 - \exp (-A (t + C) \times M_e^B)$	0.00003	2.18623	99.267
Grass seeds	$RH_e = \exp (-\exp (A + B \times T) \times M_e^{-C})$	4.43080	0.01553	1.96201
RH_e = relative humidity on equilibrium (%) T = air temperature (°C) M_e = moisture content (% wet basis) A, B, C = empirically determined parameters				

Table 11 Model equations

	DIFFERENTIAL EQUATION	CONDITIONS	SOLUTION
1)	$\frac{dM(t)}{dt} = c_1(M - M_{\min}) \sqrt{v} \Delta E$	$p \leq 0 \wedge D \leq 0 \wedge \Delta E > 0$	$M(t) = ((M(t)-d) - M_{\min}) \exp(c_1 \sqrt{v} \Delta E d) + M_{\min}$
2)	$\frac{dM(t)}{dt} = c_2(M - M_{\max}) \Delta E$	$p \leq 0 \wedge D \leq 0 \wedge \Delta E < 0$	$M(t) = ((M(t)-d) - M_{\max}) \exp(c_2 \Delta E d) + M_{\max}$
3)	$\frac{dM(t)}{dt} = c_3(M - M_{\max}) \sqrt{pd}$	$p > 0$	$M(t) = ((M(t)-d) - M_{\max}) \exp(c_3 \sqrt{pd^2}) + M_{\max}$
4)	$\frac{dM(t)}{dt} = c_4(M - M_{\max}) d$	$p \leq 0 \wedge D > 0$	$M(t) = ((M(t)-d) - M_{\max}) \exp(c_4 d^2) + M_{\max}$

Table 12 Model parameters

	c_1	c_2	c_3	c_4	$M_{\max}$	$M_{\min}$	RMS_{est}	$RMS(91)$	$RMS(93)$
Barley	0.006	0.02	0.15	0.01	35	11	0.079	0.085	0.091
Wheat	0.005	0.04	0.15	0.01	35	11	0.044	0.065	
Rye	0.006	0.02	0.1	0.01	35	11	0.036	0.060	0.075
Rape	0.008	0.001	0.08	0.001	40	4	0.063		0.054
Peas	0.005	0.01	0.03	0.01	34	11	0.032	0.057	
Grass seeds	0.0015	0.01	0.05	0.001	70	11	0.078		0.055

$M_{\max}$ = maximum limit for moisture content
 $M_{\min}$ = minimum limit for moisture content
 RMS = average relative deviation
 RMS_{est} = relative deviation between recorded data and the 1992 model, where the parameters C_1 , C_2 , C_3 and C_4 have been estimated
 $RMS(91)$; $RMS(93)$ = relative deviation between recorded data and model, when the model validation is based on 1991 or 1993 data

Table 13 Calculated average relation between upper limit for moisture content and utilization ratio.
Utilization ratio = potentiel time of operation in per cent of the total time (24 hours a day).

Figures for width of variation (min.-max.) are indicated in brackets.

Based on meteorological data from Karup

Moisture content	14%	18%	22%
Spring barley	3.5 (0-17)	20.7 (6-40)	32.2 (14-44)
Vinter barley	4.1 (0-21)	22.9 (2-39)	35.9 (10-48)
Winter wheat	2.8 (0-16)	21.1 (6-39)	32.6 (14-43)
Winter rye	5.6 (0-22)	28.6 (6-48)	38.3 (9-48)
Spring rape	12.2 (0-33)	28.4 (16-40)	35.3 (20-40)
Vinter rape	13.4 (0-34)	28.0 (7-41)	37.4 (17-45)
Pulse	1.8 (0-18)	24.0 (4-41)	35.9 (18-43)
Seed grass	0.0	4.2 (0-17)	16.2 (0-46)

Table 14 Calculated average relation between upper limit for moisture content and utilization ratio.
 Figures for width of variation (min.-max.) are indicated in brackets.
 Based on meteorological data from Værløse

