



Udvikling og validering af modellen MARKVAND til vandingstyring i landbruget

*Development and validation of the model
MARKVAND for irrigation scheduling in
agriculture*

Finn Plauborg og Jørgen E. Olesen
Afdeling for Jordbrugsmeteorologi
Forskningscenter Foulum
8830 Tjele



Statens
Planteavlscenter
Løttrupvej 12
2600 Lyngby 1991 10

Udvikling og validering af modellen MARKVAND til vandingstyring i landbruget

*Development and validation of the model
MARKVAND for irrigation scheduling in
agriculture*

Danmarks JordbrugsForskning
Biblioteket
Forskningscenter Flakkebjerg
4200 Slagelse

Finn Plauborg og Jørgen E. Olesen
Afdeling for Jordbrugsmeteorologi
Forskningscenter Foulum
8830 Tjele

Forord

Statens Planteavlsforsøg iværksatte i 1986 i samarbejde med Landskontoret for Planteavl forskning og udviklingsarbejde vedrørende modeller, der kan implementeres i MARKSTYRING og anvendes til beslutningsstøtte i landbruget.

For at forbedre udnyttelsen af landbrugets betydelige investeringer i markvandingsanlæg blev en del af aktiviteterne rettet mod udvikling af en vandingstyringsmodel. Formålet var at udvikle en model, der kan anvise vandingstidspunkter og vandingsmængder under udnyttelse af automatisk registrerede meteorologiske data samt få data vedrørende landbrugsbedriften.

Denne rapport beskriver opbygning og afprøvning af det udviklede EDB-baserede vandingstyringssystem, der kaldes MARKVAND.

Et stort datamateriale med jordvandsmålinger er anvendt til validering af vandbalancemodellen i MARKVAND-systemet. I forbindelse hermed har landbrugstekniker Jens Peter Toft og videnskabelig medarbejder Mathias Andersen, Afd. for Kulturteknik gjort en stor indsats for at systematisk EDB-registrere data fra vandingforsøg udført af Jydevad Forsøgsstation.

Forskningsaktiviteterne er gennemført med finansiering fra Landbrugets Samråd for Forskning og Forsøg under projekterne "Styring af vanding og udnyttelse af meteorologiske data gennem MARKSTYRING" og "Modeludvikling for beslutningstagning via markstyrings-systemet", samt med finansiering fra Landbrugsministeriets Forskningssekretariat under projektet "Reduktion af landbrugets vandingssomkostninger".

Foulum, december 1990

Finn Plauborg

Jørgen E. Olesen

Indholdsfortegnelse

Forord	3
Resumé	7
Summary	8
1 Indledning	9
2 Meteorologiske data	10
2.1 Klimagrid for Danmark	10
2.2 Normalværdier for klimagridet	13
3 MARKVAND systembeskrivelse	15
3.1 Afgrødemodel	15
3.1.1 Græsafgrøder	22
3.1.2 Vårafgrøder	26
3.1.3 Vinterafgrøder	28
3.2 Jordtyper og vandkapaciteter	37
3.3 Vandbalancemodel	39
3.4 Beslutningsmodel for vanding	47
3.5 Databeskrivelse	49
3.5.1 Datastruktur	49
3.5.2 Inddata	51
3.5.3 Valgfrie inddata	53
3.5.4 Betydning af brugerobservationer	55
3.5.5 Uddata	55
4 Modelvalidering	57
4.1 Forsøgsdata fra Foulum	58
4.2 Forsøgsdata fra Jyndevad	64
4.3 Diskussion af analysemetoder og resultater	82
5 Systemafprøvning	88
6 Konklusion	89
7 Litteratur	91
A Symbolliste	96

Resumé

MARKVAND er et EDB-baseret vandingsstyringssystem til støtte for beslutning om vanding i landbruget på bedriftsniveau. Systemet anviser i sin nuværende form vandinger på markniveau i en 5-døgns prognoseperiode. Systemet indeholder endnu ikke nogen prioritering mellem afgrøder og marker, såfremt vandingskapaciteten er begrænset.

MARKVAND-systemet er opbygget af empiriske modeller, herunder en afgrødemodel, en vandbalancemodel, en beslutningsmodel samt en brugergrænseflade til håndtering af ind- og uddata.

Systemet benytter potentiel fordampning og middeltemperatur for døgnet beregnet i et landsdækkende klimagrid, der består af 44 kvadrater af størrelsen 40×40 km. Bladareal- og rodudvikling samt fænologisk udvikling beregnes i afgrødemodellen på baggrund af temperatursummer. I vandbalancemodellen beregnes daglige værdier for aktuel fordampning, afdræning og jordvandsunderskud i rodzonen på baggrund af beregnet afgrødeudvikling, jordfysiske data samt klimatiske elementer, herunder potentiel fordampning samt lokal nedbør og vanding. I beslutningsmodellen beregnes vandingsforslag, såfremt det relative jordvandsunderskud overskrider en afgrødeafhængig tørkefølsomhedsparameter.

Vandbalancemodellen er afprøvet ved anvendelse af målinger af jordvandindhold ved Jyndevad, Borris og Foulum. Resultaterne viser, at usikkerheden på den målte fordampning er stor. Generelt findes ingen statistisk sikker afvigelse mellem beregnet og målt fordampning fra en række afgrøder. På baggrund af dataanalyserne kan konkluderes, at vandbalancemodellen generelt beregner korrekte værdier for daglig aktuel fordampning.

MARKVAND har i vækstsæsonerne 1988-90 været afprøvet på flere konsulentcentre samt i 1990 direkte hos enkelte landmænd. Afprøvningerne har medført, at systemet på flere måder er tilpasset krav og ønsker fra brugerne. Sammenfattende kan det på grundlag af afprøvningerne konkluderes, at MARKVAND-systemet er et velegnet værktøj til støtte for beslutninger om vanding på landbrugsbedrifter. Det er dog et ønske fra brugerne, at få systemet udvidet til at opstille en prioriteret rækkefølge af de afgrøder og marker, der bør vandes, når vandingskapaciteten er utilstrækkelig.

Summary

MARKVAND is a computer based system developed to support decisions on irrigation scheduling at farm level. At present the system recommends irrigation dates and amounts for a 5-days forecast period. The system does not at present adjust the recommendation for actual irrigation capacity.

The system includes empirical models and a user interface handling data input and output. In the water balance model daily values of actual evapotranspiration, soil water deficit in the actual root zone and deep percolation are calculated for each field on the basis of daily grid-square inputs of potential evapotranspiration and temperature, calculated crop development plus daily precipitation and irrigation measured on farm. Crop development in terms of LAI, root growth and phenological stages is calculated on the basis of temperature sums. Irrigation is proposed if the calculated soil water deficit exceeds a crop dependent allowable soil water deficit.

The water balance model is validated using soil water measurements from Jynde vad, Borris and Foulum. Analyses show a large variation in the measured evapotranspiration. In general there is no statistical significant differences between measured and calculated actual evapotranspiration. From the analyses it can be concluded that fairly good estimates of daily actual evapotranspiration can be calculated with the water balance model.

The MARKVAND-system was evaluated by agricultural advisers during the growing seasons 1988-90. In 1990 the system was also tested locally on farms. Criticism and ideas extracted from these evaluations have been responsible for several changes in the system. In general it can be concluded from the evaluations that the MARKVAND-system is a useful tool for irrigation management on farm. Further development on the system should include a priority model handling irrigation scheduling among crops when irrigation capacity is scarce.

1 Indledning

Vand indgår og forbruges i mange af samfundets sektorer, herunder husholdning, industri, gartneri og landbrug. Vandressourcen i Danmark er imidlertid ikke ubegrænset, og forbrugsmulighederne reguleres via lovgivningen. I landbrugssektoren skal en produktionsenhed ifølge lov om vandforsyning indhente tilladelse til indvinding af vand til markvanding.

Vandfaktoren er i dag i højere grad end tidligere blevet den begrænsende faktor for planteproduktionens størrelse. Dette kan forklares ved, at udbytteneiveauet i de senere årtier har været stigende på grund af dyrkningen af højtstående sorter, anvendelsen af kemiske bekæmpelsesmidler, samt sikringen af tilstrækkelig tilførsel af næringsstoffer. Vandingsforsøg har vist, at det for flere afgrøder er muligt at opnå samme udbytte på sand- og lerjord (Knudsen, 1978 og Jørgensen, 1985). Vanding til landbrugsafgrøder anvendes derfor i stigende grad især for at stabilisere produktionen. Denne udvikling har været fremherskende på de lettere jorde, hvor de grovsandede jorde udgør ca. 700.000 ha eller ca. 25 % af det dyrkede landbrugsareal. Antal landbrugsbedrifter med vandingsanlæg er i perioden 1972-85 steget fra 5161 til 14308, og det vandede areal steg i samme periode fra 4.4 til 14.3 % af det dyrkede landbrugsareal (Knudsen, 1978 og Danmarks Statistik, 1986).

Planlægning og styring af vanding er vigtig, da vanding er en omkostningskrævende faktor i planteproduktionen. Endvidere medfører den stigende anvendelse af vanding en øget risiko for udvaskning i vækstsæsonen, især på de lettere jorde. Forskellige metoder kan anvendes til styring af vanding (Jørgensen, 1985). I praksis anvendes ofte beregnet nedbørsunderskud til styring af vandingen. Nedbørsunderskud beregnes på baggrund af målt nedbør på ejendommen samt data fra et landsdækkende net af fordampningsmålere, der aflæses manuelt en gang om ugen. Metodens anvendelse er nærmere beskrevet af Aslyng (1978), Gregersen og Knudsen (1981) og Andersen (1989).

Anvendelse af modelberegninger og EDB-teknik giver nye muligheder for at følge, styre og planlægge vandingen på bedrifts- og markniveau. Denne rapport beskriver et sådant EDB-system til styring af vanding. Systemet, der kaldes MARKVAND, indeholder flere modeller, herunder en vandbalancemodel. I rapporten er der redegjort for afprøvningen af denne model på data indsamlet af Statens Planteavlsvforsøg. Endvidere er gengivet hovedresultater fra flere års afprøvning af MARKVAND-systemet på konsulentcentre samt direkte hos enkelte landmænd med egen PC'er.

2 Meteorologiske data

Der indsamles i Danmark meteorologiske data i en række forskellige stationsnet (Mikkelsen et al., 1983). Hovedparten af disse målinger administreres af Danmarks Meteorologiske Institut. Det er dog kun fra to af disse stationsnet, at data er tidstro tilgængelige. Det drejer sig om data fra synopstationer og fra automatiske klimastationer.

Synopstationers registreringer anvendes som en del af udgangsmaterialet ved udarbejdelse af vejrkort og vejrprognoser. Ved synopstationerne observeres hver tredje time, kl. 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 og 21 GMT; ved nogle dog hver time, og ved andre kun i dagtimerne. Registreringerne omfatter bl.a. lufttemperatur, luftfugtighed, nedbør, vindhastighed og skydække.

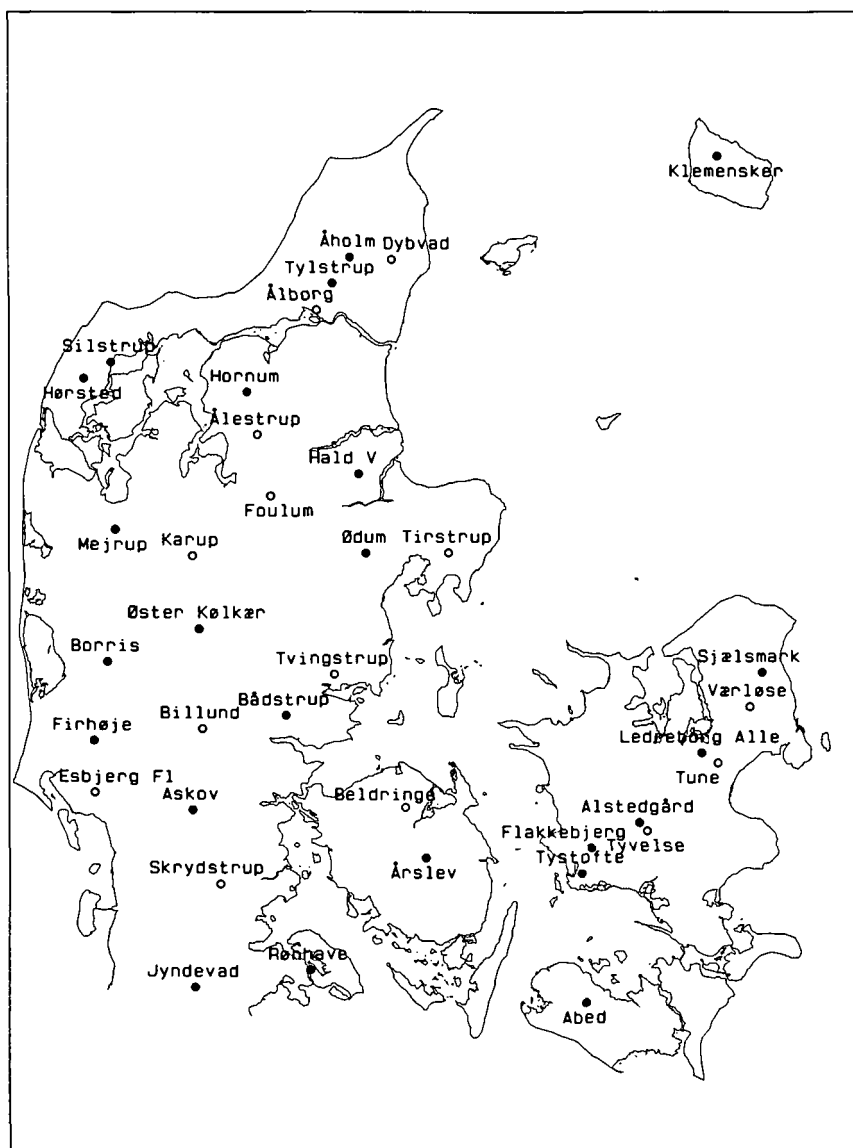
I 1987 etableredes et landsdækkende net af automatiske klimastationer med direkte indrapportering af målingerne til databasen på Danmarks Meteorologiske Institut (Olesen, 1988). Ved de automatiske klimastationer registreres timeværdier af bl.a. lufttemperatur, luftfugtighed, nedbør, vindhastighed og globalstråling.

En oversigt over de synopstationer og automatiske klimastationer, der benyttes som grundlag for beregning i klimagriddet, er vist i Figur 2.1. Der er ikke her medtaget stationer, som ligger i umiddelbar nærhed af kysten, da klimaet her kan afvige noget fra det generelle indlandsklima.

2.1 Klimagrid for Danmark

I forbindelse med modelberegninger anvendes traditionelt ofte meteorologiske data fra en nærtliggende meteorologisk station. Denne metode har i operationelle sammenhænge en række ulemper, som kan sammenfattes i tre hovedpunkter. For det første vil der undertiden være perioder med dataudfald ved enkelte stationer, som gør det nødvendigt i disse perioder at benytte data fra andre stationer. For det andet er der ofte små forskelle mellem stationernes registreringer, som ikke afspejler forskelle i makroklimaet, men forskelle i lokalklima ved de pågældende stationer. For det tredje kan det i operationel sammenhæng være besværligt at finde den nærmest liggende repræsentative station. Denne vanskelighed øges yderligere, hvis stationer nedlægges og nye oprettes.

For at overkomme disse vanskeligheder benyttes registreringerne fra de meteorologiske stationer til beregning af døgnværdier for meteorologiske elementer i en række geografiske punkter (kvadrater) jævnt fordelt over landet. Dette system kaldes klimagriddet. Værdierne i klimagriddet beregnes ved geografisk interpolation af data fra de meteorologiske



Figur 2.1: Danske synopstationer (o) og automatiske klimastationer (•) til beregning af værdier i klimagrid.

stationer. En tilsvarende procedure anvendes i det engelske MORECS-system (Thompson et al., 1981).

Klimagriddet består af 44 kvadrater på hver 40×40 km dækkende hele Danmark. Gridnettet er defineret i forhold til UTM zone 32. Koordinater for centrum i hvert kvadrat er givet i tabel B.1 i appendiks B. Figur 2.2 viser klimagriddets fordeling over Danmark.

For hvert element i gridnettet beregnes døgnværdier for en række meteorologiske elementer. Der skelnes mellem primære og sekundære elementer. De primære elementer beregnes ved interpolation ud fra registreringer ved meteorologiske stationer. De sekundære elementer beregnes ud fra de primære elementer i klimagriddet. De primære elementer er:

- Døgnmiddel temperatur i 0.2 og 2 m, $^{\circ}\text{C}$
- Døgn minimum temperatur i 0.2 og 2 m, $^{\circ}\text{C}$
- Døgn maksimum temperatur i 0.2 og 2 m, $^{\circ}\text{C}$
- Døgnmiddel jordtemperatur i 10 cm, $^{\circ}\text{C}$
- Døgnmiddel vindhastighed i 10 m, m s^{-1}
- Døgnmiddel relativ luftfugtighed i 2 m, %
- Døgnsum af globalstråling, MJ m^{-2}

Det sekundære element er:

- Døgnsum af potentiel fordampning, mm

Som grundlag for beregning af værdier i gridnettet benyttes døgnværdier af de primære elementer fra en række synopstationer og automatiske klimastationer, jf. figur 2.1. For synopstationer skal globalstråling først beregnes på grundlag af skydække (Olesen, 1990b).

Værdier til klimagriddet beregnes ved interpolation, hvor der benyttes en invers afstands-funktion til vægtning af registreringer fra de meteorologiske stationer (Mikkelsen, 1990). For hvert kvadrat i gridnettet beregnes interpolerede værdier for fire punkter beliggende på koordinater $(-15, -15)$, $(-15, 15)$, $(15, 15)$ og $(15, -15)$ i forhold til kvadratets midtpunkt, hvor afstande er angivet i km. Den interpolerede værdi for kvadratet beregnes som middelværdien af de fire punkter i kvadratet.

Ved interpolation af værdier i et punkt benyttes følgende fremgangsmåde:

1. Alle stationer, som har manglende værdier for det aktuelle element kasseres.
2. Afstandene d_{ij} mellem punktet i og stationerne j beregnes. Stationerne sorteres efter stigende afstand.

3. Alle stationer, som ligger nærmere end 60 km fra punktet udvælges. Hvis der ligger mere end 5 stationer inden for en radius af 60 km fra punktet udvælges kun de 5 nærmeste stationer. Hvis der ikke ligger stationer inden for 60 km fra punktet udvælges den nærmeste station.
4. For de udvalgte stationer beregnes den interpolerede værdi som

$$X_i = \sum_{j=1}^n \frac{X_j}{d_{ij}} / \sum_{j=1}^n \frac{1}{d_{ij}} \quad (2.1)$$

hvor X_i er den interpolerede værdi i punktet i , X_j er den observerede værdi på stationen j , d_{ij} er afstanden mellem punkt i og station j , og n er antallet af stationer.

Daglig potentiel fordampning E_p beregnes efter Makkink's ligning (Makkink, 1957) med modifikation af Aslyng og Hansen (1982):

$$E_p = 0.7 \frac{s}{s + \gamma} \frac{R_{si}}{\lambda} \quad (2.2)$$

hvor s er damptrykskurvens hældning ved temperaturen T i 2 m ($\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$), γ er psykometerkonstanten ($66.7 \text{ Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_{si} er globalstrålingen ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$), og λ er vands fordampningsvarme (2.465 MJ mm^{-1}).

2.2 Normalværdier for klimagriddet

MARKVAND benytter normalværdier for døgnmiddeltemperatur og daglig potentiel fordampning, såfremt tidstro værdier for disse meteorologiske elementer ikke kan beregnes. Den normale årsvariation i disse elementer beskrives ved Fourierrækker:

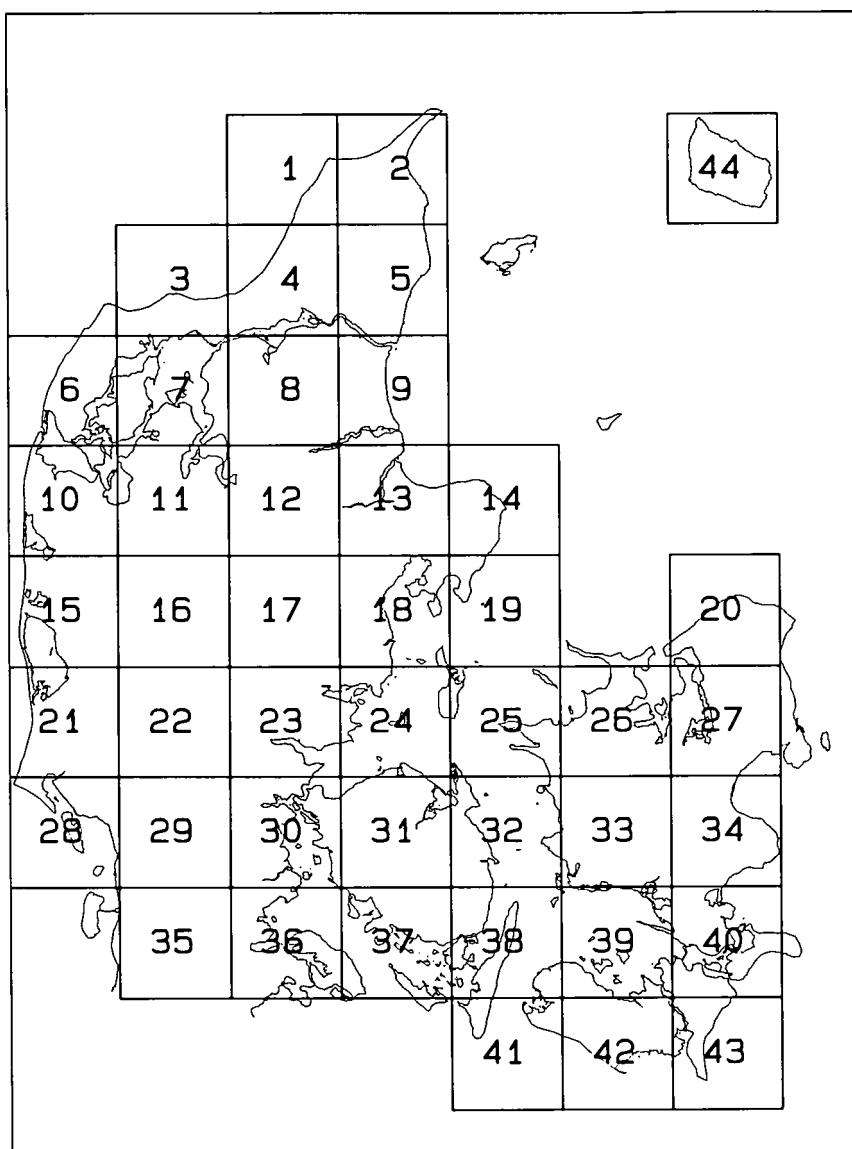
$$\bar{T}_i = \beta_0 + \beta_1 \cos(\omega) + \beta_2 \sin(\omega) + \beta_3 \cos(2\omega) + \beta_4 \sin(2\omega) \quad (2.3)$$

$$\bar{E}_{pi} = \beta_0 + \beta_1 \cos(\omega) + \beta_2 \sin(\omega) + \beta_3 \cos(2\omega) + \beta_4 \sin(2\omega) \quad (2.4)$$

hvor $\bar{T}_i$ er normal døgnmiddeltemperatur på dag i , $\bar{E}_{pi}$ er normal potentiel fordampning på dag i , $\omega = (2\pi i)/365$, og β_0 til β_4 er parameter estimer.