Moisture content	14%	18%	22%
Spring barley	5.8 (0-20)	26.6 (12-46)	37.4 (21-49)
Vinter barley	7.2 (0-30)	30.4 (6-45)	42.3 (28-49)
Winter wheat	4.8 (0-26)	27.2 (12-46)	40.5 (27-48)
Winter rye	7.9 (0-28)	33.8 (12-47)	42.5 (28-49)
Spring rape	14.0 (0-38)	34.2 (17-47)	41.9 (24-48)
Vinter rape	18.9 (0-43)	35.9 (16-47)	42.7 (29-48)
Pulse	2.1 (0-10)	28.9 (4-48)	42.2 (21-50)
Seed grass	0.0	5.3 (0-21)	18.6 (0-46)

Table 15 Prerequisites for example of calculation

	Winter wheat	Spring barley	Spring rape	Peas
A, ha	50	25	50	25
U_h , t/ha	5.0	3.1	3.0	2.0
ϵ	0.70	0.70	0.66	0.66
R, hours ⁻¹	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
U_k , t/ha	7.0	4.4	2.0	4.0
V, DKK/t	1300	1300	1290	2000
E (aver.), 18% moisture content	0.21	0.21	0.28	0.24
X	2	2	2	2
i	1	2	3	4

A = areal of individual crops

U_h = straw yield

ϵ = efficiency factor (cf. Chapter 2.1.1.4)

R = hourly crop reduction (cf. Chapter 5.1)

U_k = grain yield

V = crop value

E = utilization ratio (based on meteorological data from Karup - cf. Table 13)

X = planning factor (cf. Chapter 5.1)

i = arbitrary enumeration of crop

Table 16 Cost reduction on distribution of ripening interval. The economical consequences of the timeliness effect are included

Distribution of ripening interval, days	0	3	6	9	12
Relative harvesting costs (%)	100	94	84	80	78

Table 17 Costs per ha at varying degrees of efficiency

Efficiency	Costs, DKK/ha
0.5	1140
0.6	1017
0.7	925
0.8	853
0.9	794

Table 18 Coefficients of utilization as a function of time at 18% moisture content and weather conditions represented by the 50% quantile

Date	Coefficient of utilization
1/8 - 5/8	33
5/8 - 10/8	33
10/8 - 15/8	64
15/8 - 20/8	64
20/8 - 25/8	121
25/8 - 30/8	121

Table 19 Relative capacity demand for different crop compositions and weather conditions. The 80% quantile indicates the demand sufficient for 80% of the seasons. Cropping Sequence I comprises 10% of winter crops, while Cropping Sequence II comprises 85%

Crops	ha	Capacity demand (net)				
		Best year	20% quantile	50% quantile	80% quantile	Worst year
CROPPING SEQUENCE I						
Winter wheat	12					
Spring barley	36	15	17	25	51	100
Spring rape	12					
Peas	12					
CROPPING SEQUENCE II						
Winter wheat	24					
Winter rape	12					
Winter barley	12	8	10	14	26	50
Grass seeds	12					
Spring barley	12					

Table 20 Harvested crops in August

Crop	Area (ha) (thousands)	Correction factor	Harvesting period	Standard crop area (thousands)
Winter wheat	610	0.68	20/8 - 30/8	798
Winter rye	79	0.52	10/8 - 20/8	135
Spring barley	538	0.73	10/8 - 25/8	656
Oats	31	0.73	20/8 - 30/8	38
Pulse	121	0.65	10/8 - 20/8	166
Winter rape	137	0.71	1/8 - 20/8	172
Spring rape	27	0.71	15/8 - 25/8	34

Table 21 Calculation of number of standard combines

Width of cutter bar m	Number of combines	Net capacity ha/h	Number of standard combines
< 3.4	22402	1.28	28674
3.4 - 4.3	5882	1.57	10804
> 4.5	3309	2.14	7081
Total	31460		46559

Table A1 Utilization ratio for the simulation years used. Based on meteorological data from Karup

YEAR	Spring barley			Winter barley			Winter wheat			Winter rye		
	14%	18%	22%	14%	18%	22%	14%	18%	22%	14%	18%	22%
1962	0.0	18.7	34.2	0.0	22.7	39.4	0.0	15.1	31.3	0.0	5.6	32.6
1963	0.0	10.3	24.0	0.4	33.0	46.1	0.0	5.9	22.4	0.0	17.5	29.4
1964	0.0	17.9	32.4	0.0	10.3	33.0	1.3	16.2	33.8	0.0	35.4	41.3
1965	0.9	8.7	27.7	0.0	5.0	16.7	0.0	7.0	26.3	0.0	27.8	42.9
1966	0.0	21.9	33.1	0.0	15.1	33.0	0.8	19.6	32.0	0.0	35.4	38.2
1967	0.7	13.5	36.4	4.1	27.8	41.7	0.0	34.3	40.2	1.3	35.0	46.1
1968	3.6	21.9	29.8	3.0	35.8	46.9	3.3	20.7	34.9	3.7	20.7	35.0
1969	9.2	39.7	39.3	20.7	37.0	44.5	4.2	21.1	31.3	13.4	37.4	43.3
1970	3.9	27.8	36.0	4.1	21.1	28.6	8.8	29.4	35.9	10.4	37.0	40.1
1971	1.0	6.4	22.2	3.4	12.7	21.1	2.9	25.6	40.5	3.7	30.2	38.6
1972	0.0	5.8	21.5	0.0	5.0	10.0	0.0	7.0	18.1	0.0	13.9	33.4
1973	3.9	19.5	30.6	9.8	39.4	46.9	0.0	26.0	37.7	1.7	25.8	38.6
1974	0.5	23.1	32.4	9.0	39.0	47.7	0.0	26.4	40.5	1.7	27.8	42.1
1975	16.8	38.6	41.9	0.0	2.0	17.9	4.6	13.2	18.8	21.8	36.6	39.7
1976	12.4	15.9	36.0	0.0	13.9	33.8	0.0	20.3	37.7	4.0	45.3	47.7
1977	2.5	13.5	20.4	0.0	12.3	29.4	4.6	24.9	31.3	10.4	37.0	40.5
1978	2.1	23.8	32.8	11.3	19.5	29.4	4.2	31.6	35.9	5.0	34.6	41.3
1979	1.4	8.7	14.0	0.8	9.9	27.4	0.0	9.4	16.7	1.7	7.6	9.1
1980	0.0	9.5	30.6	4.1	17.9	27.8	0.0	15.1	27.4	0.0	13.9	31.4
1981	0.0	7.0	20.0	0.8	7.2	20.3	0.0	12.4	30.2	0.3	14.7	29.4
1982	3.2	14.7	26.2	4.1	32.2	47.7	0.0	6.1	13.9	0.0	6.4	23.1
1983	6.0	32.2	38.6	14.7	35.0	43.7	10.0	32.0	38.4	15.1	40.5	43.7
1984	7.1	35.8	43.0	0.0	33.0	45.7	5.0	28.6	39.5	8.4	45.7	47.7
1985	6.0	33.8	40.8	11.3	35.0	42.9	8.4	35.0	40.9	15.7	34.2	42.5
1986	0.7	27.4	32.0	5.6	37.4	44.5	0.8	21.5	31.3	7.4	28.2	36.2
1987	4.6	33.8	43.7	0.0	21.5	29.8	6.7	36.5	42.7	0.0	23.5	34.2
1988	1.1	22.3	36.4	6.0	35.8	46.1	2.9	26.4	39.1	7.7	38.2	46.1
1989	16.4	40.0	39.3	0.8	29.8	47.3	15.5	39.2	38.4	22.1	41.7	43.3
1990	0.0	22.7	36.0	8.7	26.6	41.3	0.0	21.5	35.2	11.4	47.7	47.7
1991	0.0	6.0	35.3	0.0	15.1	47.7	0.0	6.0	34.5	0.0	14.3	43.7
Average	3.5	20.7	32.2	4.1	22.9	35.9	2.8	21.1	32.6	5.6	28.6	38.3
Maximum	16.8	40.0	43.7	20.7	39.4	47.7	15.5	39.2	42.7	22.1	47.7	47.7
Minimum	0.0	5.8	14.0	0.0	2.0	10.0	0.0	5.9	13.9	0.0	5.6	9.1
Standard deviation	4.7	10.8	7.5	5.3	11.8	11.1	3.9	9.9	7.9	6.7	12.2	8.2
80% quantile	0.0	9.4	25.8	0.0	11.9	27.7	0.0	11.8	27.2	0.0	14.6	33.2
50% quantile	1.2	20.7	32.9	1.9	22.1	40.3	0.8	21.3	34.7	2.7	32.2	40.3
20% quantile	6.0	32.5	38.7	8.7	35.1	46.3	4.7	29.8	39.2	10.6	37.5	43.7