Parametrene i disse ligninger er estimeret for hvert kvadrat i klimagriddet ved multi-pel lineær regression på daglige gennemsnitsværdier for perioden 1961-88. De daglige gennemsnitsværdier er beregnet for alle dage i året for hvert enkelt kvadrat ved interpolation af tilsvarende månedsværdier beregnet for kvadratnet for nitratmålinger (Mikkelsen, 1990). For Bornholm er dog benyttet data fra udvalgte stationer. Parameterestimerne er anført i tabel B.2 og B.3 i appendiks B.

Ved beregning af normalværdier for temperatursummer benyttes en statistisk procedure, hvor det antages at de aktuelle døgnmiddeltemperaturer er normalfordelt omkring normaltemperaturen med en spredning på $3 ^\circ\text{C}$ (Olesen, 1990a).



Figur 2.2: Nummerering af kvadrater i klimagriddet.

3 MARKVAND systembeskrivelse

MARKVAND-systemet er udviklet som et værktøj til støtte for beslutning om vanding i jordbruget. I sin nuværende form anviser systemet vandingstidspunter og mængder uden hensyntagen til om vandingskapaciteten på den enkelte ejendom overskrides. Systemet er opbygget fleksibelt og kan benyttes med forskelligt detaljeringsniveau på inddata.

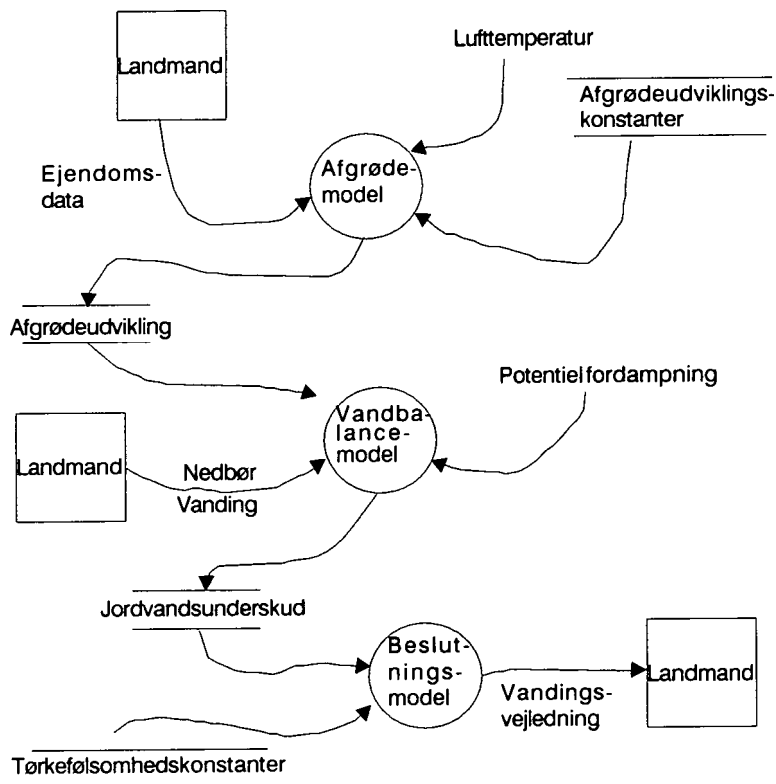
MARKVAND omfatter afgrøderne græs, tidlige, middeltidlige og sildige kartofler, sukker- og fodersukkerroer, vinter- og vårbyg, vinterhvede, vinterrug, vinter- og vårraps, majs og ærter. Vandingsstyringssystemet er opbygget omkring en afgrødemodel, en vandbalancemodel, en beslutningsmodel, standarder for forskellige jordtyper og afgrøder samt et brugerinterface til håndtering af ind- og uddata. MARKVAND opererer på daglige tidsskridt og anviser vandinger gældende i en fem-døgns prognose periode. Vandingsforslagene er baseret på simulering af afgrødeudvikling og vandbalance i den enkelte mark samt hensyntagen til afgrødernes tørkefølsomhed. Styrende inddata til systemet er tidstro samt prognose værdier for døgnmiddeltemperatur, daglig potentiel fordampning og nedbør. I figur 3.1 er i form af et dataflow-diagram vist strømmen af ind- og uddata i MARKVAND-systemet. Afvikling af systemet sker ved, at brugeren foretager valg i et hierakisk opbygget menusystem, se figur 3.2 og Plauborg (1990).

I de følgende afsnit redegøres nærmere for systemets modeller samt ind- og uddata parametre.

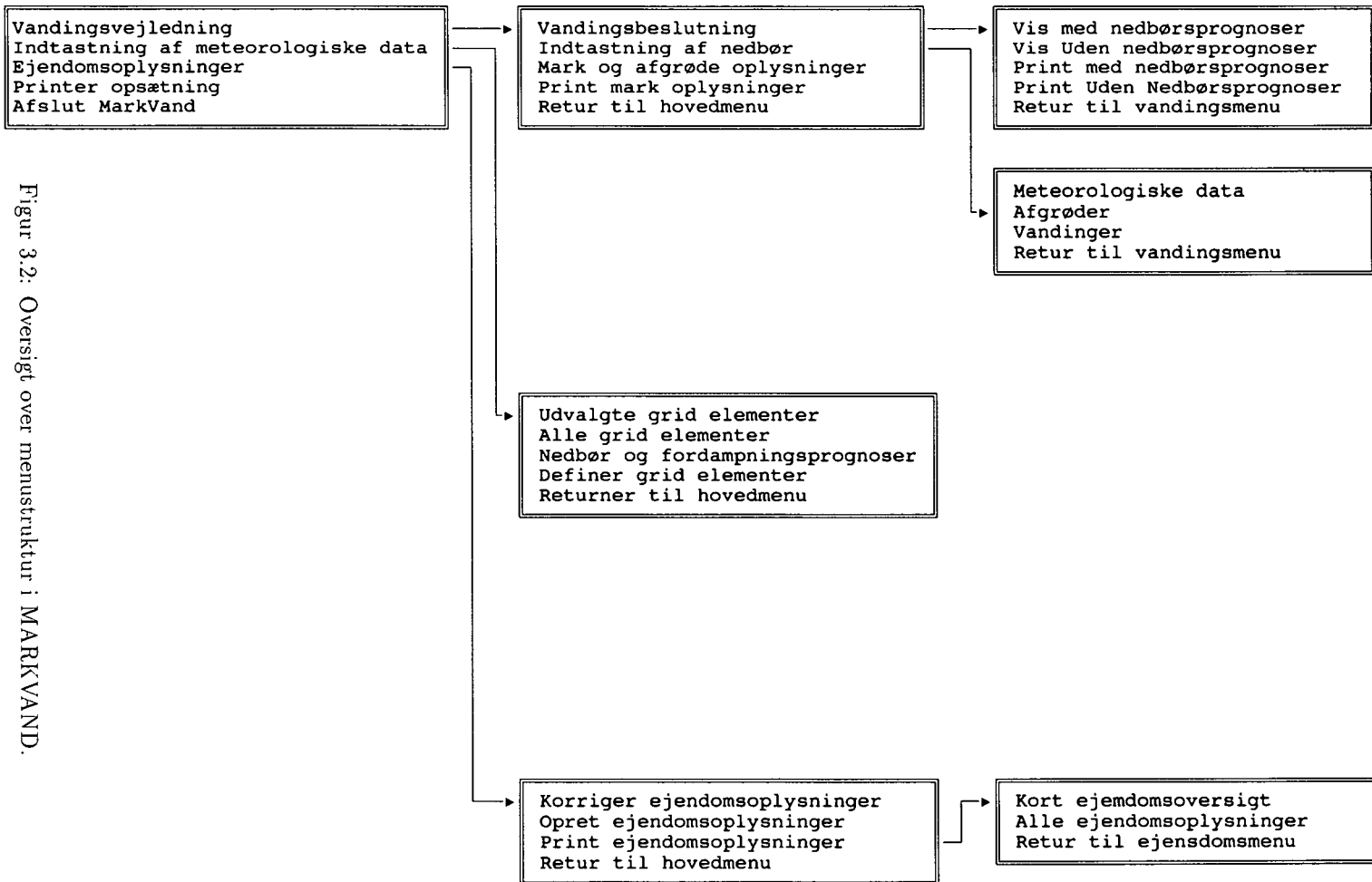
3.1 Afgrødemodel

Afgrødevækst og -udvikling er forårsaget af et komplekst sammenspil mellem biologisk/genetiske og fysisk/kemiske forhold. Under optimale vækstbetingelser kan vækst og udvikling i fysisk baserede modeller simuleres med kendskab til de meteorologiske forhold. I simple modeller indgår ofte alene lufttemperaturen som styrende variabel. For eksempel anvender Aslyng og Hansen (1982) alene temperatursum til at styre bladarealudviklingen i forskellige afgrøder.

I MARKVAND-systemet indgår en simpel model til simulering af bladarealudvikling, fænologisk udvikling og rodudvikling i forskellige afgrøder. Det antages, at udviklingen starter ved samme tidspunkt t_0 , der i vårafgrøder er fremspiring, og i vinterafgrøder vækststart. Simuleringen baseres på udregning af temperatursummer. Temperatursummer udregnes ved ligning 3.1 på grundlag af døgnmiddellufttemperatur som en sum af temperaturer større end en valgt basistemperatur. Summeringen påbegyndes ved en given dato.



Figur 3.1: Dataflow-diagram for MARKVAND-systemet.



Figur 3.2: Oversigt over menustruktur i MARKVAND.

$$S_a^b = \sum_{t=a}^b (T_t - T_b)_+ \quad (3.1)$$

hvor S_a^b er temperatursum beregnet fra dag a til b , °C,
 T_t er det t 'te døgns middellufttemperatur, °C, og
 T_b er basistemperaturen, °C.

Tilsvarende kan datoen t_S til en given temperatursum S og startdato a beregnes ved:

$$t_S = \min(t : S_a^t \geq S) \quad (3.2)$$

I afgrødemodellen er valgt basistemperaturen $T_b = 0$ °C. Fremspiringsdatoen t_0 for vårafgrøder observeres af brugeren. Datoen for vækststart i græsafrøder og vinterafgrøder beregnes som $t_0 = t_{S_{L0}}$ på grundlag af temperatursummen S_{L0} og startdatoen 1. marts. Det antages, at væksten i et normalt år starter den 16. april og S_{L0} er derfor sat til 142 °C. Dato for vækststart kan alternativt angives af brugeren. Datoen for start på vinterperioden t_v sættes til 1. november. Denne dato antages ligeledes at definere vækststop i afgrøder med sen vækst.

De generelle formler til beregning af afgrødeudviklingen præsenteres i det følgende. Konkret anvendelse af disse samt standardværdier for modelparametre præsenteres i afsnittene omhandlende græsafrøder, vårafgrøder og vinterafgrøder.

Den fænologiske udvikling F beregnes ved ligning 3.3. Ved fænologisk udvikling forstås i denne sammenhæng en opdeling af vækstperioden i vækstfaser, hvor afgrøden udviser en karakteristisk tørkefølsomhed. Antallet af vækstfaser i vækstperioden varierer fra afgrøde til afgrøde. Vækstfaserne betegnes F_l , hvor l kan antage værdier fra 1 til en maksimumsværdi l_x afhængig af afgrøde, $\max(l) \in [1, 5]$. Længden af vækstfasen F_l , $l_x = 1, \dots, l_x$, bestemmes ved temperatursummen S_{F_l} eller ved, at brugeren observerer tidspunktet $t_{F_l(obs)}$ for afslutning på vækstfase F_l . Endvidere bestemmes længden af vækstfasen F_l ved et eventuelt brugerangivet høsttidspunkt t_h samt af tidspunktet t_v . Standardværdier for temperatursummen S_{F_l} er angivet i afsnittene omhandlende de enkelte afgrøder.

$$F = \begin{cases} \text{e.d.} & t < t_0 \\ F_l & t_{(l-1)} \leq t < \min[t_l, t_{l_x}, t_v, t_h] \\ \text{e.d.} & t \geq \min[t_{l_x}, t_v, t_h] \end{cases} \quad (3.3)$$

hvor

$$t_l = \begin{cases} t_{F_l(obs)} & t_{F_l(obs)} \text{ d.} \\ t_{S_{F_l}} & t_{F_l(obs)} \text{ e.d.} \end{cases} \quad (3.4)$$

F betegner vækstfase,
 F_l er den l 'te vækstfase, $l = 1, \dots, l_x$,
 $l_x \in [1, 5]$,
e.d. betyder ej defineret,
d. betyder defineret,

S_{F_l} er temperatursumskrav for vækstfase F_l , °C,
 $t_{F_l(obs)}$ er observeret dato for afslutning på vækstfase F_l ,
 $t_{S_{F_l}}$ beregnes ud fra S_{F_l} og startdatoen $t_{(l-1)}$,
 t_0 og t_v er givet som tidligere nævnt, og
 t_h er høsttidspunkt.

Et eksempel på simulering af en ærteafgrødes vækstfaser er vist i figur 3.3. Vækstperioden er opdelt i 5 faser $F_1 - F_5$, der simuleres ud fra henholdsvis temperatursummerne $S_{F_1} - S_{F_5}$ og startdatoerne $t_0 - t_4$.

Bladarealudviklingen beskrives ved størrelsen af det totale bladarealindeks L (ligning 3.5), det grønne bladarealindeks L_g og størrelsen af det gule bladarealindeks L_y .

$$L = L_y + L_g \quad (3.5)$$

Ved det grønne og gule bladarealindeks forstås det ensidigt målte areal af henholdsvis grøn og gul afgrødetop pr. arealenhed. Eventuelle brugerobserverede tidspunkter $t_{F_l(obs)}$ for afslutning på vækstfaser får indflydelse på simuleringen af afgrødens bladarealindeks.

Såfremt $t_{F_l(obs)}$ ikke er defineret, beregnes L_g og L_y ved ligningerne 3.6 og 3.7.

$$L_g = \begin{cases} L_{gv} & t < t_0 \\ L_{gv} + (L_{ge} - L_{gv})\left(\frac{S_{t_0}^t}{S_{Le}}\right) & t_0 \leq t < t_{S_{Le}} \\ L_{ge} + (L_{gx} - L_{ge})\left\{\left[\exp\left(2.4 \frac{S_{t_0}^t - S_{Le}}{S_{Lx} - S_{Le}}\right) - 1\right]/10\right\} & t_{S_{Le}} \leq t < t_{S_{Lx}} \\ L_{gx} & t_{S_{Lx}} \leq t < \min[t_{S_{Lr}}, t_v, t_h] \\ L_{gx} - (L_{gx} - L_{gm})\left(\frac{S_{t_0}^t - S_{Lr}}{S_{Lm} - S_{Lr}}\right) & t_{S_{Lr}} \leq t < \min[t_{S_{Lm}}, t_v, t_h] \\ L_{gm} & t_{S_{Lm}} \leq t < \min[t_v, t_h] \\ L_{gm} & t_v \leq t < t_h \\ 0 & t \geq t_h \end{cases} \quad (3.6)$$

hvor L_g er det grønne bladarealindeks,

L_{gv} er L_g ved vækststart/fremspiring,

L_{ge} er L_g , hvor L_g 's vækstrate ændres fra konstant til eksponentiel,

L_{gx} er maksimal L_g ,

L_{gm} er L_g ved fuldmodenhed,

$S_{t_0}^t$ er aktuel temperatursum på datoen t , °C,

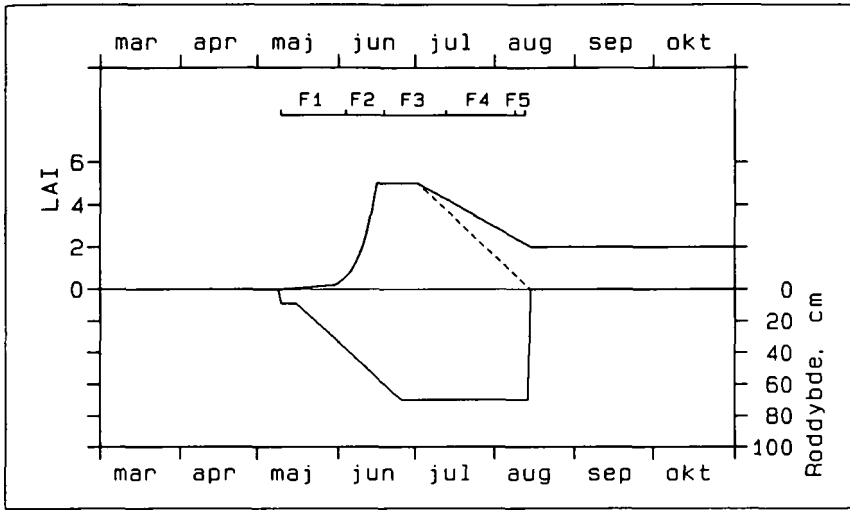
S_{Le} er temperatursumskrav, hvor L_g 's vækstrate ændres fra konstant til eksponentiel, °C,

S_{Lx} er temperatursumskrav for maksimal L_g , °C,

S_{Lr} er temperatursumskrav for begyndende gulfarvning af blade, °C,

S_{Lm} er temperatursumskrav for vækststop/fuldmodenhed, °C,

t_h er høsttidspunkt, og



Figur 3.3: For ærter simuleret grøn (---) og total bladarealindeks (—), effektiv rod- dybde og vækstfaser i et normalt år. Fremspiringsdato t_0 er 8. maj. Høsttidspunkt t_h og brugerobserverede tidspunkter af afslutning på vækstfaser $t_{FI(obs)}$ er ikke definerede. Maksimal effektiv rod- dybde z_x er sat til afgrødens maksimale effektive rod- dybde z_{xA} .

$t_{S_{Le}}, t_{S_{Lx}}, t_{S_{Lr}}$ og $t_{S_{Lm}}$ er beregnet på grundlag af temperatursummerne S_{Le}, S_{Lx}, S_{Lr} og S_{Lm} samt startdatoen t_0 .

$$L_y = \begin{cases} 0 & t < \min[t_{S_{Lr}}, t_v, t_h] \\ L_{ym} \left(\frac{S_{t_0} - S_{Lr}}{S_{Lm} - S_{Lr}} \right) & t_{S_{Lr}} \leq t < \min[t_{S_{Lm}}, t_v, t_h] \\ L_{ym} & t_{S_{Lm}} \leq t < \min[t_v, t_h] \\ L_{ym} & t_v \leq t < t_h \\ 0 & t \geq t_h \end{cases} \quad (3.7)$$

hvor L_y er det gule bladarealindeks,

L_{ym} er L_y ved vækststop/fuldmodenhed,

$S_{t_0}^t$ er aktuel temperatursum på datoen t , °C,

S_{Lr} er temperatursumskrav for begyndende gulfarvning af blade, °C,

S_{Lm} er temperatursumskrav for fuldmodenhed, °C,

t_h er høsttidspunkt, og

$t_{S_{Lr}}$ og $t_{S_{Lm}}$ er beregnet på grundlag af henholdsvis S_{Lr} og S_{Lm} samt startdatoen t_0 .

Det fremgår af ligning 3.6 og figur 3.3, at det grønne bladarealindeks udvikles lineært fra startværdi L_{yv} indtil L_{ge} , hvorefter L_g stiger eksponentielt indtil L_{gx} , der er maksimalt grønt bladarealindeks. Det grønne bladarealindeks er vedvarende maksimal indtil begyndende indlejring i kerner og frø, hvor det antages, at begyndende gulfarvning af blade indtræder. Det grønne bladarealindeks aftager herefter lineært til slutværdien L_{gm} .

Det gule bladarealindeks (ligning 3.7 og figur 3.3) stiger lineært fra 0 til en maksimal værdi L_{ym} i perioden fra $t_{S_{Lr}}$ til $\min[t_{S_{Lm}}, t_v, t_h]$. Der er i de to ligninger 3.6 og 3.7 sammenfald mellem tidspunktet, hvor det grønne bladarealindeks aftager og det gule bladarealindeks vokser.

Standardværdier for temperatursummerne $S_{Le}, S_{Lx}, S_{Lr}, S_{Lm}$ og bladarealindeks $L_{gv}, L_{ge}, L_{gx}, L_{gm}$ samt L_{ym} er angivet i afsnittene omhandlende de enkelte afgrøder.

Generelt gælder, at temperatursummerne S_L er akkumuleret fra vækststart/fremspiring, således at $S_{Le} < S_{Lx} < S_{Lr} < S_{Lm}$. Dog er S_{Le} nul for afgrøder, hvor bladarealet er eksponentielt stigende fra vækststart/fremspiring. S_{Lr} sættes lig S_{Lm} for afgrøder, hvor der ikke regnes med lineært aftagende grønt bladarealindeks. Temperatursummerne S_{Fl} er derimod akkumuleret fra slut på forrige vækstfase. Endvidere gælder, at tidspunktet for fuldmodenhed $t_{S_{Lm}}$ i simuleringen er sammenfaldende med tidspunktet for afslutning på vækstfase F_{lx} , idet $S_{Lm} = \sum_{i=1}^{l_x} S_{Fi}$.