Table A1 (continued)

YEAR	Spring rape			Winter rape			Pulse			Seed grass		
	14%	18%	22%	14%	18%	22%	14%	18%	22%	14%	18%	22%
1962	3.7	25.1	34.5	10.0	29.9	38.0	0.0	11.7	35.9	0.0	0.0	4.6
1963	5.4	28.1	37.5	8.2	23.5	33.5	0.0	6.0	29.2	0.0	0.0	11.7
1964	0.0	18.7	32.1	4.6	26.0	39.9	0.0	21.7	39.1	0.0	0.0	8.4
1965	3.7	17.7	20.1	0.0	15.3	33.5	0.0	3.6	35.6	0.0	2.9	15.9
1966	5.7	26.1	34.5	1.8	10.0	23.3	0.0	29.9	34.5	0.0	4.6	26.4
1967	8.0	20.1	32.5	16.0	31.7	39.2	0.0	36.3	41.6	0.0	12.6	33.9
1968	10.4	29.8	35.5	26.3	40.9	45.2	1.3	28.5	41.3	0.0	0.0	0.0
1969	18.1	37.8	40.2	34.1	38.4	45.2	2.9	21.7	31.3	0.0	17.2	45.6
1970	20.8	36.5	39.5	22.4	35.9	41.0	7.9	36.3	38.4	0.0	0.0	0.0
1971	24.4	38.2	40.2	10.7	20.6	27.9	1.3	31.7	37.7	0.0	0.0	7.1
1972	14.4	31.8	38.5	0.0	7.1	17.3	0.0	4.3	30.9	0.0	0.0	11.3
1973	14.4	31.8	37.8	27.7	39.8	44.8	0.0	33.4	42.7	0.0	8.4	15.5
1974	12.1	26.4	34.1	28.1	40.5	45.2	0.0	35.6	42.7	0.0	9.2	23.4
1975	19.7	35.5	40.2	0.0	11.7	23.7	2.9	12.8	18.5	0.0	0.0	0.0
1976	10.4	23.1	32.5	8.5	27.0	39.9	0.0	38.1	42.7	0.0	0.0	17.2
1977	9.4	20.1	29.5	7.1	22.4	33.1	2.9	19.2	29.2	0.0	0.0	0.8
1978	15.7	30.5	32.8	27.0	36.6	42.2	0.0	33.1	39.5	0.0	11.3	20.9
1979	12.7	27.1	31.5	4.6	16.4	34.3	0.0	12.8	18.1	0.0	0.0	10.0
1980	16.4	30.5	32.5	8.9	17.8	26.4	0.0	9.6	33.1	0.0	3.8	6.7
1981	12.4	29.8	32.8	11.7	23.8	33.9	0.0	9.2	23.1	0.0	0.0	0.0
1982	33.5	39.8	40.2	19.9	38.4	45.2	2.1	15.3	28.8	0.0	6.3	33.1
1983	21.4	39.5	40.2	27.0	36.6	43.3	3.3	34.1	39.8	0.0	12.6	40.6
1984	19.1	35.5	38.5	11.4	35.9	45.2	6.3	41.3	42.7	0.0	6.3	44.4
1985	12.4	33.8	36.2	6.4	25.3	32.0	0.0	24.5	42.0	0.0	3.8	7.1
1986	3.7	16.1	31.8	19.6	41.3	45.2	0.0	31.7	39.8	0.0	3.3	12.1
1987	7.0	28.8	35.8	2.8	13.9	26.4	5.9	36.6	42.7	0.0	0.0	0.0
1988	13.1	25.1	32.8	20.6	36.3	43.7	0.0	25.6	40.9	0.0	2.5	15.1
1989	16.4	34.5	36.2	21.0	34.9	44.1	18.4	37.3	40.5	0.0	14.2	25.9
1990	1.7	16.1	40.2	12.4	37.0	45.2	0.0	19.9	30.9	0.0	5.9	34.7
1991	0.0	18.7	38.5	2.8	25.9	45.2	0.0	19.2	42.8	0.0	0.0	15.0
Average	12.2	28.4	35.3	13.4	28.0	37.4	1.8	24.0	35.9	0.0	4.2	16.2
Maximum	33.5	39.8	40.2	34.1	41.3	45.2	18.4	41.3	42.8	0.0	17.2	45.6
Minimum	0.0	16.1	20.1	0.0	7.1	17.3	0.0	3.6	18.1	0.0	0.0	0.0
Standard deviation	7.7	7.2	4.4	10.0	10.4	8.2	3.8	11.5	7.2	0.0	5.1	13.9
80% quantile	5.0	20.1	32.5	4.3	17.5	31.2	0.0	12.6	30.6	0.0	0.0	3.8
50% quantile	12.4	29.3	35.6	11.0	28.5	39.9	0.0	25.1	38.8	0.0	2.7	13.6
20% quantile	18.3	35.5	39.6	23.2	37.3	45.2	2.9	35.7	42.1	0.0	8.5	27.7

Table A2 Utilization ratio for the simulation years used. Based on meteorological data from Værløse

YEAR	Spring barley			Winter barley			Winter wheat			Winter rye		
	14 %	18 %	22 %	14 %	18 %	22 %	14 %	18 %	22 %	14 %	18 %	22 %
1962	1.7	39.3	21.3	0.0	14.6	35.3	1.7	39.3	47.9	0.0	28.4	28.4
1963	0.4	20.9	26.2	8.4	41.8	45.9	0.0	17.6	39.4	2.1	21.1	40.6
1964	0.0	14.2	34.5	0.0	15.5	36.5	0.0	12.6	41.0	0.0	28.8	43.8
1965	0.0	11.7	43.0	0.0	7.5	29.6	0.0	12.1	43.0	0.0	34.9	47.5
1966	0.0	15.9	31.3	0.0	17.6	39.4	0.0	17.2	31.7	0.0	37.3	43.4
1967	0.0	16.7	26.4	8.8	30.5	47.1	0.8	26.4	42.2	1.7	34.1	41.0
1968	2.1	13.8	28.4	0.8	29.7	47.9	0.0	11.7	28.8	3.3	15.0	34.5
1969	10.5	34.3	46.3	17.6	34.3	43.0	1.3	15.9	33.7	5.9	34.1	43.4
1970	7.5	33.5	38.6	0.0	20.1	34.1	5.4	31.0	38.2	13.8	37.3	39.0
1971	5.0	25.9	37.3	12.6	36.4	46.7	8.0	46.0	48.7	19.7	41.4	44.2
1972	9.6	25.9	30.0	6.3	40.2	46.3	7.1	38.5	45.9	4.2	30.0	40.2
1973	4.6	21.3	32.1	10.0	42.7	47.9	0.0	28.9	40.6	2.1	26.8	36.5
1974	4.2	20.9	33.3	10.9	39.7	45.1	0.0	28.9	40.2	1.7	26.4	36.5
1975	15.0	43.0	48.7	4.2	27.2	41.8	12.6	27.2	41.4	28.0	39.4	46.3
1976	20.0	14.2	35.3	2.0	14.6	30.4	26.0	29.3	44.6	0.0	45.5	48.7
1977	4.6	20.1	26.8	0.0	18.4	29.6	1.3	28.0	37.7	5.4	45.1	48.7
1978	3.8	40.2	48.7	13.0	36.8	48.3	9.2	33.1	41.4	16.3	46.7	48.7