Simulering af bladarealindekset ændres såfremt $t_{Fl(obs)}$ er defineret. Dette sker ved, at temperatursummen S_{Lr} og tidspunktet $t_{S_{Lr}}$ for begyndende gulfarvning af blade i ligning 3.6 og 3.7 erstattes med S'_{Lr} (ligning 3.8) og $t'_{S'_{Lr}}$, såfremt mindst et af tidspunkterne t_{Fi} er observeret, hvor $i \in [1, l_x - 2]$. Endvidere erstattes temperatursummen S_{Lm} og tidspunktet $t_{S_{Lm}}$ for fuldmodenhed i ligning 3.6 og 3.7 med S'_{Lm} (ligning 3.9) og $t'_{S'_{Lm}}$, såfremt mindst et af tidspunkterne t_{Fi} er observeret, hvor $i \in [1, l_x]$.

$$S'_{Lr} = S_{Lr} - \sum_{i=1}^{l_x-2} S_{Fi} + \sum_{i=1}^{l_x-2} S_{i(i-1)}^{t_i} \quad (3.8)$$

hvor t_i beregnes ved ligning 3.4.

$$S'_{Lm} = \sum_{i=1}^{l_x} S_{i(i-1)}^{t_i} \quad (3.9)$$

hvor t_i beregnes ved ligning 3.4.

Eksempelvis kan i ært, hvis vækstperiode er opdelt i 5 vækstfaser, observeres tidspunktet $t_{F3(obs)}$ (afsluttende blomstring) og tidspunktet $t_{F4(obs)}$ (fleste bælg brune/frø hårde). Tidspunktet $t_{F3(obs)}$ indgår i beregningen af temperatursummen S'_{Lr} , der er bestemmende for tidspunktet $t'_{S'_{Lr}}$. Derimod er begge tidspunkter $t_{F3(obs)}$ og $t_{F4(obs)}$ bestemmende for beregningen af S'_{Lm} og $t'_{S'_{Lm}}$. Simuleringen af bladarealindekset ændres derved således, at tidspunktet for fuldmodenhed $t'_{S'_{Lm}}$ i simuleringen til stadighed er sammenfaldende med tidspunktet for afslutning på vækstfase $F_{lx}, l_x = 5$.

Rodudviklingen beregnes ud fra ligningen 3.10, såfremt $t_{Fl(obs)}$ ikke er defineret.

$$z_r = \begin{cases} z_0 & t < t_0 \\ \min[z_x, \max[z_v, c_r(t - t_0)]] & t_0 \leq t < \min[t_{S_{Lm}}, t_v, t_h] \\ z_m & t_{S_{Lm}} \leq t < \min[t_v, t_h] \\ z_m & t_v \leq t < t_h \\ 0 & t \geq t_h \end{cases} \quad (3.10)$$

hvor z_r er effektiv roddebyde, mm,
 z_0 er roddebyde før vækststart/fremspiring, mm,
 z_v er startroddebyde, mm,
 z_x er maksimal effektiv roddebyde, mm, og bestemmes ved ligning 3.11,
 z_m er roddebyde ved vækststop/fuldmodenhed, mm,
 c_r er rodvæksthastighed, mm dag⁻¹,
 $(t - t_0)$ er antal dage efter vækststart/fremspiring, og
 $t_{S_{Lm}}$ er dato for fuldmodenhed.

Det fremgår af figur 3.3 og ligning 3.10, at rodudviklingen i ært beskrives lineært fra t_0 med en tilvækst på c_r fra en given startroddebyde z_v til en given maksimal effektiv roddebyde z_x , hvorefter roddebyden er konstant indtil $t_{S_{Lm}}$, såfremt t_h ikke er angivet. Herefter er roddebyden z_m .

$t_{S_{Lm}}$ erstattes i ligning 3.10 med $t_{S'_{Lm}}$, såfremt der forekommer brugerobserverede tidspunkter $t_{F(obs)}$.

Den effektive roddebyde z_r angiver dybden, hvor afgrøden kan udnytte alt plantetilgængeligt vand og er ofte betydelig lavere end den faktiske roddebyde (Madsen og Holst, 1987). Rodvæksthastigheden c_r antager værdien 12 mm dag⁻¹ for græs og 15 mm dag⁻¹ for øvrige afgrøder. Tilsvarende rodvæksthastigheder er anvendt af Aslyng og Hansen (1982). Standardværdier for z_0 , z_v , z_m , c_r og z_{xA} er givet i afsnittene om de enkelte afgrøder.

Maksimal effektiv roddebyde z_x bestemmes ved ligning 3.11.

$$z_x = \begin{cases} \min[z_o, z_{xJ}, z_{xA}] & J_{(obs)} \text{ e.d.} \\ \min[z_o, z_{xJ'}, z_{xA}] & J_{(obs)} \text{ d.} \end{cases} \quad (3.11)$$

hvor z_{xJ} og z_{xA} er maksimal effektiv roddebyde bestemt af henholdsvis jordtype og afgrøde. z_o er dybden af muldlaget.

Det ses af ligning 3.11, at den maksimale effektive roddebyde er bestemt af jordtype, afgrøde og dybden af muldlaget. Endvidere er z_x bestemt af, om yderligere oplysninger vedrørende jorden $J_{(obs)}$ er defineret. Værdier for z_{xJ} og $z_{xJ'}$ fremgår af afsnit 3.2.

3.1.1 Græsafrøder

Græsafrøder (alm. rajgræs) kan gennem vækstsæsonen benyttes til slæt, afgræsning og staldfodring. Disse tre forskellige benyttelser betegnes under et som afhugning.

Tabel 3.1: Bladarealindeks L_g og temperatursumskrav S ($^{\circ}\text{C}$) for simulering af bladareal i græsafgrøde.

L_{gv}	L_{gx}	L_{gm}	L_{gC}	S_{Lx}
0.5	5.0	0.5	0.5	303

Det antages i modellen, at græsafgrøden forbliver i den vegetative fase F_1 gennem hele vækstperioden, idet afgrøden betragtes som en grovfoderafgrøde og ikke som en frøafgrøde. Den fænologiske udvikling beregnes ved ligning 3.3, hvor $l_x = 1$ og $t_{S_{F_1}} = t_v$. Brugeren kan ikke angive tidspunkt for afslutning af vækstfase F_1 og $t_{F1(obs)}$ er derfor ikke defineret.

Det totale bladarealindeks L beregnes alene ud fra det grønne bladarealindeks L_g , idet der ikke regnes med gult bladareal. Bladarealudviklingen er udover temperaturen bestemt af afhugningstidspunkter. Det grønne bladarealindeks beregnes ved ligning 3.12, der er et specialtilfælde af ligning 3.6. Ligningsparametrene er angivet i tabel 3.1.

$$L_g = \begin{cases} L_{gv} & t < t_0 \\ \text{Min}[L_{gx}, L_{gF1}] & t_0 \leq t < \min[t_{C1}, t_v] \\ L_{gC} & t_{Cj} \leq t < \min[t_{S_{Lagj}}, t_v] \\ \text{Min}[L_{gx}, L_{gF2}] & t_{S_{Lagj}} \leq t < \min[t_{C(j+1)}, t_v] \\ L_{gm} & t_v \geq t \end{cases} \quad (3.12)$$

hvor

$$L_{gF1} = L_{gv} + (L_{gx} - L_{gv}) \{ [\exp(2.4 \frac{S_{t_0}^t}{S_{Lx}}) - 1] / 10 \},$$

$$L_{gF2} = L_{gC} + (L_{gx} - L_{gC}) \{ [\exp(2.4 \frac{S_{t_{S_{Lagj}}}^t}{S_{Lx}}) - 1] / 10 \},$$

$$S_{Lag1} = \begin{cases} 13 & S_{t_0^{t_{C1}}} < 420 \\ 54 & S_{t_0^{t_{C1}}} \geq 420 \quad \wedge \quad t_{C1} < 1. \text{ august} \\ 40 & S_{t_0^{t_{C1}}} \geq 420 \quad \wedge \quad t_{C1} \geq 1. \text{ august}, \end{cases}$$

$$S_{Lagj} = \begin{cases} S_{Lag1} & j = 1 \\ 40 & j > 1 \quad \wedge \quad S_{t_{C(j-1)}^{t_{Cj}}} \geq 420 \\ 13 & j > 1 \quad \wedge \quad S_{t_{C(j-1)}^{t_{Cj}}} < 420, \end{cases}$$

L_g er det grønne bladarealindeks,

L_{gv} er L_g ved vækststart,

L_{gx} er maksimal L_g ,

L_{gm} er L_g ved vækststop,

L_{gC} er bladarealindeks efter afhugning,

Tabel 3.2: Effektiv roddebyde z_r og rodvækstrate c_r for en græsafrøde.

z_0	z_v	z_{xA}	z_m	c_r
mm	mm	mm	mm	mm dag ⁻¹
300	300	900	300	12

$S_{t_0}^t$ er aktuel temperatursum på datoen t , °C,

S_{Lx} er temperatursumskrav for maksimal L_g , °C,

$t_{S_{Lagj}}$ er beregnet ud fra temperatursummen S_{Lagj} og startdatoen t_{Cj} , og

t_{Cj} er dato for den j 'te afhugning, $j \in [1, 10]$.

t_0 og t_v er givet som tidligere nævnt.

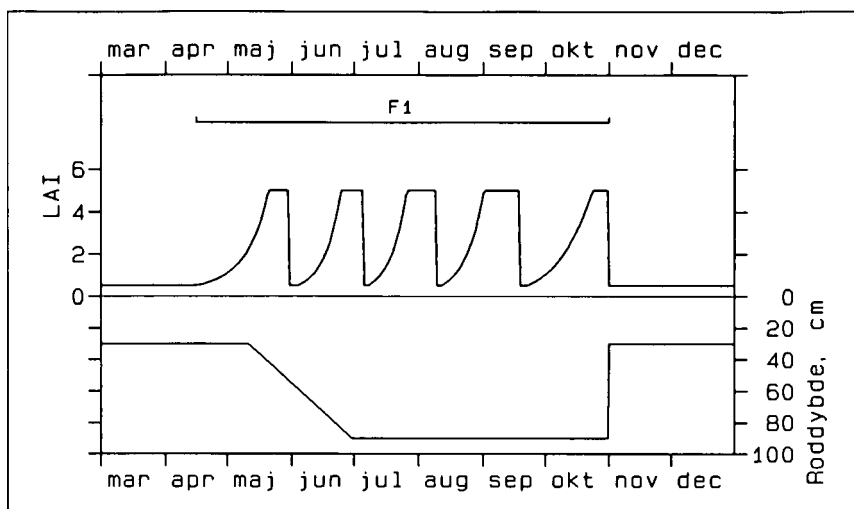
Det ses af ligning 3.12 og tabel 3.1, at bladarealindekset L_g vokser eksponentielt fra 0.5 ved vækststart til enten maksimalt 5.0 eller en størrelse, der er bestemt af første afhugningstidspunkt. Bladarealindekset efter afhugning er 0.5. Efter afhugning forbliver bladarealindekset 0.5 i en lagperiode. Herefter stiger bladarealindekset igen eksponentielt til enten maksimalt 5.0 eller en størrelse, der er bestemt af næste afhugningstidspunkt. Ved vækststop aftager bladarealindekset til 0.5. Lagperioden er betegnelsen på det tidsrum efter slæt, hvor græsafrøden ikke udviser synlige tegn på genvækst. Lagperiodens længde bestemmes af temperatursummen S_{Lagj} og er afhængig af slætudbytte og slætnummer. Et stort slæt er defineret ved et udbytte på 4-6 tons og en temperatursum på mindst 420 °C. Lagperiodens længde er for store slæt ca. 3 dage svarende til en temperatursum på 40 °C, dog ca. 4 dage svarende til 54 °C efter det første store slæt før 1. august. Lagperioden for små slæt er ca. 1 dag svarende til 13 °C. Reglerne for lagperiodens længde er givet af Ib Kristensen og Karen Søegaard (personlig meddelelse).

Modelkonstanterne L_{gv} , L_{gx} , L_{gm} og L_{gC} er fastlagt ud fra tidligere erfaringer fra forsøg med græs. Tilsvarende størrelsesorden er anvendt af Aslyng og Hansen (1982). Temperatursumskravene for maksimalt bladarealindeks S_{Lx} (tabel 3.1) er udregnet under anvendelse af normaler for døgnmiddellufttemperatur med antagelse om, at vækststart i et normalt år er den 16. april.

Rodudvikling beregnes ved ligning 3.10, hvor $t_{S_{Lm}} = t_v$. Ligningsparametrene er givet i tabel 3.2. Den maksimale effektive roddebyde hos græs er afhængig af benyttelsen. Madсен og Holst (1987) angiver 600 mm for kort afgræsset græs. Aslyng og Hansen (1982) angiver 1000 mm for græs til slæt. I den her anvendte simple model for rodvækst antages den maksimale effektive roddebyde z_{xA} konstant lig 900 mm (tabel 3.2), idet græsmarken kan anvendes til både slæt, afgræsning og staldfodring.

Simulering af afgrødeudviklingen i et normalt år med 4 slæt er vist i figur 3.4. Slættidspunkterne er henholdsvis den 31/5, 6/7, 10/8 og 19/9. Beregnede temperatursummer for de 4 slæt samt datoer for ophør af lagperioder er givet i tabel 3.3.

Det ses af tabel 3.3, at alle slæt er af kategorien store slæt, idet temperatursummen



Figur 3.4: For en græsafgrøde med 4 slæt simuleret total bladareal og effektiv roddybde i et normalt år. Slættidspunkterne er henholdsvis den 31/5, 6/7, 10/8 og 19/9.

Tabel 3.3: Temperatursummer ($^{\circ}\text{C}$) i et normalt år for en græsafgrøde med 4 slæt.

Vækstperiode	Temperatursummer		
	Dato	$S_{t_{C(j-1)}}^{t_{Cj}}$	S_{Lagj}
vækststart	16/4		
1. slæt	31/5	438	
1. lag	4/6		54
2. slæt	6/7	552	
2. lag	8/7		40
3. slæt	10/8	590	
3. lag	12/8		40
4. slæt	19/9	582	
4. lag	22/9		40
vækststop	1/11		

Tabel 3.4: Temperatursumskrav S_F (°C) for vækstfaser F_l i vårafgrøder, $l \in [1, l_x]$.

Afgrøde	S_{F1}	S_{F2}	S_{F3}	S_{F4}	S_{F5}	l_x
bederoer ¹⁾	235	187	975	1197	-	4
ærter	292	219	398	444	78	5
kartofler, tidlige	110	80	263	685	295	5
kartofler, middeltidlige	136	54	421	779	271	5
kartofler, sildige	136	60	438	824	293	5
vårbyg	294	449	113	461	162	5
vårrops	190	365	207	575	248	5
majs	397	691	476	247	761	5
1) gælder for både fodersukker- og sukkerroer						

Tabel 3.5: Fænologisk betegnelse for vækstfase F i vårafgrøder.

Afgrøde	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
bederoer ¹⁾	bladdannelse 1	bladdannelse 2	roddannelse	modning	-
ærter	vegetativ 1	vegetativ 2	blomstring	indlejring	modning
kartofler ²⁾	vegetativ 1	vegetativ 2	knolddannelse	knoldvækst	modning
vårbyg	vegetativ 1	vegetativ 2	skridning	indlejring	modning
vårrops	vegetativ 1	vegetativ 2	blomstring	indlejring	modning
majs	vegetativ 1	vegetativ 2	blomstring	indlejring	modning
1) gælder for både fodersukker- og sukkerroer					
2) gælder for både tidlige, middeltidlige og sildige kartofler					

$S_{t_{C(j-1)}}^{t_{Cj}}$ er større end 420 °C. Følgelig er lagperioden efter første slæt 5 dage svarende til en temperatursum på mindst 54 °C. Efter andet til fjerde slæt er lagperioden 3 dage svarende til en temperatursum på mindst 40 °C.

3.1.2 Vårafgrøder

MARKVAND-systemet omfatter følgende vårafgrøder: fodersukker- og sukkerroer, vårbyg, vårraps, ærter, majs samt tidlige, middeltidlige og sildige kartofler.

Den fænologiske udvikling i vårafgrøderne beregnes ved ligning 3.3. Ligningsparametrene er givet i tabel 3.4. De enkelte vækstfaser F_l angives ved egentlige fænologiske navne. Navngivningen fremgår af tabel 3.5. Generelt for vårafgrøder opdeles den vegetative vækstfase i to perioder, idet vandingsforslag altid udelades i den første periode, jævnfør afsnit 3.4. Temperatursumskravene i tabel 3.4 indikerer afslutningen på de enkelte vækstfaser og er beregnet med udgangspunkt i normaler for døgnmiddellufttemperatur samt data for vækstfasers beliggenhed i vækstperioden. Data for vækstfaser i bederoer er indhentet hos Anonym (1985). Data for vækstfaser i ært er udtaget fra Anonym (1985), Flengmark (1984) og Flengmark (1985), Flengmark (1986) og Flengmark (1987a). Data for kartofler er udtaget fra Jørgensen og Edlefsen (1987), Jørgensen (1984), Anonym (1985) samt S.E. Hansen (personlig meddelelse). Data for vårbyg er udtaget fra

Tabel 3.6: Mulige brugerangivne tidspunkter $t_{F1(obs)}$ for afslutning af vækstfaser F_l og t_h markeret med x.

Afgrøde	$t_{F1(obs)}$	$t_{F2(obs)}$	$t_{F3(obs)}$	$t_{F4(obs)}$	$t_{F5(obs)}$	t_h
roer ¹⁾						x
ærter		x	x	x		x
kartofler ²⁾		x				x
vårbyg		x		x		x
vårraps		x		x		x
majs		x				x
1) gælder for både fodersukker- og sukkerroer						
2) gælder for både tidlig, middeltidlig og sildig kartofler						

Tabel 3.7: Bladarealindeks L_g og L_y i vårafgrøder.

Afgrøde	L_{gv}	L_{ge}	L_{gx}	L_{gm}	L_{ym}
bederoer ¹⁾	0.0	0.1	5.0	0.0	0.0
ærter	0.0	0.2	5.0	0.0	2.0
kartofler ²⁾	0.0	0.0	5.0	0.0	2.0
vårbyg	0.0	0.0	5.0	0.0	2.0
vårraps	0.0	0.0	5.0	0.0	2.0
majs	0.0	0.5	5.0	0.0	2.0
1) gælder for både fodersukker- og sukkerroer					
2) gælder for både tidlige, middeltidlige og sildige kartofler					

Mogensen (1980), Andersen (1980), Gallagher et al. (1976), Aslyng og Hansen (1982) samt Anonym (1985). Data for vårraps er uddraget fra Flengmark (1985), Flengmark (1986), Flengmark (1987a) og Anonym (1985). Data for vækstfaser i majs er uddraget fra Pedersen (1986), Flengmark (1987b), Jensen (1988), Jensen (1989) og Anonym (1985).

I tabel 3.6 er givet en oversigt over de tidspunkter $t_{F1(obs)}$ og t_h , der kan angives af brugeren. Det fremgår af tabellen, at brugeren kun kan angive tidspunktet for høst i bederoer.

Det totale bladarealindeks beregnes ved ligning 3.5. Det grønne og gule bladarealindeks beregnes ved henholdsvis ligning 3.6 og 3.7. Det voksende grønne bladareal i ærter, bederoer og majs beskrives fra fremspiring først lineært tiltagende og senere eksponentielt stigende. For de øvrige afgrøder beskrives det voksende bladareal alene ved en eksponentialfunktion. Der regnes ikke med gult og aftagende grønt bladareal i bederoer. Ligningsparametrene er givet i tabel 3.7 og 3.8.

Maksimalt grønt og gult bladarealindeks i vårafgrøderne varierer fra år til år, men kan i simple modeller sættes til henholdsvis 5.0 og 2.0 (Aslyng og Hansen, 1982; Aslyng og Hansen, 1985).

Temperatursumskravene, der er bestemmende for udviklingen i vårafgrødernes bladare-

Tabel 3.8: Temperatursumskrav S ($^{\circ}\text{C}$) for simulering af bladareal i vårafgrøder.

Afgrøde	S_{Le}	S_{Lx}	S_{Lr}	S_{Lm}
bederoer ¹⁾	81	907	2594	2594
ærter	250	471	720	1431
kartofler, tidlige	0	601	1043	1433
kartofler, middeltidlige	0	601	1314	1661
kartofler, sildige	0	601	1349	1751
vårbyg	0	400	1070	1479
vårraps	0	393	1355	1585
majs	420	740	1808	2572
1) gælder for både fodersukker- og sukkerroe				

Tabel 3.9: Effektiv roddebygge z_r og rodvækstrate c_r for vårafgrøder.

Afgrøde	z_0 mm	z_v mm	z_{xA} mm	z_m mm	c_r mm dag ⁻¹
roer ¹⁾	0	15	900	0	15
ærter	0	90	700	0	15
kartofler ²⁾	0	80	750	0	15
vårbyg	0	55	900	0	15
vårraps	0	40	900	0	15
majs	0	70	900	0	15
1) gælder for både fodersukker- og sukkerroe					
2) gælder for både tidlig, middeltidlig og sildig kartofler					

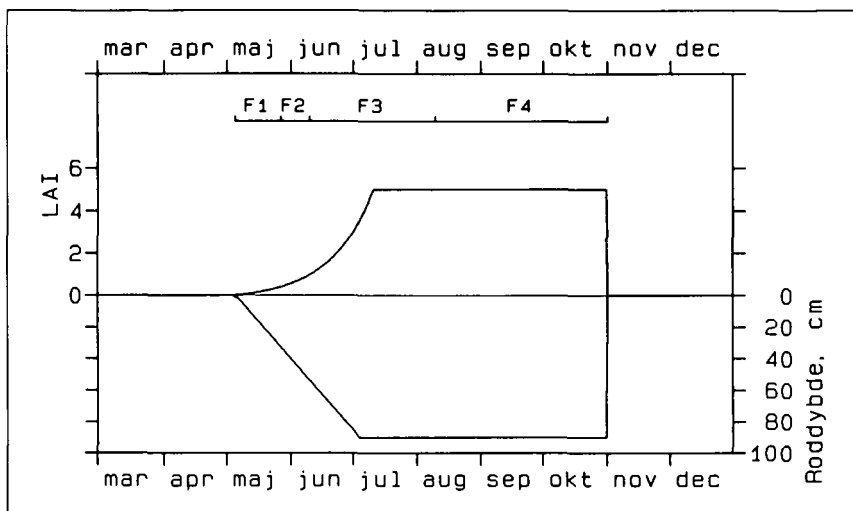
alindeks fremgår af tabel 3.8. Temperatursumskravet for udvikling af bladarealindeks i ært er beregnet på baggrund af data præsenteret af Mikkelsen og Andreassen (1984) samt målinger fra den mikrometeorologiske station i Foulum (Olesen, 1987). Temperatursumskravene for bederoer, kartofler, vårbyg og vårraps er beregnet med udgangspunkt i data fra Aslyng og Hansen (1982) og Aslyng og Hansen (1985).

Rodudviklingen i vårafgrøderne beregnes ved ligning 3.10. Ligningsparametrene er givet i tabel 3.9. Fastlæggelse af maksimal effektiv roddebygge z_{xA} , når teksturen i jorden ikke er begrænsende for rodudviklingen, er baseret på Aslyng og Hansen (1982), Madsen og Holst (1987), Mikkelsen og Andreassen (1984), Andersen (1986) og Aslyng (1978).

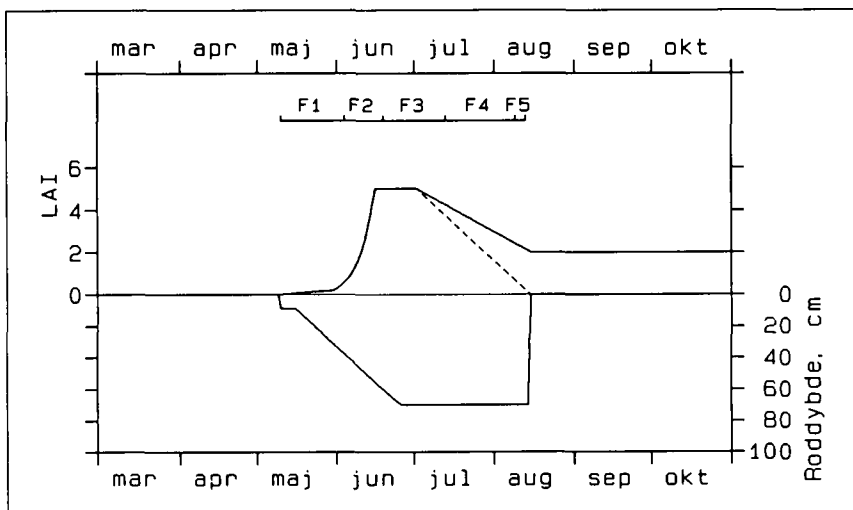
Simuleringer af bladareal- og rodudvikling samt vækstfasernes beliggenhed i vårafgrøder er vist i figur 3.5 til 3.12. Simuleringerne er baseret på temperaturer i et normalt år.

3.1.3 Vinterafgrøder

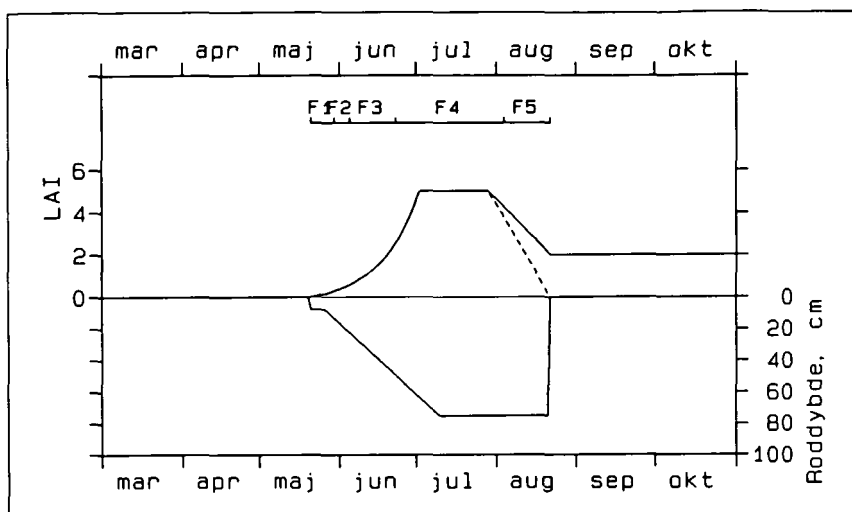
MARKVAND-systemet omfatter følgende vinterafgrøder: vinterhvede, vinterbyg, vinter-rug og vinterraps.



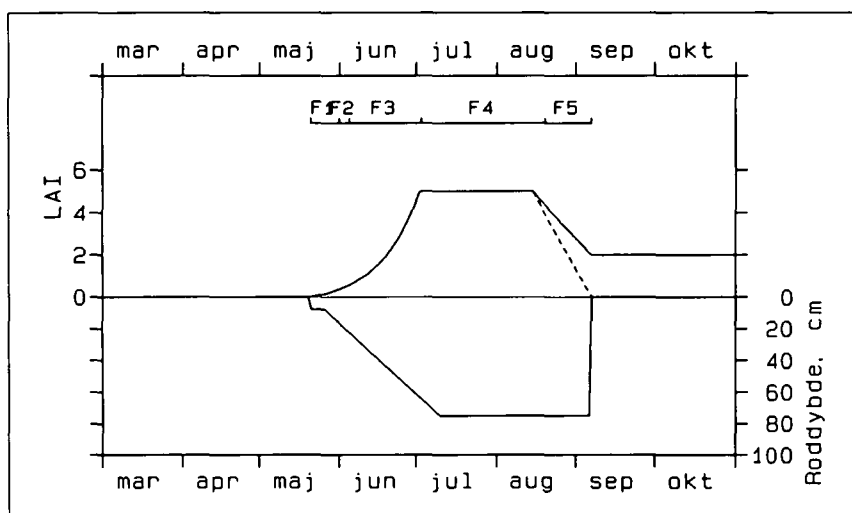
Figur 3.5: For bederoer simuleret grøn (---) og total bladarealindeks (—), effektiv roddebyde og vækstfaser i et normalt år. Fremspiringsdato t_0 er 8. maj. Høsttidspunkt t_h og brugerobserverede tidspunkter for afslutning på vækstfaser $t_{FI(obs)}$ er ikke definerede.



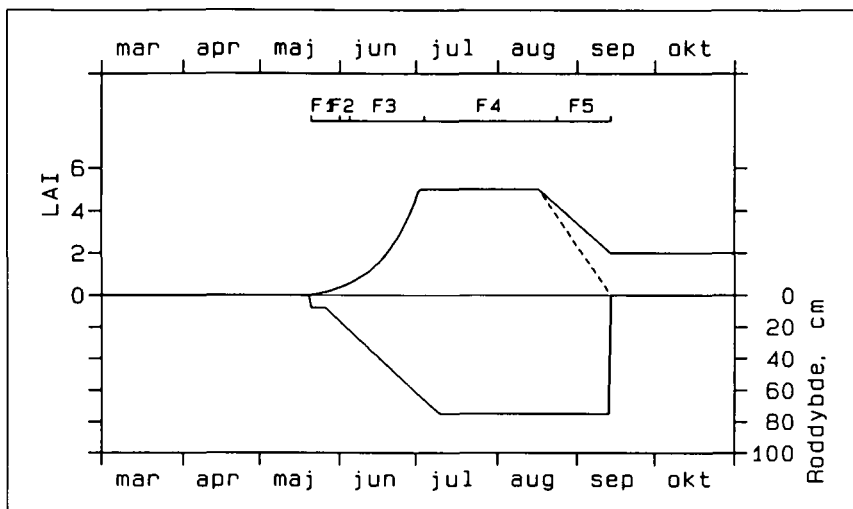
Figur 3.6: For ærter simuleret grøn (---) og total bladarealindeks (—), effektiv roddebyde og vækstfaser i et normalt år. Fremspiringsdato t_0 er 10. maj. Høsttidspunkt t_h og brugerobserverede tidspunkter for afslutning på vækstfaser $t_{FI(obs)}$ er ikke definerede.



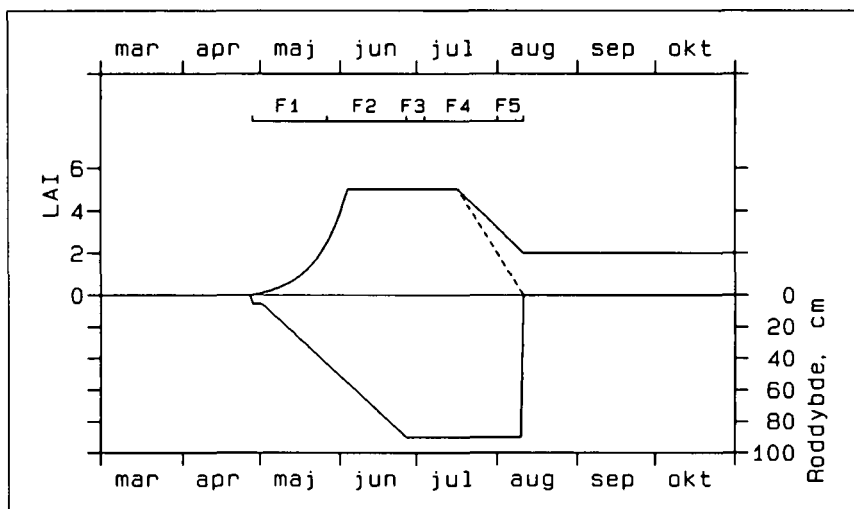
Figur 3.7: For tidlige kartofler simuleret grøn (---) og total bladarealindeks (—), effektiv roddybde og vækstfaser i et normalt år. Fremspiringsdato t_0 er 21. maj. Høsttidspunkt t_h og brugerobserverede tidspunkter for afslutning på vækstfaser $t_{FI(obs)}$ er ikke definerede.



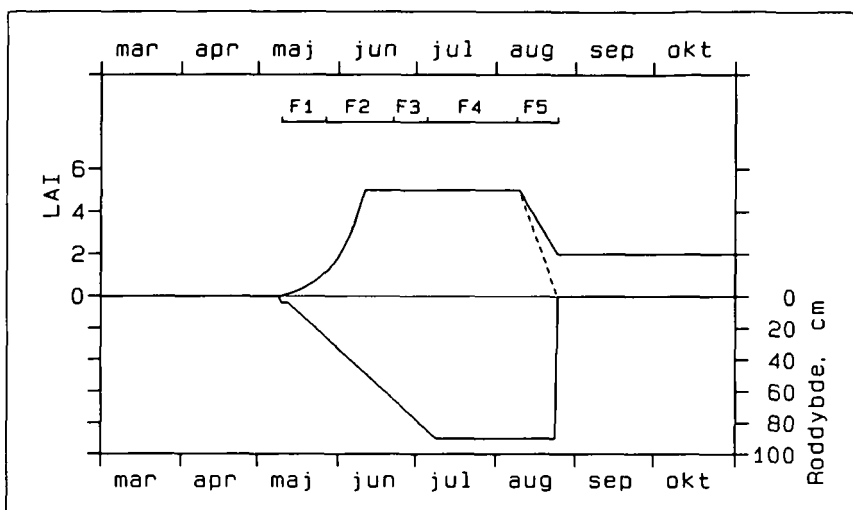
Figur 3.8: For middeltidlige kartofler simuleret grøn (---) og total bladarealindeks (—), effektiv roddybde og vækstfaser i et normalt år. Fremspiringsdato t_0 er 21. maj. Høsttidspunkt t_h og brugerobserverede tidspunkter for afslutning på vækstfaser $t_{FI(obs)}$ er ikke definerede.



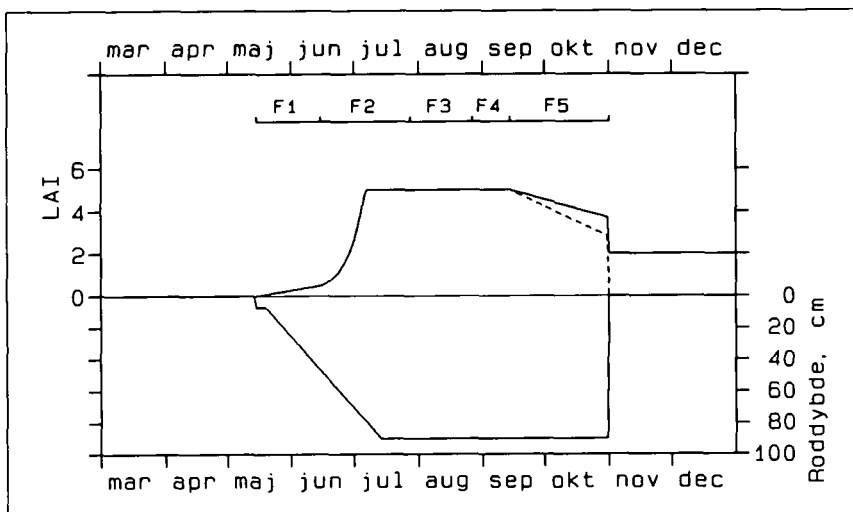
Figur 3.9: For sildige kartofler simuleret grøn (---) og total bladarealindeks (—), effektiv roddebygge og vækstfaser i et normalt år. Fremspiringsdato t_0 er 21. maj. Høsttidspunkt t_h og brugerobserverede tidspunkter for afslutning på vækstfaser $t_{FI(obs)}$ er ikke definerede.



Figur 3.10: For vårbyg simuleret grøn (---) og total bladarealindeks (—), effektiv roddebygge og vækstfaser i et normalt år. Fremspiringsdato t_0 er 28. april. Høsttidspunkt t_h og brugerobserverede tidspunkter for afslutning på vækstfaser $t_{FI(obs)}$ er ikke definerede.



Figur 3.11: For vårraps simuleret grøn (---) og total bladarealindeks (—), effektiv roddebybde og vækstfaser i et normalt år. Fremspiringsdato t_0 er 10. maj. Høsttidspunkt t_h og brugerobserverede tidspunkter for afslutning på vækstfaser $t_{FI(obs)}$ er ikke definerede.



Figur 3.12: For majs simuleret grøn (---) og total bladarealindeks (—), effektiv roddebybde og vækstfaser i et normalt år. Fremspiringsdato t_0 er 15. maj. Høsttidspunkt t_h og brugerobserverede tidspunkter for afslutning på vækstfaser $t_{FI(obs)}$ er ikke definerede.

Tabel 3.10: Temperatursumskrav S_F ($^{\circ}\text{C}$) for vækstfaser F_l i vinterafgrøder, $l \in [1, l_x]$.

Afgrøde	S_{F_1}	S_{F_2}	S_{F_3}	S_{F_4}	l_x
vinterbyg	190	376	468	157	4
vinterhvede	362	599	590	155	4
vinterraps	292	345	395	232	4
vinterrug	316	717	493	160	4

Tabel 3.11: Betegnelse for vækstfase F i vinterafgrøder.

Afgrøde	F_1	F_2	F_3	F_4
vinterbyg	vegetativ	strækning/skridning	kerneindlejring	modning
vinterhvede	vegetativ	strækning/skridning	kerneindlejring	modning
vinterraps	vegetativ	strækning/skridning	indlejring	modning
vinterrug	vegetativ	strækning/skridning	kerneindlejring	modning

Den fænologiske udvikling i vinterafgrøderne beregnes ved ligning 3.3. Ligningsparametrene er givet i tabel 3.10. De enkelte vækstfaser F_l angives ved egentlige fænologiske navne. Navngivningen fremgår af tabel 3.11.

Temperatursumskravene i tabel 3.10, der indikerer afslutningen på de enkelte vækstfaser, er beregnet ud fra normaler for døgnmiddellufttemperatur samt data for vækstfasers beliggenhed. Data for fænologisk udvikling i vinterraps er indhentet fra Anonym (1985), Flengmark (1985), Flengmark (1986) og Flengmark (1987a). Data for vinterbyg, vinterhvede og vinterrug er indhentet fra Anonym (1985) og Andersen (1980).

I tabel 3.12 er givet en oversigt over de tidspunkter $t_{F_l(\text{obs})}$ og t_h , der kan angives af brugeren.

Det totale bladarealindeks beregnes ved ligning 3.5. Det grønne og gule bladarealindeks beregnes ved henholdsvis ligning 3.6 og ligning 3.7. Det voksende bladareal beskrives alene ved en eksponentialfunktion, og der regnes med gult og aftagende grønt bladareal. Ligningsparametrene er givet i tabel 3.13 og 3.14.

Tabel 3.12: Mulige brugerangivne tidspunkter $t_{F_l(\text{obs})}$ for afslutning af vækstfaser F_l og t_h markeret med x.

Afgrøde	$t_{F_1(\text{obs})}$	$t_{F_2(\text{obs})}$	$t_{F_3(\text{obs})}$	$t_{F_4(\text{obs})}$	t_h
vinterbyg			x		x
vinterhvede			x		x
vinterraps	x		x		x
vinterrug			x		x

Tabel 3.13: Bladarealindeks L_g og L_y i vinterafgrøder.

Afgrøde	L_{gv}	L_{ge}	L_{gx}	L_{gm}	L_{ym}
vinterbyg	0.5	0.5	5.0	0.0	2.0
vinterhvede	0.5	0.5	5.0	0.0	2.0
vinterraps	0.5	0.5	5.0	0.0	2.0
vinterrug	0.5	0.5	5.0	0.0	2.0

Tabel 3.14: Temperatursumskrav S ($^{\circ}\text{C}$) for simulering af bladareal i vinterafgrøder.

Afgrøde	S_{Le}	S_{Lx}	S_{Lr}	S_{Lm}
vinterbyg	0	190	811	1191
vinterhvede	0	303	1307	1706
vinterraps	0	190	1037	1268
vinterrug	0	190	1301	1686

Maksimalt grønt og gult bladarelindeks i vinterafgrøderne varierer fra år til år, men kan i simple modeller sættes til henholdsvis 5.0 og 2.0 (Aslyng og Hansen, 1982; Aslyng og Hansen, 1985).

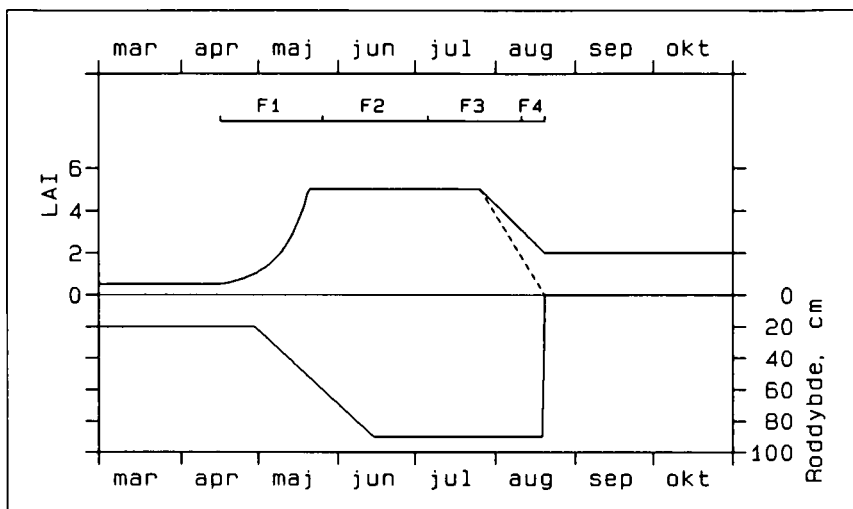
Temperatursumskravene, der bestemmende for udviklingen i vinterafgrødernes bladarealindeks fremgår af tabel 3.14. Temperatursumskravet for vækststart er udregnet på basis af normaler for døgnmiddellufttemperatur under antagelse af, at vækststart i et normalt år er den 16. april. Temperatursumskravene for vinterhvede og vinterbyg er beregnet med udgangspunkt i data fra Aslyng og Hansen (1985). For vinterrug og vinterraps er temperatursumskravene beregnet ud fra et skøn af udviklingen af bladarealindekset i et normalt år.

Rodudviklingen i vinterafgrøderne beregnes ved ligning 3.10. Ligningsparametrene er givet i tabel 3.15. Den maksimale rodudvikling z_{xA} er sat til 900 mm, tilsvarende som for flere af vårafgrøderne. Dog skal det påpeges, at z_{xA} ikke er entydigt bestemt. Aslyng (1978) angiver dybden 1000 mm for vinter- og flere vårafgrøder. Madsen og Holst (1987) angiver 900 mm for vårbyg.

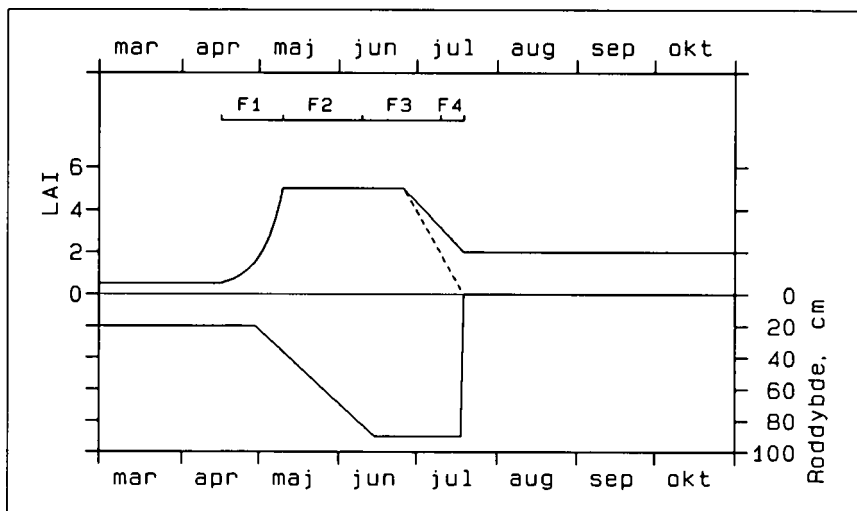
Simuleringer af bladareal- og rodudvikling samt vækstfasernes beliggenhed i vinterafgrøder er vist i figur 3.13 til 3.16. Simuleringerne er baseret på temperaturer i et normalt år.

Tabel 3.15: Effektiv roddebyrde z_r og rodvæksthastighed c_r for vinterafgrøder.