1979	6.7	41.0	46.7	7.5	37.7	42.2	0.0	28.9	36.9	11.7	43.0	46.7
1980	0.0	16.7	29.2	7.1	33.1	42.6	0.0	13.4	32.9	2.5	26.0	37.3
1981	4.2	25.5	36.9	8.4	34.7	38.6	13.0	34.3	38.6	1.3	26.0	37.3
1982	11.7	28.0	41.0	30.0	44.0	48.7	3.3	17.2	42.2	3.3	16.6	40.6
1983	17.0	44.0	48.7	25.1	44.8	48.7	18.0	46.1	48.7	27.0	45.0	48.7
1984	13.8	42.0	48.7	6.7	44.2	48.7	11.3	46.0	48.7	18.8	46.0	48.7
1985	7.1	45.6	48.7	8.4	38.1	47.1	7.9	43.1	48.7	8.4	39.0	42.2
1986	10.0	34.7	42.2	7.9	37.7	41.8	5.9	30.1	42.2	12.1	37.3	39.4
1987	0.0	11.7	27.6	0.0	6.3	28.4	0.0	13.8	27.2	0.0	11.8	34.9
1988	0.0	16.3	43.0	2.9	33.5	48.7	0.0	20.5	38.6	12.6	45.5	48.7
1989	12.1	39.7	40.6	4.2	41.0	43.8	10.0	38.1	40.2	22.6	37.3	40.6
1990	2.1	28.5	35.3	14.2	41.8	45.9	2.1	28.5	35.3	12.6	47.1	48.7
1991	0.0	11.7	43.8	0.0	6.3	48.7	0.0	13.8	48.7	0.0	22.3	48.7
Average	5.8	26.6	37.4	7.2	30.4	42.3	4.8	27.2	40.5	7.9	33.8	42.5
Maximum	20.0	45.6	48.7	30.0	44.8	48.7	26.0	46.1	48.7	28.0	47.1	48.7
Minimum	0.0	11.7	21.3	0.0	6.3	28.4	0.0	11.7	27.2	0.0	11.8	28.4
Standard deviation	5.8	11.4	8.2	7.4	12.3	6.6	6.4	11.0	5.9	8.6	10.2	5.4
80% quantile	0.0	15.6	29.1	0.0	17.2	36.3	0.0	15.5	36.6	0.0	26.0	37.3
50% quantile	4.4	25.7	37.1	6.9	34.5	44.4	1.5	28.7	40.8	3.8	36.1	42.8
20% quantile	10.7	39.8	46.3	11.2	41.2	48.0	9.4	38.2	46.3	14.3	45.1	48.7

Table A2 (continued)

YEAR	Spring rape			Winter rape			Pulse			Seed grass		
	14%	18%	22%	14%	18%	22%	14%	18%	22%	14%	18%	22%
1962	7.9	36.2	44.9	3.8	20.7	36.6	0.0	41.0	50.2	0.0	10.0	13.5
1963	4.1	29.8	40.9	21.8	39.4	42.9	0.0	13.8	42.3	0.0	0.0	5.3
1964	6.0	33.4	44.5	4.1	36.6	45.7	0.0	7.1	34.3	0.0	0.0	13.5
1965	0.0	22.3	38.2	0.0	20.3	40.9	0.0	25.5	46.0	0.0	0.0	9.6
1966	4.1	21.1	23.8	1.9	16.7	33.0	0.0	4.2	41.8	0.0	3.5	18.3
1967	6.4	31.0	40.9	16.9	39.4	47.3	0.0	35.1	40.6	0.0	5.5	30.3
1968	9.0	23.8	38.6	24.1	45.7	47.7	0.0	42.7	49.0	0.0	15.1	39.0
1969	11.7	35.4	42.1	31.6	45.7	47.7	0.0	33.5	48.5	0.0	0.0	0.0
1970	20.3	44.9	47.7	10.5	25.8	31.0	0.0	25.5	36.8	0.0	20.6	46.1
1971	23.3	43.3	46.9	26.0	43.7	47.7	7.0	42.7	45.2	0.0	0.0	0.0
1972	27.5	45.3	47.7	25.2	43.7	46.9	8.0	37.2	44.4	0.0	0.0	8.2
1973	16.2	37.8	45.7	30.1	44.5	47.3	8.5	5.0	36.4	0.0	0.0	13.0
1974	16.2	37.8	44.9	29.0	42.1	44.1	0.0	39.3	50.2	0.0	10.0	17.8
1975	13.6	31.4	40.5	8.7	31.8	39.4	9.0	41.8	50.2	0.0	11.0	26.9
1976	22.2	42.1	47.7	8.3	21.9	29.0	10.0	15.1	21.8	0.0	0.0	0.0
1977	11.7	27.4	38.6	12.4	25.0	30.2	0.0	44.8	50.2	0.0	0.0	19.7
1978	10.5	23.8	35.0	27.9	45.3	47.7	0.0	22.6	34.3	0.0	0.0	1.0
1979	17.7	36.2	39.0	21.1	38.2	42.5	0.0	38.9	46.4	0.0	13.6	24.1
1980	14.3	32.2	37.4	18.1	37.4	42.9	0.0	15.1	21.3	0.0	0.0	11.5
1981	18.5	36.2	38.6	27.1	46.9	47.7	0.0	11.3	38.9	0.0	4.5	7.7
1982	13.9	35.4	39.0	42.9	46.0	47.7	5.0	10.9	27.2	4.2	0.0	35.0
1983	37.7	47.3	47.7	33.5	44.5	47.7	9.0	18.0	33.9	0.0	7.5	38.0
1984	24.1	46.9	47.7	26.7	46.9	47.7	0.0	40.2	46.9	0.0	15.1	42.0
1985	21.5	42.1	45.7	14.3	34.6	44.1	0.0	48.5	50.2	0.0	7.5	33.0
1986	13.9	40.1	42.9	31.3	44.5	45.7	0.0	28.9	49.4	0.0	4.5	8.2
1987	4.1	19.1	37.8	0.0	15.9	37.0	0.0	37.2	46.9	0.0	4.0	14.0
1988	7.9	34.2	42.5	15.4	35.8	43.7	0.0	43.1	50.2	0.0	0.0	0.0
1989	14.7	29.8	39.0	18.1	26.6	33.8	7.1	30.1	48.1	0.0	3.0	17.3
1990	18.5	40.9	42.9	33.5	45.0	47.7	0.0	43.9	47.7	0.0	17.1	28.1
1991	1.9	19.1	47.7	1.1	26.2	47.7	0.0	23.4	36.4	0.0	7.0	37.5
Average	14.0	34.2	41.9	18.9	35.9	42.7	2.1	28.9	42.2	0.0	5.3	18.6
Maximum	37.7	47.3	47.7	42.9	46.9	47.7	10.0	48.5	50.2	0.0	20.6	46.1
Minimum	0.0	19.1	23.8	0.0	15.9	29.0	0.0	4.2	21.3	0.0	0.0	0.0
Standard deviation	8.4	8.3	5.2	11.8	10.1	6.1	3.7	13.7	8.4	0.0	6.2	14.0
80% quantile	6.3	26.7	38.6	7.5	25.7	36.9	0.0	14.8	36.0	0.0	0.0	7.2
50% quantile	13.9	35.4	42.3	19.6	38.8	44.9	0.0	31.8	45.6	0.0	3.8	15.6
20% quantile	20.6	42.1	47.1	29.2	45.1	47.7	7.0	42.0	49.5	0.0	10.2	33.4