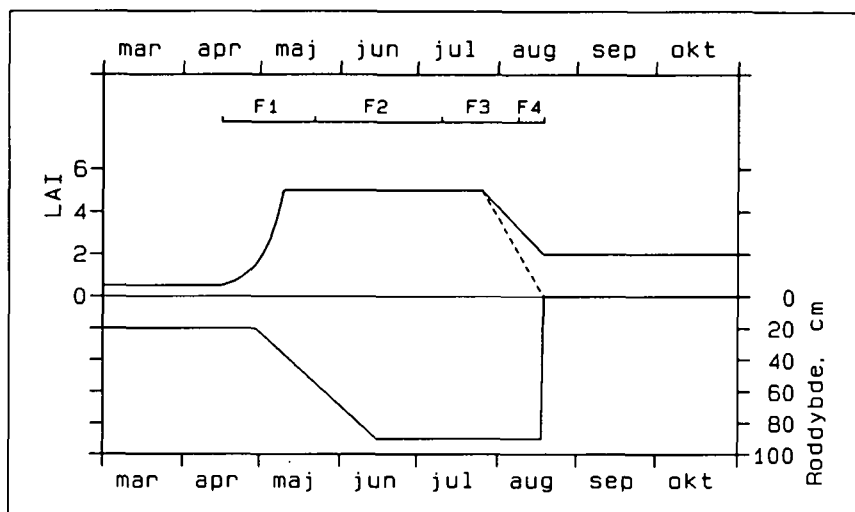
Afgrøder	z_0 mm	z_v mm	z_{xA} mm	z_m mm	c_r mm dag $^{-1}$
vinterbyg	200	200	900	0	15
vinterhvede	200	200	900	0	15
vinterraps	200	200	900	0	15
vinterrug	200	200	900	0	15



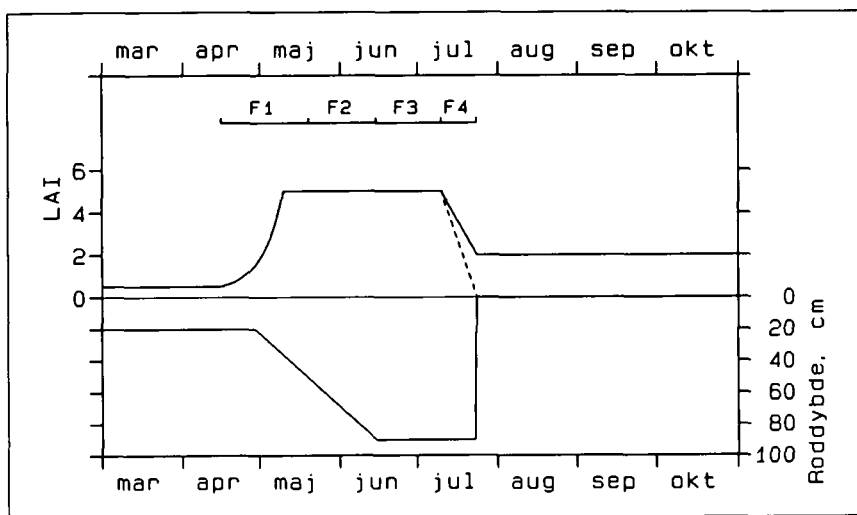
Figur 3.13: For vinterhvede simuleret grøn (---) og total bladarealindeks (—), effektiv roddebyde og vækstfaser i et normalt år. Dato for vækststart t_0 er 16. april. Høsttidspunkt t_h og brugerobserverede tidspunkter af afslutning for vækstfaser $t_{FI(obs)}$ er ikke definerede.



Figur 3.14: For vinterbyg simuleret grøn (---) og total bladarealindeks (—), effektiv roddebyde og vækstfaser i et normalt år. Dato for vækststart t_0 er 16. april. Høsttidspunkt t_h og brugerobserverede tidspunkter af afslutning for vækstfaser $t_{FI(obs)}$ er ikke definerede.



Figur 3.15: For vinterrug simuleret grøn (---) og total bladarealindeks (—), effektiv roddeby og vækstfaser i et normalt år. Dato for vækststart t_0 er 16. april. Høsttidspunkt t_h og brugerobserverede tidspunkter af afslutning for vækstfaser $t_{FI(obs)}$ er ikke definerede.



Figur 3.16: For vinterraps simuleret grøn (---) og total bladarealindeks (—), effektiv roddeby og vækstfaser i et normalt år. Dato for vækststart t_0 er 16. april. Høsttidspunkt t_h og brugerobserverede tidspunkter af afslutning for vækstfaser $t_{FI(obs)}$ er ikke definerede.

3.2 Jordtyper og vandkapaciteter

I MARKVAND-systemet benyttes data, der beskriver jordfysiske forhold for 10 jordtyper (JB1-10). En jordtype er karakteriseret ved en overjord (muldlaget) og en underjord. For disse lag er givet følgende parametre:

z_o er dybden af overjorden, mm,

θ_{fo} er volumetrisk vandindhold i overjorden ved markkapacitet,

θ_{wo} er volumetrisk vandindhold i overjorden ved visnegrænse,

θ_{fu} er volumetrisk vandindhold i underjorden ved markkapacitet,

θ_{wu} er volumetrisk vandindhold i underjorden ved visnegrænse, og

z_{xJ} er maksimal effektiv roddebyde, mm.

Endvidere er en jordtype beskrevet ved følgende parametre:

C_e er kapaciteten i evaporationsreservoiret, mm,

c_e er basisevaporationsfaktoren,

c_T er transpirationskonstanten, mm,

k_{qr} er afdræningskonstant for rodzonen, og

k_{qb} er afdræningskonstant for subzonen.

Den maksimale effektive roddebyde er i MARKVAND-systemet alene bestemt af afgrøden, når teksturen i jorden ikke er begrænsende for rodudviklingen, se afsnit 3.1. Flere undersøgelser peger, at især humus- og lerindholdet i jorden er bestemmende for rodudviklingen (Madsen, 1983; Aslyng og Hansen, 1982; Heick, 1972 og Olsen, 1958).

I MARKVAND-systemet antages begrænset rodudvikling, når humusindholdet er mindre eller lig med 2 %, og lerindholdet er mindre end 6 % i underjorden. Underjorden defineres herved som sandet. Omvendt er rodudviklingen ikke begrænset af teksturforhold, når enten humusindholdet er større end 2 % eller lerindholdet er større eller lig med 6 %. Underjorden defineres da som leret.

I tabel 3.16 er angivet parameterverdierne for jordtyperne 1-10. Værdierne for markkapacitet og visnegrænse i under- og overjord er fastlagt på baggrund af Madsen og Holst (1987), Aslyng og Hansen (1982) og Hansen (1976). Værdier for kapacitet i evaporationsreservoiret C_e er antaget afhængig af, om jordtypen er JB1-3. For øvrige jordtyper er C_e sat lig 10 mm. Aslyng og Hansen (1982) antager, at kapaciteten i evaporationsreservoiret er 10 mm og uafhængig af jordtypen. Basisevaporationsfaktoren c_e er sat til 0.15 for jordtyperne JB4-10, men antaget lavere for de sandede jorde JB1-3. Til forskel herfra er hos Aslyng og Hansen (1982) antaget, at basisevaporationsfaktoren er uafhængig af jordtype og lig 0.15. Transpirationskonstanten c_T er sat til 10.0 for jordtyperne JB5-10, men antaget højere for de sandede jorde JB1-4 i overensstemmelse med Kristensen og Jensen

Tabel 3.16: Jordfysiske parametre for forskellige jordtyper. Endvidere maksimal effektiv roddybde $z_{xJ'}$ i forskellige jordtyper med underjord beskrevet ved teksturoplysninger, hvorved underjorden ændrer karakter. For jordtyperne 1–4 er underjorden ændret fra sandet til leret. For jordtyperne 5–10 er underjorden ændret fra leret til sandet.

JBnr.	z_o	z_{xJ}	θ_{fo}	θ_{wo}	θ_{fu}	θ_{wu}	C_e	c_e	c_T	k_{qr}	k_{qb}	C_{rJ}	$z_{xJ'}$
1	300	500	0.20	0.05	0.13	0.05	6.0	0.08	12.0	0.6	0.6	61	800
2	300	600	0.28	0.06	0.24	0.06	8.0	0.12	12.0	0.3	0.3	120	800
3	300	600	0.23	0.06	0.20	0.06	7.0	0.10	12.0	0.5	0.5	93	900
4	300	600	0.28	0.07	0.23	0.06	10.0	0.15	12.0	0.3	0.3	114	900
5	300	900	0.31	0.12	0.26	0.10	10.0	0.15	10.0	0.3	0.3	153	800
6	300	900	0.34	0.13	0.28	0.10	10.0	0.15	10.0	0.3	0.3	171	800
7	300	900	0.42	0.20	0.33	0.15	10.0	0.15	10.0	0.3	0.3	174	800
8	300	900	0.45	0.20	0.43	0.24	10.0	0.15	10.0	0.3	0.3	189	800
9	300	900	0.45	0.20	0.44	0.25	10.0	0.15	10.0	0.3	0.3	189	800
10	300	900	0.45	0.20	0.39	0.23	10.0	0.15	10.0	0.3	0.3	171	800

(1975). Værdier for afdræningskonstanterne k_{qr} og k_{qb} er udtaget fra Aslyng og Hansen (1985), der dog kun anvender een afdræningskonstant gældende for hele jordprofilen. Maksimal effektiv roddybde z_{xJ} er for jordtyperne JB1-4 angivet under forudsætning af, at underjorden er sandet og begrænsende for rodudviklingen. For jordtyperne JB5-10 er z_{xJ} angivet under forudsætning af, at underjorden ikke er begrænsende for rodudviklingen. Værdier for z_{xJ} er udtaget fra Madsen og Holst (1987).

Den jordtypebestemte rodzonekapacitet C_{rJ} , der betegner kapaciteten for plantetilgængelig vand, beregnes ved ligning 3.16 ud fra mark- og visnekapacitet i over- og underjord samt jordtypens maksimale effektive roddybde z_{xJ} . I tabel 3.16 er C_{rJ} angivet for JB1-10.

Flere af de jordfysiske parametre kan ændres, såfremt brugeren angiver yderligere oplysninger om jordens beskaffenhed. Dybden af overjorden kan angives og z_o erstattes da af $z_{o(obs)}$. Værdierne for markkapacitet og visnekapacitet kan ligeledes ændres på baggrund af brugerens oplysninger om teksturforhold i henholdsvis over- og underjord. Markkapacitet, visnekapacitet og plantetilgængeligt vand i begge jordlag beregnes da ved ligningerne 3.13, 3.14 og 3.15 (Madsen og Holst, 1987).

$$\theta_f = 2.34(\% OM) + 0.70(\% L) + 0.47(\% S) + 0.18(\% FS) + 3.68 \quad (3.13)$$

hvor θ_f er volumetrisk vandindhold ved markkapacitet, OM er indhold af organisk stof, L er lerindholdet, S er siltindholdet og FS betegner indeholdet af finsand.

$$\theta_w = 0.55(\% OM) + 0.63(\% L) + 0.18(\% S) + 1.12 \quad (3.14)$$

hvor θ_w er volumetrisk vandindhold ved visnekapacitet.

$$\theta_F = 1.79(\% OM) + 0.07(\% L) + 0.29(\% S) + 0.18(\% FS) + 2.56 \quad (3.15)$$

hvor $\theta_F = \theta_f - \theta_w$ er plantetilgængeligt volumetrisk vandindhold.

Oplysninger vedrørende tekstur og JBnr. for underjorden $J_{(obs)}$ kan betyde ændring af den maksimale effektive roddybde z_{xJ} . Muligheden for ændringer i den maksimale effektive roddybde og dermed indhold af plantetilgængeligt vand er især vigtig for jordtyperne 3 og 4, hvor teksten i underjorden veksler mellem overvejende sandet eller overvejende leret. Disse vekslende teksturforhold forekommer i Danmark typisk i landskabstyper med moræne bakkeøer (Madsen og Holst, 1987).

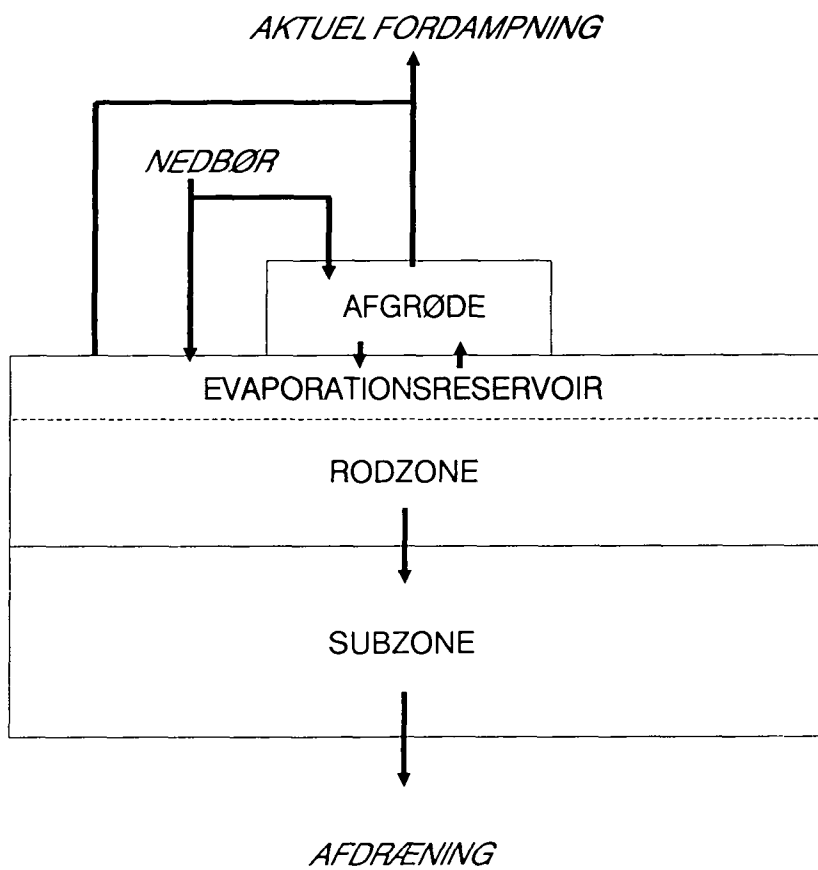
Er $J_{(obs)}$ defineret erstattes z_{xJ} med $z_{xJ'}$, jf. afsnit 3.1. $J_{(obs)}$ betegner brugeroplysninger vedrørende JBnr. og tekstur for underjorden. Angives et JBnr. for underjorden er $z_{xJ'}$ lig med den effektive roddybde z_{xJ} gældende for det opgivne JBnr. Angives endvidere teksturforhold, der for JB1-4 ændrer underjorden fra sandet til leret, antager $z_{xJ'}$ værdier givet i tabel 3.16. Angives teksturforhold for JB5-10, der ændrer underjorden fra leret til sandet, antager $z_{xJ'}$ værdier ligeledes givet i tabel 3.16. Angives teksturforhold, hvorved underjorden bibeholder status som henholdsvis sandet eller leret, antager $z_{xJ'}$ standardværdien z_{xJ} gældende for den aktuelle jordtype. Værdierne for $z_{xJ'}$ er udledt fra Madsen og Holst (1987).

3.3 Vandbalancemodel

Vandbalancemodellen i MARKVAND bygger på tidligere beskrevne modeller af Kristensen og Jensen (1975), Hansen (1984) og Olesen og Heidmann (1990). Tilsvarende modeller er også benyttet af Holst og Kristensen (1981) og Holst og Madsen (1988). I disse modeller bestemmes den aktuelle fordampning på grundlag af potentiel fordampning og forskellige antagelser om jord og afgrøde. Det antages, at den aktuelle fordampning E_a ikke kan overstige den potentielle fordampning E_p . Den aktuelle fordampning deles op i et bidrag fra evaporation fra jorden og et bidrag fra transpiration og evaporation fra afgrøden. Forholdet mellem aktuel og potentiel transpiration antages at være en funktion af vandindholdet i jorden.

En oversigt over modellens vigtigste elementer er givet i figur 3.17. Det ses, at modellen indeholder en række koblede reservoirer. Det er kun vegetationen samt jorden ned til maksimal effektiv roddybde, der betragtes.

I vandbalancemodellen antages jorden at være opdelt i en rodzone og en subzone. Rodzonen går fra jordoverfladen til den effektive roddybde z_r , hvor z_r beregnes ved ligning 3.10. Subzonen går fra den effektive roddybde til den maksimale effektive roddybde z_x , hvor z_x beregnes ved ligning 3.11. Rodzonen vil altid have en mindste dybde z_e svarende til kapaciteten af evaporationsreservoirret C_e . Fordampning fra jorden kan kun foregå fra



Figur 3.17: Oversigt over reservoirer i vandbalancemodellen.

rodzonen, enten gennem planternes vandoptagelse eller ved fordampning fra jordoverfladen. Kapaciteten for plantetilgængelig vandmængde ved markkapacitet i rodzone C_r og subzone C_b udregnes på grundlag af opdelingen af jordsøjlen i overjord og underjord:

$$C_r = \begin{cases} \min[C_e, \theta_{Fo} z_r] & z_r \leq z_o \\ \min[C_e, \theta_{Fo} z_o + \theta_{Fu}(z_r - z_o)] & z_r > z_o \end{cases} \quad (3.16)$$

$$C_b = \theta_{Fo} z_o + \theta_{Fu}(z_r - z_o) - C_r \quad (3.17)$$

hvor $\theta_{Fo} = \theta_{fo} - \theta_{wo}$ er plantetilgængeligt volumetrisk vandindhold i overjord, $\theta_{Fu} = \theta_{fu} - \theta_{wu}$ er plantetilgængeligt volumetrisk vandindhold i underjorden, og z_o er dybden af overjorden i mm.

Vandbalancemodellen holder styr på vandindholdet i en række reservoirer, der kort vil blive beskrevet her. For alle reservoirer angives mængderne i mm.

Interceptionsreservoiret V_I indeholder mængden af tilbageholdt vand på vegetationens overflade. Kapaciteten af interceptionsreservoiret C_I antages at afhænge af det totale bladarealindeks L :

$$C_I = c_i L \quad (3.18)$$

hvor c_i er en kapacitetskonstant, der sættes til 0.5 mm. Vandindholdet i interceptionsreservoiret kan ikke overstige C_I .

Rodzonereservoiret V_r indeholder mængden af plantetilgængeligt vand i den del af jorden, hvor planternes rødder effektivt kan optage vandet. Indeholdt i rodzonereservoiret er dog også evaporationsreservoir og øvre rodzonereservoir. Kapaciteten af rodzonereservoiret C_r vil variere med roddybden og også afhænge af jordtypen. Der antages ikke at være nogen øvre grænse for vandindholdet i dette reservoir. Vand ud over C_r vil dog afdræne til subzonen med en konstant hastighed.

Evaporationsreservoiret V_e indeholder mængden af plantetilgængeligt vand, som kan fordampe direkte fra jordoverfladen. Kapaciteten af evaporationsreservoiret C_e antages at være en jordtypeafhængig konstant, jf. afsnit 3.2. Evaporationsreservoiret indgår som en del af rodzonereservoiret. Vandindholdet i dette reservoir kan ikke overstige C_e .

Det øvre rodzonereservoir V_u benyttes i de tilfælde, hvor rodzonen er tømt for vand i en sådan grad, at planternes transpiration nedsættes, og en del af jorden er genopfugtet ved nedbør eller vanding. Hvis den tilførte vandmængde ikke er stor nok til at fylde rodzonereservoiret, vil det kun være øvre jordlag, der bliver fugtet til markkapacitet. Vegetationen vil primært udnytte dette vand til transpiration, og det øvre rodzonereservoir indeholder denne plantetilgængelige vandmængde. Kapaciteten af det øvre rodzone reservoir C_u er således en meget dynamisk størrelse. Det øvre rodzonereservoir indgår i øvrigt som en del af rodzonereservoiret.

Subzonereservoiret V_b indeholder mængden af plantetilgængeligt vand i subzonen, dvs. i laget mellem den effektive roddybde og den maksimale effektive roddybde. Der kan normalt ikke fordampe vand fra denne zone. Kapaciteten af subzonereservoiret C_b afhænger af såvel roddybde som jordtype. Der antages ikke at være nogen øvre grænse for vandindholdet i dette reservoir. Vandindhold ud over C_b vil dog afdræne med en konstant hastighed.

Den potentielle fordampning E_p deles op i et bidrag fra evaporation fra jordoverfladen E_{pe} og et bidrag fra afgrøden E_{pc} :

$$E_{pe} = E_p \exp(-k_p L) \quad (3.19)$$

$$E_{pc} = E_p [1 - \exp(-k_p L)] \quad (3.20)$$

hvor L er afgrødens totale bladarealindeks, og k_p er en ekstinktionskoefficient, der sættes til 0.6.

Afgrødens bidrag deles yderligere op mellem fordampning fra grønne aktive blade E_{pcg} og fordampning fra gule inaktive blade E_{pcy} :

$$E_{pcg} = E_p [1 - \exp(-k_p L_g)] \quad (3.21)$$

$$E_{pcy} = E_{pc} - E_{pcg} \quad (3.22)$$

hvor L_g er bladarealindekset for grønne blade.

Modellen køres som et bogholderisystem, og ved begyndelsen af hvert dagligt tidsskridt tilføres nedbør P og vandingsmængde I til de relevante reservoirer. Før dette sker skal reservoirvariablene V_r , V_b , C_r og C_b opdateres svarende til den nye roddybde. Kapaciteterne beregnes efter ligning 3.16 og 3.17, som C_r^* og C_b^* . Vandindholdet i de to reservoirer beregnes således:

$$V_r^* = \begin{cases} V_r + (C_r^* - C_r)V_r/C_r & C_r^* \leq C_r \\ V_r + (C_r^* - C_r)V_b/C_b & C_r^* > C_r \end{cases}$$

$$V_b^* = V_b - (V_r^* - V_r) \quad (3.23)$$

$$V_r = V_r^* \quad (3.24)$$

$$V_b = V_b^* \quad (3.25)$$

$$(3.26)$$

Derefter sættes $C_r = C_r^*$ og $C_b = C_b^*$.

Endvidere justeres vandindhold og kapacitet af det øvre rodzonereservoir. Dette er kun nødvendigt, hvis roddybden er faldende:

$$C_u^* = \min[C_r, C_u] \quad (3.27)$$

$$V_u = \begin{cases} V_u - (C_u - C_u^*)V_u/C_u & C_u^* > 0 \\ 0 & C_u^* = 0 \end{cases} \quad (3.28)$$

$$C_u = C_u^* \quad (3.29)$$

Nedbør og vandingsmængde ($P + I$) tilføres først interceptionsreservoir. Hvis der herefter er overskydende vand, tilføres denne vandmængde evaporationsreservoir og rodzone-reservoir:

$$V_I^* = \min[C_I, V_I + P + I] \quad (3.30)$$

hvor V_I^* er det nye vandindhold i interceptionsreservoir.

Vandindholdet i interceptionsreservoir fordeles endvidere mellem det grønne og det gule bladareal. Herefter beregnes den vandmængde, der skal tilføres evaporationsreservoir og rodzonerreservoir:

$$P_I = P + I - (V_I^* - V_I) \quad (3.31)$$

$$V_I = V_I^* \quad (3.32)$$

$$V_e = V_e + P_I \quad (3.33)$$

$$V_r = V_r + P_I \quad (3.34)$$

Evaporationen fra jordoverfladen E_{ae} antages at foregå med potentiel hastighed, så længe der er vand i evaporationsreservoir. Herefter trækkes vand fra rodzone og subzone med en hastighed svarende til $c_e E_{pe}$, dvs.

$$E_{ae} = \begin{cases} E_{pe} & V_e \geq E_{pe} \\ c_e E_{pe} (V_r + V_b) / (C_r + C_b) & V_e < E_{pe} \wedge E_{pe} \leq V_r + V_b \\ 0 & V_e < E_{pe} \wedge E_{pe} > V_r + V_b \end{cases} \quad (3.35)$$

hvor c_e er en jordtype afhængig basisevaporationsfaktor, jf afsnit 3.2.

Evaporationen trækkes først fra rodzonen. Hvis denne bliver udtørret, trækkes vandet fra subzonen:

$$V_e = \min[C_e, (V_e - E_{ae})_+] \quad (3.36)$$

$$V_r^* = (V_r - E_{ae})_+ \quad (3.37)$$

$$V_b = (V_b - E_{ae} + V_r - V_r^*)_+ \quad (3.38)$$

$$V_r = V_r^* \quad (3.39)$$

Endvidere opdateres det øvre rodzonerreservoir:

$$V_u = (V_u + P_I - E_{ae})_+ \quad (3.40)$$

$$C_u = \min[C_r, C_u + (P_I - E_{ae})_+] \quad (3.41)$$

Evaporation fra interceptionsreservoiret for grønt E_{aIy} og gult E_{aIy} bladareal antages at foregå med potentiel hastighed, dvs.

$$E_{aIy} = \begin{cases} \min[V_I L_y / L, E_{pcy}] & L > 0 \\ 0 & L = 0 \end{cases} \quad (3.42)$$

$$E_{aIg} = \begin{cases} \min[V_I L_g / L, E_{pcg}] & L > 0 \\ 0 & L = 0 \end{cases} \quad (3.43)$$

$$E_{aI} = E_{aIg} + E_{aIy} \quad (3.44)$$

Et eventuelt overskydende fordampningskrav fra afgrødens grønne bladareal tilskrives kravet til planternes transpiration:

$$E_{pT} = E_{pcg} - E_{aIg} \quad (3.45)$$

Transpirationen vil være afhængig af jordens vandindhold. Der benyttes en empirisk funktion for transpirationens afhængighed af plantetilgængeligt vand i jorden (Kristensen og Jensen, 1975):

$$E_{aTr} = E_{pT} \{1 - [(C_r - V_r)/C_r]^{c_T/E_{pT}}\} \quad (3.46)$$

$$E_{aTu} = E_{pT} \{1 - [(C_u - V_u)/C_u]^{c_T/E_{pT}}\} \quad (3.47)$$

hvor c_T er en transpirationskonstant, mm, jf. afsnit 3.2.

Sammenhæng mellem den relative transpiration E_{aT}/E_{pT} og jordens udtørningsgrad er illustreret i figur 3.18.

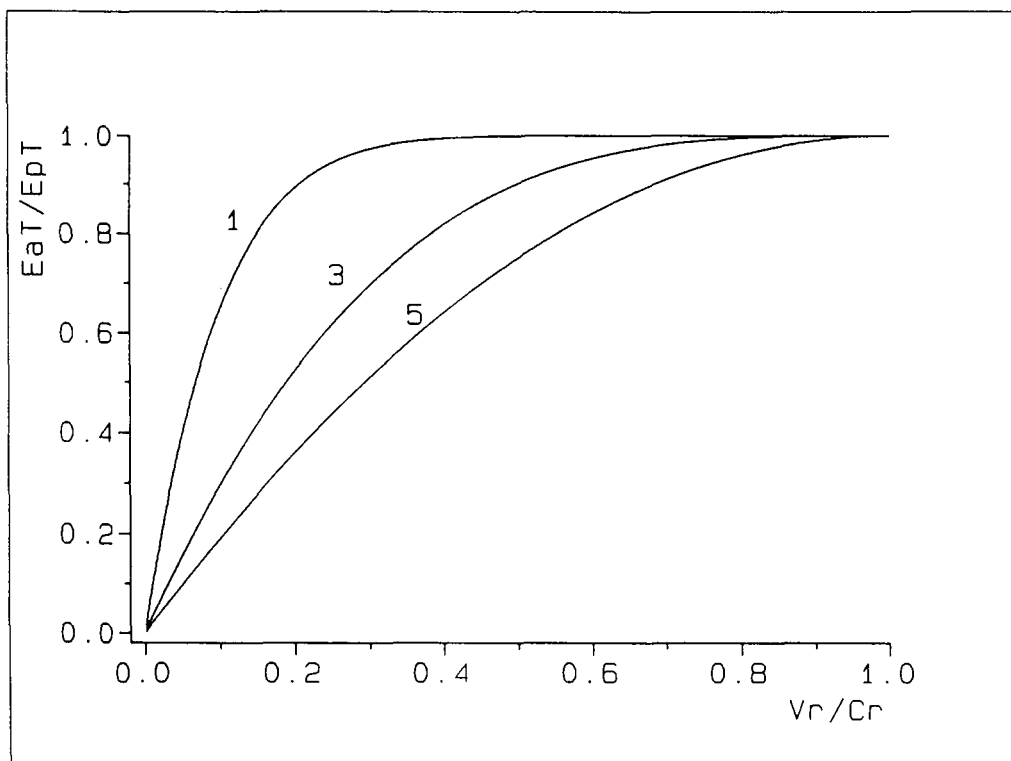
Som det fremgår af ovenstående ligninger beregnes transpirationen for både rodzone reservoir E_{aTr} og det øvre rodzone reservoir E_{aTu} . Det antages, at planterne tager vandet fra det reservoir, hvor det er lettest tilgængeligt. Den aktuelle transpiration E_{aT} beregnes da som den største af disse værdier:

$$E_{aT} = \min[V_r, \max[E_{aTr}, E_{aTu}]] \quad (3.48)$$

Hvis transpirationen trækkes fra rodzonereservoiret, nulstilles vandindholdet og kapaciteten af det øvre rodzone reservoir. Endvidere trækkes fordampningen fra de relevante reservoirer.

$$V_I = V_I - E_{aI} \quad (3.49)$$

$$V_u = \begin{cases} (V_u - E_{aT})_+ & E_{aT} = E_{aTu} \\ 0 & E_{aT} > E_{aTu} \end{cases} \quad (3.50)$$



Figur 3.18: Relativ transpiration afhængig af relativt vandindhold i jorden ved forskelligt fordampningstryk, henholdsvis 1, 3 og 5 mm dag⁻¹. Der er benyttet en transpirationskonstant c_T på 10 mm.

$$C_u = \begin{cases} C_u & E_{aT} = E_{aTu} \\ 0 & E_{aT} > E_{aTu} \end{cases} \quad (3.51)$$

$$V_r = V_r - E_{aT} \quad (3.52)$$

Den aktuelle fordamning E_a kan beregnes ved summation af de enkelte led:

$$E_a = E_{ae} + E_{aI} + E_{aT} \quad (3.53)$$

Hvis jordens vandindhold efter fordampning overstiger markkapacitet, antages den overskydende vandmængde at afdræne med en konstant hastighed. Afdræningskonstanterne k_{qr}, k_{qb} er jordtypeafhængige og defineret for lagtykkelser svarende til den maksimale rod- dybde og tilpasses den aktuelle jordlagstykkelse ved en lineær tilnærmelse:

$$D_r = [k_{qr} + (1 - k_{qr}) \frac{z_x - z_r}{z_x}] (V_r - C_r)_+ \quad (3.54)$$

$$D_b = [k_{qb} + (1 - k_{qb}) \frac{z_r}{z_x}] (V_b + D_r - C_b)_+ \quad (3.55)$$

hvor D_r er afdræning ud af rodzonen, og D_b er afdræning ud af subzonen.

Som afslutning på det daglige modeltrin justeres vandindhold i rodzone og subzone derefter for afdræning:

$$V_r = V_r - D_r \quad (3.56)$$

$$V_b = V_b + D_r - D_b \quad (3.57)$$

Før det første gennemløb af vandbalancemodellen skal reservoir variablene sættes til nogle faste startværdier. I MARKVAND benyttes følgende startværdier gældende for den 1. april:

- Roddybden z_r sættes til en for afgrøden fast defineret startroddybde z_0 . Denne benyttes til beregning af C_r og C_b .
- Vandindholdet i rodzone V_r og subzone V_b sættes til markkapacitet.
- Vandindholdet i evaporationereservoir V_e sættes til C_e .
- Vandindholdet i interceptionsreservoir V_I sættes til 0.
- Vandindholdet V_u og kapaciteten C_u af det øvre rodzonereservoir sættes til 0.

3.4 Beslutningsmodel for vanding

En utilstrækkelig vandforsyning i en afgrøde kan afhjælpes ved vanding. Vanding til en afgrøde nødvendiggør en styringsparameter, der ved en bestemt værdi definerer vandings-tidspunktet. I tilknytning hertil kræves ligeledes kendskab til tilrådelig vandingsmængde og -intensitet.

Behovet for en styringsparameter samt forslag om vandingsmængde og -intensitet udspringer af kravet om at opretholde et potentielt produktionsniveau og samtidig opnå en optimal nyttevirkning af vandingsvandet.

Ovennævnte forhold indgår i en egentlig vandingsplanlægning eller vandingsstrategi. Ved planlægning eller strategi forstås her en metode til fordeling af vandingsvand i en afgrødes vækstperiode. Metoden fastlægges ved vækstens begyndelse, men skal løbende justeres ud fra kendskab til afgrødens vandforbrug og naturlige vandforsyning, herunder afgrødens vækst (top og -rodudvikling), klimatiske data (nedbør og fordampning) samt måling eller beregning af ændringer i jordens vandindhold.

Fastlæggelse og gennemførelse af en vandingsstrategi er endvidere bestemt af, om vandingskapaciteten er ubegrænset (tilstrækkelig mængde og forsyningshastighed af vandingsvandet) eller begrænset.

En mulig styringsparameter, der definerer vandingstidspunktet må naturligt vælges blandt de parametre, som indikerer begyndende vandstress hos planten. Valget må endvidere afhænge af, hvorvidt en overskridelse af en fastlagt parameterværdi er bestemmende for det endelige udbytte og udbyttekvaliteten. Flere parametre har gennem tiden været genstand for undersøgelser i litteraturen, blandt andre relativ evapotranspiration (Hiler og Clark, 1971; Mogensen, 1980; Imtiyaz et al., 1982; Imtiyaz, 1983), bladvandspotentiale (Hiler og Clark, 1971; Stegman, 1983), relativt bladarealindeks (Imtiyaz et al., 1982; Imtiyaz, 1983) og relativt jordvandsunderskud (French og Legg, 1979; Mogensen og Hansen, 1979; Doorenbos og Kassam, 1979).

I MARKVAND-systemets beslutningsmodel udskrives forslag om vanding under forudsætning af, at vandingskapaciteten ikke er begrænset. Styringsparameteren for udløsning af vanding er relativt jordvandsunderskud i den aktuelle rodzone. Generelt synes halvdelen af den plantetilgængelige vandmængde under danske forhold at kunne optages, før der optræder en betydelig nedgang i en afgrødes produktion (Mogensen og Hansen, 1979). For en given afgrøde er tørkefølsomheden i MARKVAND-systemet karakteriseret ved et tilladeligt relativt jordvandsunderskud A_F , der afhænger af afgrødens fænologiske udvikling F . Det tilladelige deficit for afgrøderne i MARKVAND-systemet er fastlagt ud fra vandingsforsøg (Anonym, 1985). Parameterverdier for afgrøderne og disses forskellige vækstfaser er givet i tabel 3.17.

Det ses i tabel 3.17, at $A_{F1} = 999$ for vårafgrøder i vækstfase F_1 . Denne høje parameter-værdi er indlagt, idet der bevidst ikke udskrives vandingsforslag i afgrødernes etablerings-

Tabel 3.17: Tilladeligt relativt jordvandsunderskud A_{Fl} (%) for forskellige afgrøder og vækstfaser.

Afgrøde	A_{F1}	A_{F2}	A_{F3}	A_{F4}	A_{F5}
græs	50	-	-	-	-
bederoer ¹⁾	999	70	45	55	-
ærter	999	65	45	60	999
kartofler ²⁾	999	35	35	45	999
vårbyg	999	50	50	60	999
vinterbyg	60	50	60	999	-
vårraps	999	65	50	65	999
majs	999	60	50	60	999
vinterraps	65	50	65	999	-
vinterrug	70	55	70	999	-
vinterhvede	65	45	60	999	-
1) gælder for både fodersukker- og sukkerroer					
2) gælder for både tidlige, middeltidlige og sildige kartofler					

fase. Begrundelsen herfor er dels, at afgrøderne oftest kan kompensere for en eventuel tørkepåvirkning ved fortsat rodudvikling til vandholdende jordlag, og dels at der vil være risiko for, at tidlig vanding med den anvendte vandingsteknik i landbruget beskadiger planterne. Ligeledes ses i tabellen, at $A_F = 999$ i afgrødernes modningsperiode (vækstfase F_4 eller F_5), idet der i denne vækstfase ikke opnås nogen nyttevirkning af vanding. Dette gælder dog ikke bederoer.

I beslutningsmodellen beregnes en vandingsprognose for en prognoseperiode 5 dage frem. Kriteriet for, at en vanding udløses, er afhængig af det relative jordvandsunderskud i det øvre rodzone reservoir $A_u = 100(C_u - V_u)/C_u$ og det relative underskud i rodzonen $A_r = 100(C_r - V_r)/C_r$. Hvis relativt jordvandsunderskud er større end kriteriet A_{Fl} udløses en vanding. Kravet for at der foreslås en vanding, er altså givet ved følgende udsagn:

$$A_u > A_{Fl} \wedge A_r > A_{Fl} \quad (3.58)$$

Størrelsen af den foreslåede vandingsmængde svarer til enten underskuddet i rodzonen justeret for vandingseffektiviteten eller en brugerangivet mængde $C_{I(obs)}$, dvs:

$$I_f = \min \left[C_{I(obs)}, \frac{C_r - V_r}{I_E} \right] \quad (3.59)$$

hvor I_f er den foreslåede vandingsmængde, mm. I_E er vandingseffektiviteten, der er

defineret ved standardværdien 90 %, eller brugerangivet $I_{E(obs)}$.

3.5 Databeskrivelse

I dette afsnit redegøres for datastruktur, inddata og uddata i MARKVAND-systemet. Inddata og uddata beskrives kortfattet. For en mere udtømmende beskrivelse henvises til MARKVAND-systemets brugervejledning (Plauborg, 1990). Hvor inddataelementer indgår som parametre i systemets modeller, er variabelnavne anført.

3.5.1 Datastruktur

MARKVAND benytter en database, hvis skematiske opbygning er vist i figur 3.19. Databasen indeholder bl.a. standardoplysninger om jordtyper og afgrøder, data for de meteorologiske forhold og oplysninger om ejendomme og marker. Alle data lagres i tabeller, og figur 3.19 viser sammenhængen mellem disse tabeller.

En detaljeret beskrivelse af tabellerne i MARKVAND er givet af Olesen og Plauborg (1990). Her gives kun en kort redegørelse for de enkelte tabeller og sammenhængen mellem disse.

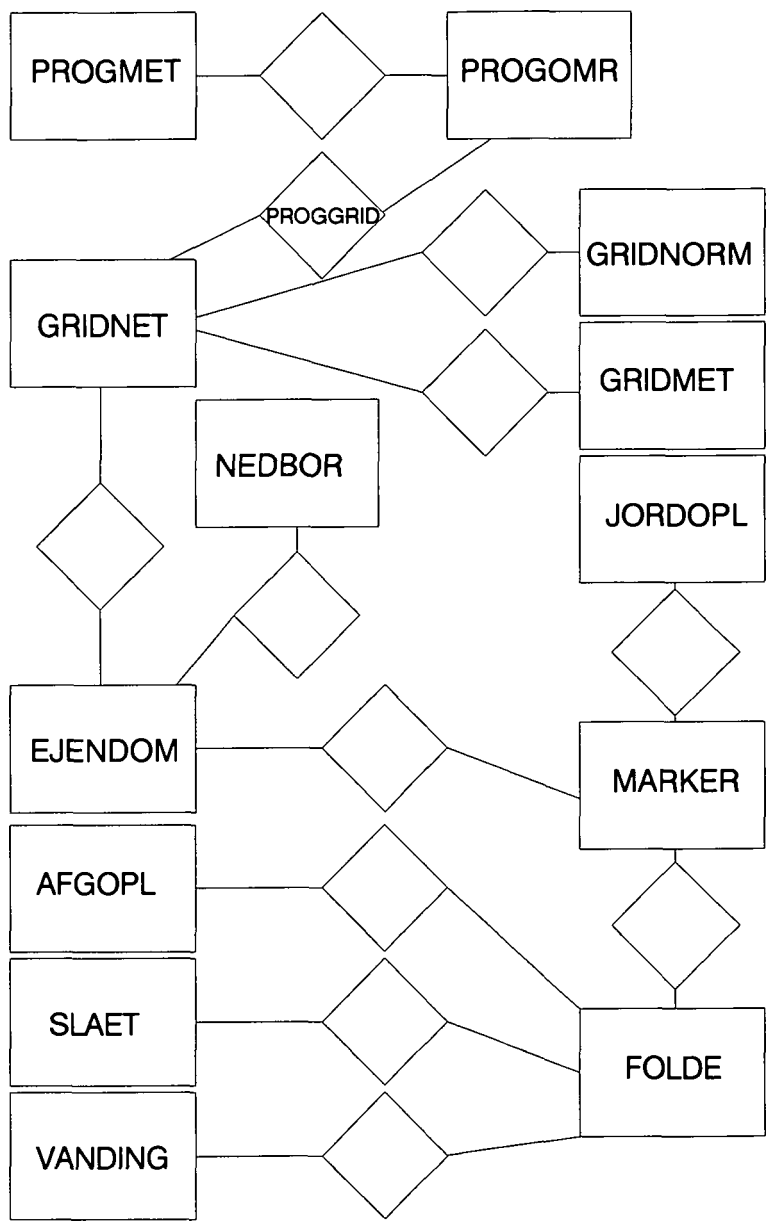
De meteorologiske data omfatter data i klimagrid (GRIDNET, GRIDNORM og GRIDMET), meteorologiske prognoser (PROGRID, PROGOMR og PROGNET), og nedbør på den enkelte ejendom (NEDBOR).

GRIDNET indeholder oplysninger om placeringen af kvadraterne i klimagridet, jf. tabel B.1 i Appendiks B. Til hvert kvadrat er knyttet nogle normaler for temperatur og potentiel fordampning beskrevet ved fourierrækker. Disse parametre i fourierrækkerne ligger i GRIDNORM, jf. tabel B.2 og B.3. De aktuelle klimadata lagres i GRIDMET. Her er der for hvert kvadrat og hver dag gemt oplysninger om middeltemperatur og potentiel fordampning.

Femdøgnsprognoiser for nedbør og potentiel fordampning for fire prognoseområder lagres i PROGNET. Data lagres som daglige værdier for hver dag i prognoseperioden. En oversigt over prognoseområderne findes i PROGOMR, og sammenhængen mellem prognoseområder og kvadrater i klimagridet findes i PROGRID.

Nedbør skal registreres på den enkelte ejendom. Disse nedbørsdata lagres som døgnværdier i NEDBOR, der er knyttet til ejendomsoplysningerne.

De generelle oplysninger om hver ejendom gemmes i EJENDOM. Det er f.eks. oplysninger om ejendommens navn, beliggenhed, vandingskapacitet m.v. Ejendommen er knyttet til klimagridet via ejendommens placering, der enten kan angives ved et klimagrid nummer eller ved længdegrad og breddegrad.



Figur 3.19: E/R-diagram for databasen i MARKVAND.

Til hver ejendom er knyttet en række marker, hvis stamoplysninger gemmes i MARKER. For hver mark lagres bl.a. oplysninger om markens navn, størrelse, jordtype og evt. tekstur i over- og underjorden. Afhængig af hvor mange informationer der gives om hver mark, kan det være nødvendigt at trække på standardværdier for forskellige jordtyper. Disse standardværdier ligger i JORDOPL.

Oplysningerne om udnyttelsen af markerne i et givet år ligger i FOLDE. Her kan markerne også underopdeles i enheder, som behandles forskelligt f.eks. med forskellige afgrøder eller vandingstidspunkter og mængder. I FOLDE ligger for hver enhed (fold) oplysninger om dennes størrelse, afgrøde, maksimal vandingsmængde og observerede udviklingstrin for afgrøden, f.eks. dato for fremspiring og høst.

Parametre til beregning af udviklingstid, bladareal og rodedybde for afgrøder vha. temperatursummer ligger i AFGOPL. Disse oplysninger knyttes til foldene ved hjælp af afgrødenummeret.

Hvis der er tale om en græsafgrøde, skal der også gives oplysninger om datoer for slæt. Disse slætdatoer gemmes i SLAET og knyttes til FOLDE vha. ejendommens og foldens nummer.

Der lagres endvidere oplysninger om tidspunkt og mængder for de enkelte vandinger samt evt. vandingens effektivitet. Vandingsoplysningerne gemmes i VANDING, som er knyttet til FOLDE via ejendommens og foldens nummer.

3.5.2 Inddata

Vandingsstyringssystemet kræver som minimum et vist antal inddataelementer. Programmet afvikles da på systemets mindste inddata-niveau.

Nødvendige inddata er opdelt i tre typer:

1. Meteorologiske data.
2. Ejendomsdata.
3. Mark- og afgrødedata.

De **meteorologiske data** omfatter følgende dataelementer:

- Potentiell fordampning E_p , mm dag⁻¹.
- Døgnmiddel af lufttemperatur T , °C.
- Ejendommens nedbør P , mm dag⁻¹.

Potentiel fordampning og lufttemperatur fra klimagrid leveres f.eks. dagligt via elektronisk post fra Landbrugets EDB-Center. Alternativt kan disse skønnes af brugeren. Ejendommens nedbør aflæses dagligt kl. ca. 8.00 morgen på ejendommens nedbørsmåler. Ved indtastning af daglig nedbør angives nedbørsmængden i mm. Der korrigeres ikke normalt til jordoverfladehøjde, men antages, at nedbørsmåleren er placeret under gode læforhold.

Under **ejendomsdata** skal brugeren identificeres og ejendommens geografiske placering angives. Her skal ligeledes opgives parameterværdier, der karakteriserer vandingsudstyr. Dette omfatter følgende dataelementer:

- Brugernavn, adresse.
- Gridfeltnummer eller bredde- og længdegrad.
- Vandingskapacitet, $\text{m}^3 \text{ time}^{-1}$.

Gridfeltnummeret angiver nummeret på et kvadrat i klimagriddet og dermed den geografiske placering af ejendommen. Den geografiske placering kan alternativt angives ved ejendommens koordinater i form af bredde- og længdegrad. Koordinaterne omregnes derefter til det tilhørende gridfeltnummer.

Endvidere skal markerne på ejendommen beskrives med hensyn til størrelse og jordtype. Det drejer sig om følgende dataelementer:

- Mark navn.
- Mark areal, ha.
- Jordtype, dvs. JBnr. for overjorden.

Under **mark- og afgrødedata** skal afgrøderne på de enkelte marker beskrives, dvs.:

- Afgrødenavn.
- Fremspiringsdato for vårafgrøder t_0 .
- Afhugningstidspunkter i græs t_{Cj} .
- Vandingstidspunkter og -mængde I , dato og mm.

Fremspiring angiver den dag, hvor hovedparten af planterne er fremspirede og rækkerne tydeligt kan anes. Afhugningstidspunkter angiver begyndelsestidspunkter for afhugning (slæt, staldfodring eller afgræsning) i græs.

Tabel 3.18: Størrelsen af potentiel fordampning (mm dag^{-1}) baseret på en kvalitativ beskrivelse af vejret.

Overskyet, høj luftfugtighed	1
Skyet, høj luftfugtighed	2
Let skyet, lav luftfugtighed	3
Skyfrit, tør luft, høj temperatur, blæsende	4
Skyfrit, meget tør luft, høj temperatur, blæsende	5

3.5.3 Valgfrie inddata

Indtastes elementer fra gruppen valgfrie inddata kan vandingsstyringssystemet afvikles på et højere niveau.

Valgfrie inddata er ligeledes opdelt i tre typer:

1. Nedbørs- og fordampningsprognosedata.
2. Ejendomsdata.
3. Mark- og afgrødedata.

Prognosedata kan indtastes i 4 regioner dækkende Nordlige Jylland, Sydlige Jylland, Øerne og Bornholm. Fem-døgns nedbørsprognoser udarbejdes dagligt af Danmarks Meteorologiske Institut. Størrelsen af den daglige potentielle fordampning i prognoseperioden baseres på en kvalitativ beskrivelse af vejret i prognoseperioden, se tabel 3.18. Indlægges ingen fordampningsdata, anvendes normalværdier for potentiel fordampning i den pågældende periode.

Under **ejendomsdata** kan angives maksimal vandingsmængde pr. vanding $C_{I(obs)}$, mm.

Valgfrie **markdata** omfatter oplysninger om vandingseffektivitet og jordbundsoplysninger. Den effektive del af den tildelte vandmængde reduceres om dagen ofte i størrelsesordenen 10-20 % på grund af vandtab, svarende til en vandingseffektivitet på 80-90 %. Vandingseffektiviteten kan om natten sættes til 95-100 %. Vandingseffektiviteten afhænger af vindhastighed, vandingsteknik og -metode (sprinkleranlæg eller vandingsmaskine), samt vandingstidspunktet (vanding om dagen eller vanding om natten). En uddybende beskrivelse af vandtab ved vanding er givet af Mogensen (1990). Vandingseffektiviteten $I_{E(obs)}$ kan angives individuelt for den enkelte vanding.

For nærmere at beskrive en marks jordtype kan brugeren indlægge mere detaljerede jordbundsoplysninger:

- Muldlagets dybde z_o (max. 90 cm).
- Tekstur i muldrag.
- Yderligere jordbundsoplysninger J_{obs} dvs.

Tabel 3.19: Brugerobservationer af afgrøders udviklingstrin t_0 , $t_{FI(obs)}$ og t_h .

Dato for	Vårbyg	Vinterbyg	Vinterhvede	Vinterrug
Vækststart		t_0	t_0	t_0
Beg. skridning	t_{F2}			
Gulmodenhed	t_{F4}	t_{F3}	t_{F3}	t_{F3}
Høst	t_h	t_h	t_h	t_h

Tabel 3.20: Brugerobservationer af afgrøders udviklingstrin t_0 , $t_{FI(obs)}$ og t_h .

Dato for	vårraps	vinterraps	ærter	majs
Vækststart		t_0		
Beg. blomstring	t_{F2}	t_{F1}	t_{F2}	t_{F2}
Afsl. blomstring			t_{F3}	
Fleste bælg brune/frø hårde			t_{F4}	
Beg. gulfarvning af skulper	t_{F4}	t_{F3}		
Høst	t_h	t_h	t_h	t_h

- JBnr. for underjord.
- Tekstur i underjord.

Dybden af muldlaget varierer ofte på ejendommens marker. En repræsentativ værdi kan angives for den enkelte mark. Tekstur i muldlaget bestemmes på normal vis ved udtagning af en jordprøve i muldlaget. Det anbefales også at udtage en jordprøve i dybden 50-60 cm for bestemmelse af tekstur i underjorden. Observeres et markant tekturelt skifte, der er repræsentativ for underjorden, i en mindre dybde, bør jordprøven udtages fra dette jordlag.

Dataelementerne under **afgrødedata** beskriver afgrødernes fænologiske udvikling. I tabel 3.19, 3.20 og 3.21 er der for hver afgrøde angivet de enkelte udviklingstrin, der kan observeres af brugeren $t_{FI(obs)}$.

Vækststart angiver, hvornår overvintrede afgrøder begynder at vokse efter vinteren. Den

Tabel 3.21: Brugerobservationer af afgrøders udviklingstrin t_0 , $t_{FI(obs)}$ og t_h .

Dato for	kartofler ¹⁾	bederoer ²⁾	græs
Vækststart			t_0
Beg. knolddannelse	t_{F2}		
Høst	t_h	t_h	
1) gælder for både tidlige, middeltidlige og sildige kartofler			
2) gælder for både fodersukker- og sukkerroer			

varierer fra år til år. En fastsættelse heraf beror på brugerens skøn/erfaring. I de fleste tilfælde vil standardværdien dog være tilstrækkelig. *Begyndende skridning*: Første aks netop synlige, stak netop synlig (Feekes skala 10.1). *Begyndende knolddannelse*: Tidspunktet fastlægges ved opgravning og observation af kartoffelplantens rodnet. *Begyndende blomstring*: Første blomst udsprunget. *Afsluttende blomstring*: De fleste knopper er afblomstret. *Gulmodenhed*: Kernernes indhold blødt, men tørt (Feekes skala 11.2). *Høst* angiver tidspunkt for høst af afgrøden.

3.5.4 Betydning af brugerobservationer

Afvikles vandingsstyringssystemet på grundlag af de inddata som er absolut nødvendige, fås en vandingsvejledning baseret på systemets standard-værdier (niveau-1). Dette får følgende betydning for afgrødens fænologiske udvikling og rodzonekapaciteten. Afgrødens fænologiske udvikling simuleres som udviklingen i en normal vækstperiode, hvor afgrøden er velforsynet med vand og næringsstoffer. Systemet justerer dog afgrødens udvikling på grundlag af de indtastede temperaturer. Rodzonekapaciteten for den pågældende jordtype og afgrøde, udregnes på basis af standardværdier for markkapacitet i muldlag og underjord samt effektiv roddybde.

Indtastes nogle af de valgfrie inddata fås en vandingsvejledning på et højere niveau. Kvaliteten af vandingsvejledningen øges især ved indtastning af valgfrie inddata, der beskriver jordtypen og afgrødens udvikling.

3.5.5 Uddata

MARKVAND-systemet kan levere uddata både i form af skærbilleder og udskrift på printer. Uddata omfatter bl.a. oversigt over nedbør, potentiel fordampning og temperatur, samt foretagne vandinger i vækstperioden. Endelig omfatter uddata en vandingsvejledning gældende fem dage frem. Vandingsprognosen kan beregnes med eller uden hensyntagen til skønnede værdier for potentiel fordampning og nedbør i prognoseperioden.

På vandingsvejledningen (figur 3.20) vises både inddata og beregnede værdier. I søjlen *Underskud* er for markerne angivet det beregnede jordvandsunderskud V_r gældende for den 12. juni. Under *Vandingsmængder* er der i de fem prognosedage angivet eventuelle vandingsforslag I_f . Endvidere fremgår af figuren, om der er benyttet en nedbørs- og fordampningsprognose. Vandingsvejledningen anviser, at der bør vandes i mark 2, 3 og 5 henholdsvis torsdag, onsdag og mandag med mængderne 24, 25 og 25 mm. Vandingsvejledningen kan endvidere anvendes som beslutningsgrundlag for at starte vandingen tidligere end anvist, såfremt vandingskapaciteten overskrides.

MarkVand	Vandingsbeslutning	Indsat	12.juni88
----------	--------------------	--------	-----------

Vandingsvejledning for ejendom i grid element 12 Afdeling for Jordbrugsmeteorologi, Forsøgsanlæg Foulum 8830 Tjele, Telefon 86 652500
--

				Søndag	Mandag	Tirsdag	Onsdag	Torsdag
Nedbørsprognose				10.0				
Fordampningsprognose				3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Mark	Areæl	Underskud		Vandingsmængde				
navn	ha.	Afgrøde	mm	Søndag	Mandag	Tirsdag	Onsdag	Torsdag
1	2.0	Vinterraps	21					
2	2.0	Kartoffel, middelt	18					24
3	2.0	Græs	44				25	
4	2.0	Sukkerroe	8					
5	2.0	Vårbyg	68		25			
6-1	1.0	Erter	24					
6-2	1.0	Erter	24					

Planlagt vandet areal, ha	2.0	2.0	2.0
Vandingsmængde, m ³	500	500	486
Vandingstid, timer	15	15	14
forlad med Esc - PgUp og PgDn viser øvrige marker - 19 viser vandinger			

Figur 3.20: Vandingsvejledning med nedbørs- og fordampningsprognose.

4 Modelvalidering

Et godt estimat for daglig aktuel fordampning er en forudsætning for, at MARKVAND-systemet kan anvise pålidelige vandingsforslag. Beregningen af aktuel fordampning E_a er beskrevet i afsnit 3.3. Det antages her, at den aktuelle fordampning ikke kan overstige potentiel fordampning fra kortklippet græs (reference-fordampningen). Endvidere simuleres bladarealindeks og rodudvikling i afgrødemodellen alene ud fra temperaturen uden hensyntagen til afgrødens næringsstof- og vandforsyning. Vandbalancemodellen er derfor begrænset til beregning af fordampning fra velvoksede afgrøder, hvor væksten ikke er væsentligt hæmmet på grund af mangel på vand og næringsstoffer.

I det følgende benyttes målinger af jordvandindhold ved Jyndevad, Borris og Foulum til vurdering af vandbalancemodellens beregning af aktuel fordampning.

I forsøgene, der danner baggrund for datamaterialet, er der foretaget målinger af jordens vandindhold med neutronspretningsmetoden. Disse målinger er typisk gennemført to gange ugentligt. Målingerne giver mulighed for estimering af en gennemsnitlig daglig fordampning.

$$E_{am} = (M_{st} - M_{sl} + P + I)/n \quad (4.1)$$

hvor E_{am} er målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning, mm dag⁻¹,
 M_{st} og M_{sl} er jordvandindhold målt ved start og slut af en periode, mm,
 P er nedbør i perioden, mm,
 I er vanding i perioden, mm, og
 n er antal dage i perioden.

Denne vandbalanceligning gælder under følgende forudsætninger: ingen afdræning fra jordprofilen, ingen overjordisk afstrømning samt ingen vandtilstrømning fra fugtig jord under jordprofilen.

I hele datamaterialet er udvalgt perioder, hvor afdræning fra jordprofilen kan antages lig nul. Eventuel overjordisk afstrømning og vandtilstrømning fra fugtig jord under profilen i disse perioder antages lille og negligeres. Periodelængden n er valgt til minimum 3 dage for at reducere usikkerheden på estimatet E_{am} . I tilsvarende perioder er den gennemsnitlige daglige fordampning beregnet med vandbalancemodellen i MARKVAND-systemet. For at vurdere modellen er beregnet forskellen mellem simuleret og målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning i de nævnte perioder.

Data er vist i figurer opdelt efter afgrøde og forsøgslokalitet. For hver kombination af afgrøde og lokalitet er vist

- a. simuleret grøn bladarealindeks for hvert forsøgsår.
- b. simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R .
- c. akkumuleret middelværdi $\overline{R_a}$ af simuleret minus målt fordampning R .

Forsøgsdataene er afbildet således, at vækststart/fremspiring for en given afgrøde starter på samme dato.

4.1 Forsøgsdata fra Foulum

Ved den mikrometeorologiske station ved Afdeling for Jordbrugsmeteorologi i Foulum måles hvert år jordvandindholdet i fire storparceller med afgrøderne vinterhvede, alm. rajgræs (2-årig), vårbyg, ærter og vårraps (Olesen, 1987). Afgrøderne dyrkes optimalt i et sædskifte, hvor ærter og vårraps medtages skiftevis hvert andet år. Forsøget blev påbegyndt i 1984. De fire storparceller har en størrelse på 20x40 m. Et udsnit af parcellerne (20x10 m) vandes ved deficit på 60 mm. Den resterende del af parcellerne er hvert år uvandet.

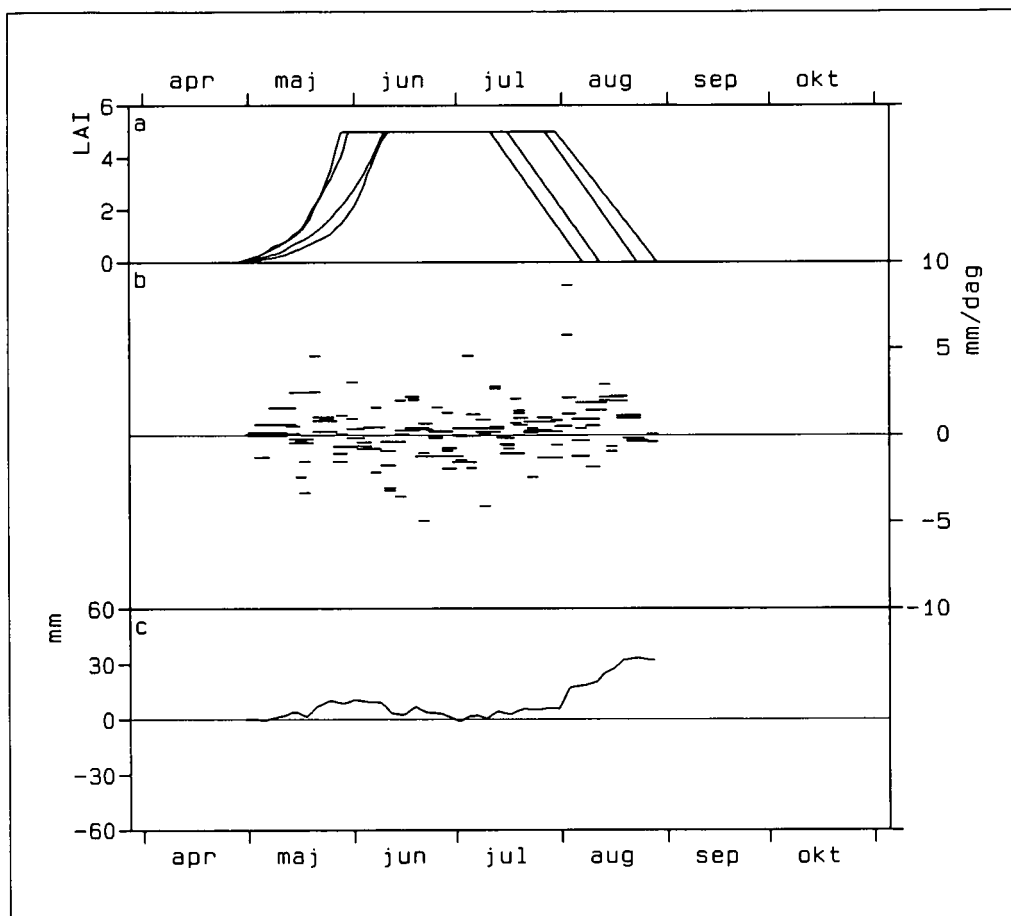
Forsøgsjorden er en grov lerblandet sandjord (JB3) med en maksimal plantetilgængelig vandmængde på ca. 185 mm i 0-100 cm, hvilket er langt over gennemsnittet for en sådan jordtype. Dette betyder, at de uvandede afgrøder i de fleste år er velforsynet med vand. Maksimal plantetilgængelig vandmængde er beregnet fra retentionskurver målt på arealet i 1986. Jordvandindholdet måles med neutronspreddning. Målingerne foretages i to rør i både den vandede og den uvandede del af parcellen. Måledybderne er 20, 40, 60, 80 og 100 cm. Idet det anvendte måleudstyr ikke er velegnet til måling af vandindholdet i øvre jordlag, antages vandindholdet i vol. % i dybden 0-10 cm at være lig vandindholdet i dybden 10-30 cm, hvilket introducerer en ikke ubetydelig usikkerhed på bestemmelsen af jordprofilens vandindhold. Gennemsnit af to rør er anvendt til beregning af aktuel fordampning fra hvert forsøgsled.

Startdato i simuleringer med vandbalancemodellen er den 1. januar. Daglig potentiel fordampning, døgnets middeltemperatur, nedbør, vandingsmængder, bladarealindeks og effektiv roddybde er benyttet som inddata. Potentiel fordampning beregnes ifølge ligning 2.2. Klimaparametrene er målt på den meteorologiske station i Foulum. Nedbørsmængder, der er målt i højden 1.5 m, er korigeret til jordoverfladen ved multiplikation med 1.1. Vandingsmængder er multipliceret med effektivitetsfaktoren 0.75. Bladarealindeks og effektiv roddybde er beregnet med afgrødemodellen. Jordfysiske parametre anvendt i simuleringen er vist i tabel 4.1. Flere af disse parametre afviger fra standardparametre gældende for en JB3.

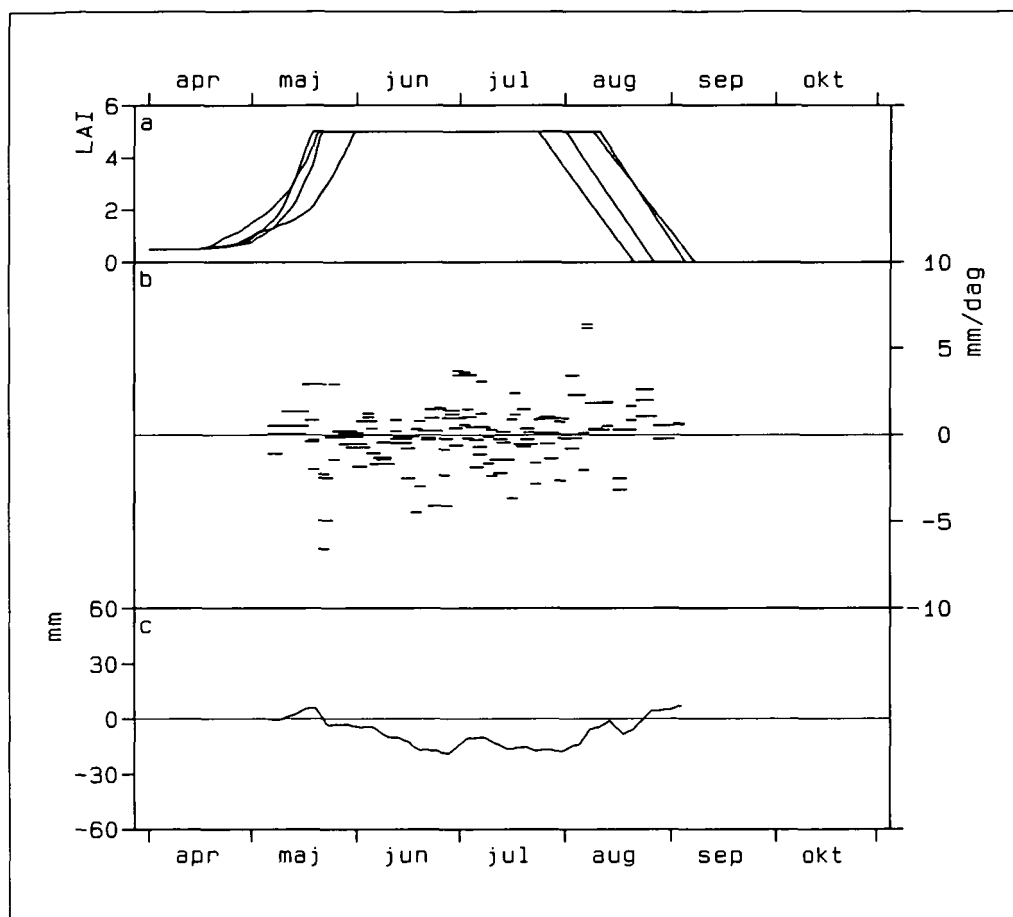
I figurene 4.1 til 4.5 er vist data for afgrøderne vårbyg, vinterhvede, vårraps, ærter og alm. rajgræs til slæt. Forsøgsdataene er afbildet således, at vækststart/fremspiring for en given afgrøde starter på samme dato. Data fra 1986 er udeladt af materialet, idet der ikke blev målt med neutronspreddning i dybden 100 cm.

Tabel 4.1: Jordfysiske parametre anvendt i simuleringen for Foulum jorden.

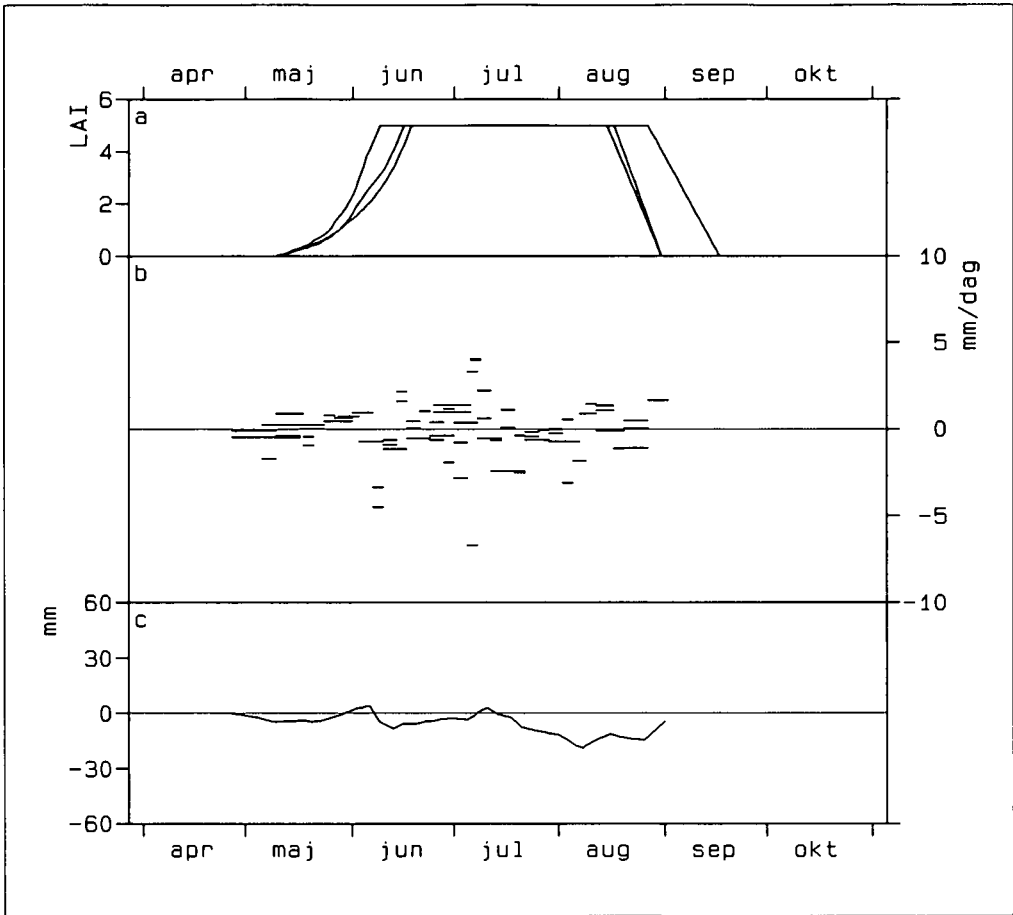
z_o	z_{xJ}	θ_{fo}	θ_{wo}	θ_{fu}	θ_{wu}	C_e	c_e	c_T	k_{qr}	k_{qb}	C_{rJ}
250	900	0.31	0.08	0.24	0.07	10.0	0.15	12.0	0.3	0.3	168



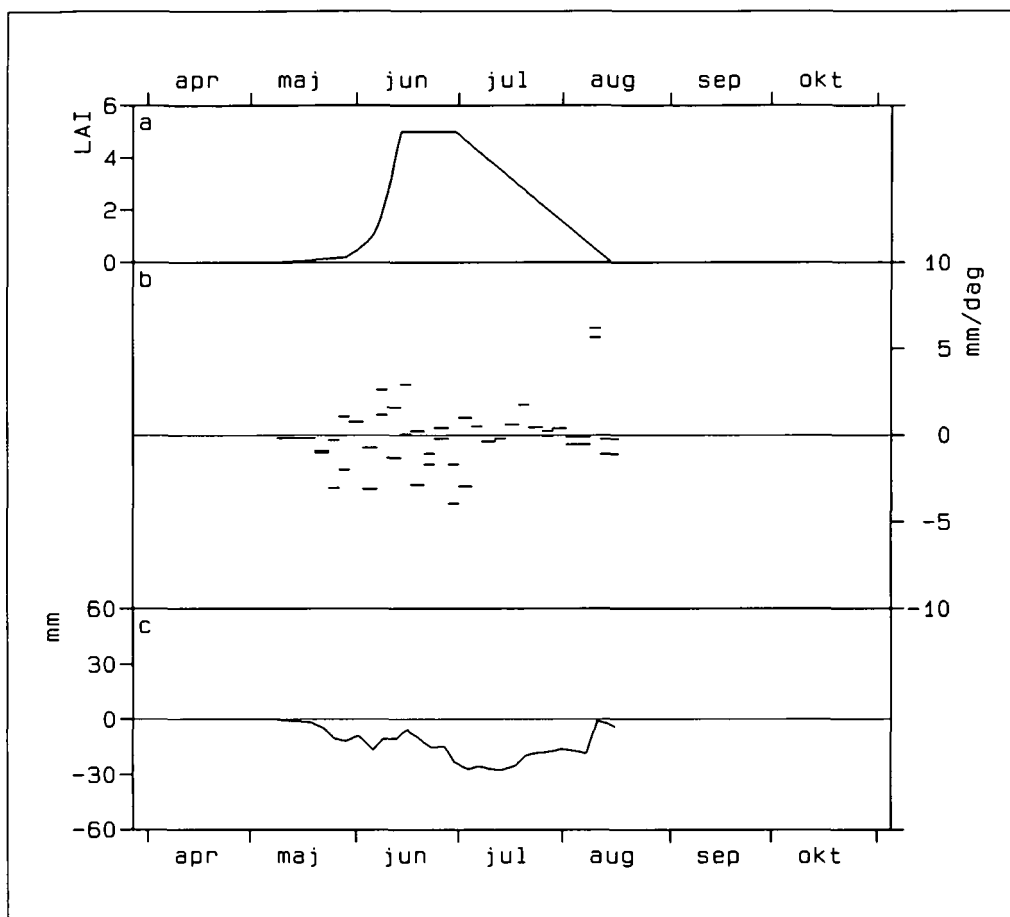
Figur 4.1: Forsøg med vårbyg i storparceller ved Foulum i 1985 og 1987-89 afbildet med fremspiring den 28/4. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R . c: $\overline{R}_a$, der er akkumuleret middelværdi af R .



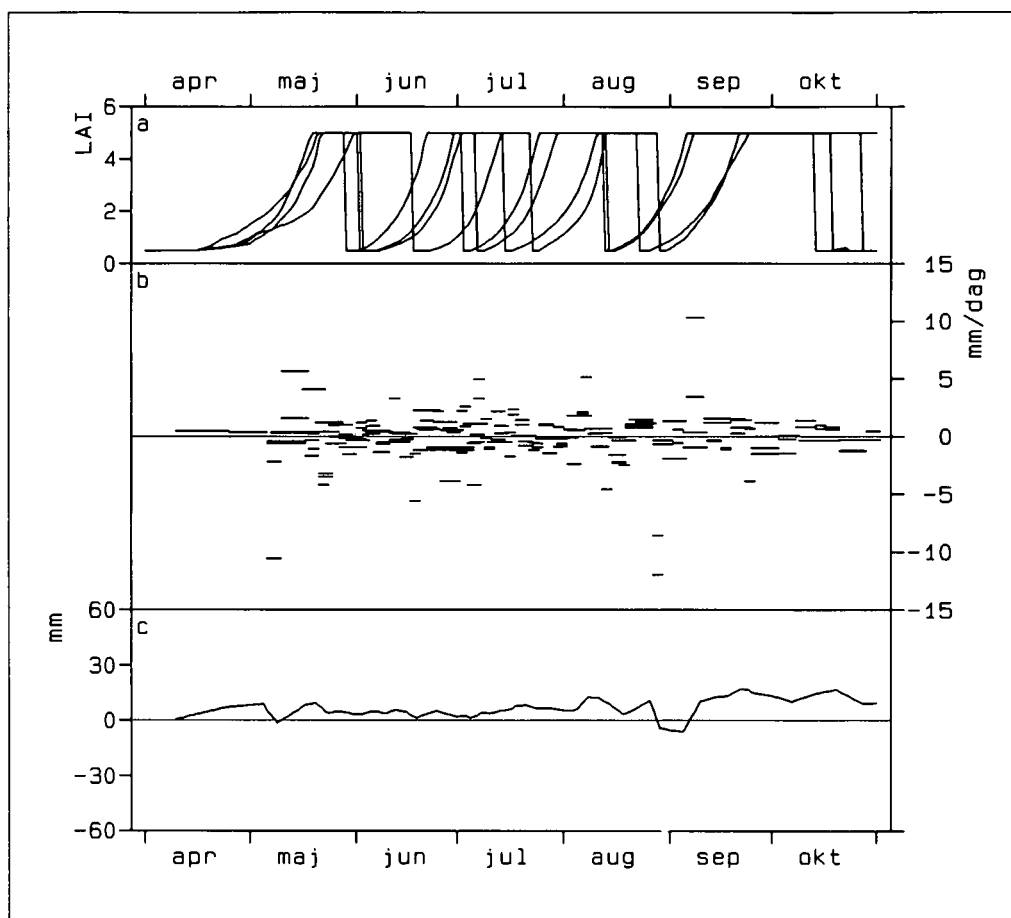
Figur 4.2: Forsøg med vinterhvede i storparceller ved Foulum i 1985 og 1987-89 afbildet med vækststart den 16/4. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret-målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R . c: $\overline{R}_a$, der er akkumuleret middelværdi af R .



Figur 4.3: Forsøg med vårraps i storparceller ved Foulum i 1985, 1987 og 1989 afbildet med fremspiring den 10/5. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R . c: $\bar{R}_a$, der er akkumuleret middelværdi af R .



Figur 4.4: Forsøg med ærter i storparceller ved Foulum i 1988 afbildet med fremspiring den 10/5. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R . c: $\overline{R_a}$ der er akkumuleret middelværdi af R .



Figur 4.5: Forsøg med alm. rajgræs (4 slæt) i storparceller ved Foulum i 1985, 1987-1989 afbildet med vækststart den 16/4. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R . c: $\bar{R}_a$ der er akkumuleret middelværdi af R .

Det fremgår af figur 4.1b, at R for vårbyg varierer omkring 0, fra 3 til -3 mm dag⁻¹. Flere punkter ligger dog langt fra 0 med værdier henholdsvis op til 10 og -10 mm dag⁻¹. En forklaring herpå diskuteres i afsnit 4.3. Det fremgår af figur 4.1c, at den summerede afvigelse mellem simuleret og målt fordampning $\overline{R_a}$ maksimalt er ca. 10 mm i perioden, hvor det beregnede bladarealindeks er grøn. Derimod vokser $\overline{R_a}$ ved aftagende grønt bladarealindeks, idet der der i gennemsnit simuleres en større fordampning end målt. På baggrund af det foreliggende datamateriale må vurderes, at vandbalancemodellen i middel beregner korrekte værdier for daglig aktuel fordampning fra vårbyg fra fremspiring til begyndende modning, hvorimod der senere i vækstperioden simuleres en større fordampning end målt.

Af figur 4.2b fremgår, at R for vinterhvede varierer omkring 0 med typiske afvigelser på -4 - 4 mm dag⁻¹. Enkelte afvigelser ligger dog i intervallet mellem -8 og 8, se afsnit 4.3. $\overline{R_a}$ (figur 4.2c) summeres til 0 over hele vækstperioden med en maksimal afvigelse på -20 mm. På det foreliggende datamateriale indikerer analysen en tendens til undersimulering af daglig aktuel fordampning for vinterhvede, når afgrøden har maksimalt bladareal.

Af figur 4.3b fremgår, at R for vårraps varierer omkring 0 med typiske afvigelser på -3 - 2 mm dag⁻¹. Enkelte afvigelser ligger dog i intervallet mellem -7 og 4, se afsnit 4.3. $\overline{R_a}$ (figur 4.3c) summeres til 0 over hele vækstperioden med en maksimal afvigelse på -15 mm i midten af vækstperioden. Dataanalysen antyder en tendens til undersimulering af daglig aktuel fordampning fra vårraps ved maksimalt bladareal.

Af figur 4.4b fremgår, at R for ærter varierer omkring 0 med typiske afvigelser på -4 - 2 mm dag⁻¹. Enkelte afvigelser ligger dog på 7 mm dag⁻¹, se afsnit 4.3. $\overline{R_a}$ (figur 4.4c) summeres til -5 mm over hele vækstperioden med en maksimal afvigelse på -25 mm i sidste halvdel af vækstperioden. Dataanalysen antyder en tendens til undersimulering af daglig aktuel fordampning fra ærter i starten og i sidste halvdel af vækstperioden, hvor det simulerede grønne bladarealindeks er henholdsvis tiltagende og aftagende.

Af figur 4.5b fremgår, at R for alm. rajgræs varierer omkring 0 med typiske afvigelser på -3 - 3 mm dag⁻¹. Enkelte afvigelser ligger dog i intervallet mellem -12 og 10, se afsnit 4.3. $\overline{R_a}$ (figur 4.5c) summeres til 10 mm over hele vækstperioden med en maksimal afvigelse mellem -10 og 15 mm i løbet af vækstperioden. Dataanalysen viser, at der i middel fås gode modelberegneede værdier for daglig aktuel fordampning fra alm. rajgræs, dog med tendens til oversimulering af fordampningen især i de sidste måneder af vækstperioden.

4.2 Forsøgsdata fra Jyndeved

I følgende analyse er anvendt data fra vandingsforsøg i marken med forskellige afgrøder. Uvandede led er udeladt af datamaterialet, idet vækstbetingelserne ikke i alle år har været optimale under markforhold. Forsøgene er udført af Afdeling for Kulturteknik ved Jyndeved Forsøgsstation. Forsøgslokaliteten har oftest været begrænset til Jyndeved Forsøgsstation, men nogle forsøg er også gennemført ved Borris og Foulum Forsøgsstationer. Forsøgsgjorden ved Jyndeved og Borris Forsøgsstation er hos Jensen (1987) karakteriseret

Tabel 4.2: Jordfysiske parametre anvendt i simuleringen for Jynde vad, Borris og Foulum jorderne.

Lokalitet	z_o	z_{xJ}	θ_{fo}	θ_{wo}	θ_{fu}	θ_{wu}	C_e	c_e	c_T	k_{qr}	k_{qb}	C_{rJ}
Jynde vad	250	500	0.22	0.05	0.13	0.04	6.0	0.08	12.0	0.6	0.6	65
Foulum	250	900	0.31	0.08	0.24	0.07	10.0	0.15	12.0	0.3	0.3	168
Borris	300	900	0.28	0.07	0.23	0.06	10.0	0.15	12.0	0.3	0.3	165

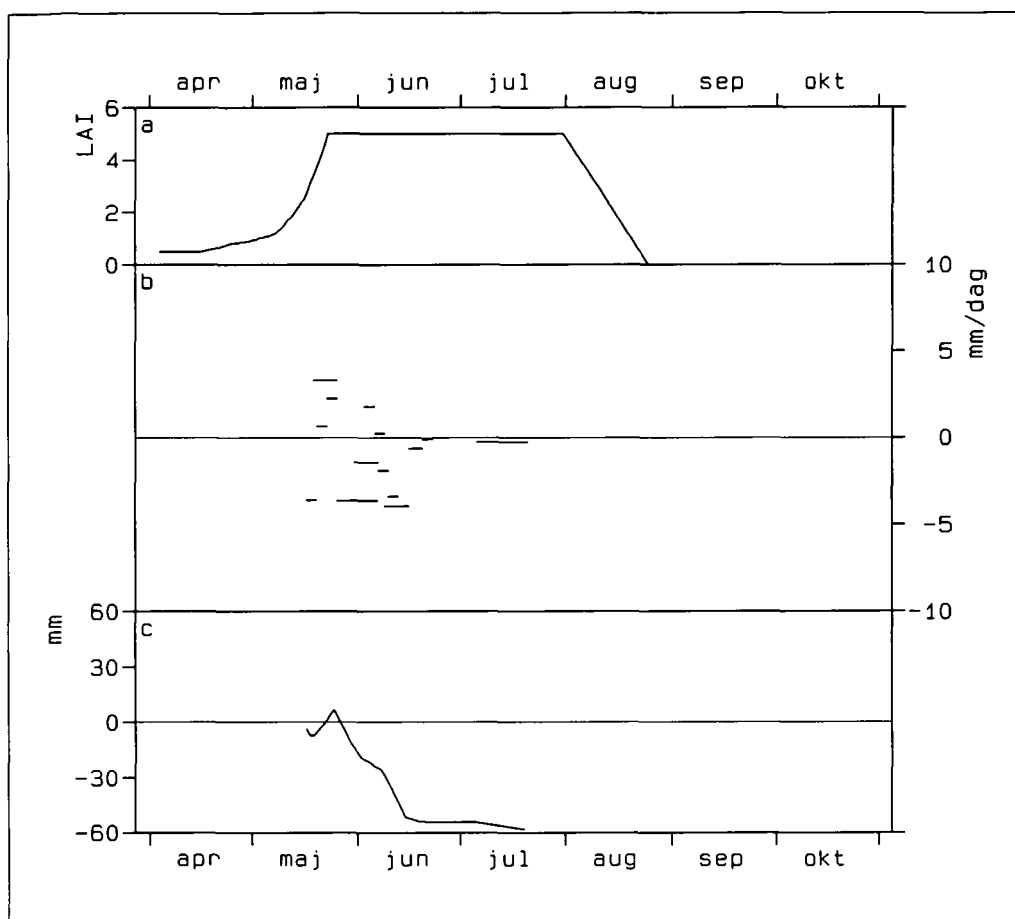
som henholdsvis en grovsandet jord (JB1) med en plantetilgængelig vandmængde på 60 mm i 0-60 cm dybde og en fin lerblandet sandjord (JB4) med en tilgængelig vandmængde på 94 mm i 0-60 cm dybde. Dog kan der ud fra undersøgelser af Hansen et al. (1986) beregnes et plantetilgængeligt vandindhold på ca. 75 mm i dybden 0-50 cm for Jynde vad jorden. Forsøgsjorden ved Foulum er hos Thomsen (1989) karakteriseret som en fin lerblandet sandjord (JB4). Den plantetilgængelige vandmængde er ikke angivet af forfatteren, men formodes at være i størrelsesordenen 185 mm i 0-100 cm dybde.

Jordvandmålingerne er foretaget med neutronudstyr i dybderne 20, 40, 60, 80 cm. Ved Jynde vad er der endvidere foretaget en måling i dybden 10 cm, der ud fra en speciel kalibrering angiver vandindholdet i jordlaget 0-10 cm. Ved Borris og Foulum er vandindholdet i vol. % i dette jordlag antaget lig vandindholdet i dybden 10-30 cm medførende en ikke uvæsentlig usikkerhed på estimatet for jordprofilens vandindhold. Dog er jordvandindholdet i dybden 0-10 cm estimeret ved en måling i 10 cm dybde ved Borris i 1986. Jordprofilernes vandindhold er bestemt som gennemsnittet af jordvandmålinger i to neutronrør.

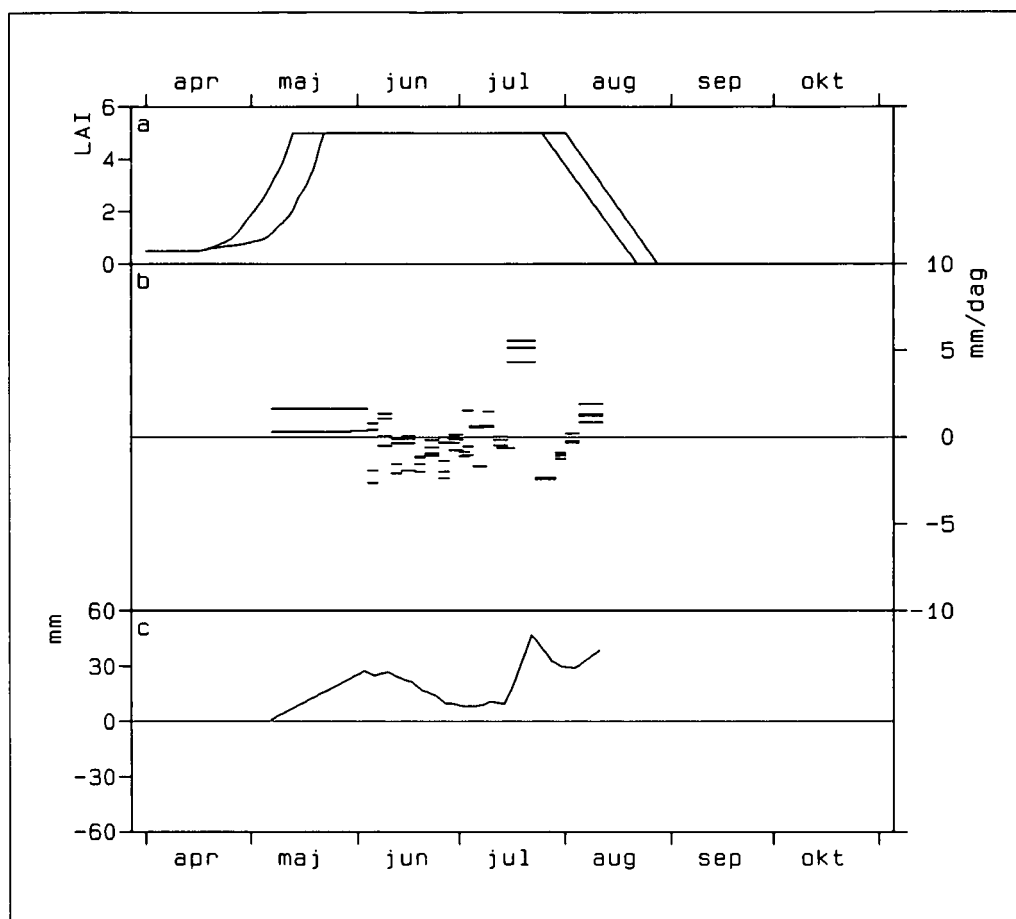
Startdato i simuleringer med vandbalancemodellen er den 1. april. Klimadata anvendt i simuleringen af daglig aktuel fordampning er daglig potentiel fordampning, døgnets middeltemperatur, nedbørs- og vandingsmængder. Temperatur- og nedbørsdata er indhentet fra de meteorologiske stationer på forsøgslokaliteterne. Potentiel fordampning er ved Foulum og Jynde vad beregnet efter ligning 2.2. I denne beregning indgår globalstråling og temperatur målt ved forsøgslokaliteternes meteorologiske stationer. Ved Borris er daglig potentiel fordampning beregnet ud fra ugentlige aflæsninger af forsøgstationens fordampningsmåler. Nedbørsmængder, der er målt i højden 1.5 m, er korrigeret til jordoverfladen ved multiplikation med 1.1. Bladarealindeks og effektiv roddybde er beregnet med afgrødemodellen. Jordfysiske parametre anvendt i simuleringen er vist i tabel 4.2. Flere af disse parametre afviger fra standardparametrene gældende for JB1 og JB4.

I figurene 4.6 til 4.19 er vist dataanalyser for afgrøderne vinterhvede, vinter- og vårbyg, ærter, kartofler (middeltidlige og sildige), fodersukkerroer, majs, vinterraps og alm. rajgræs til slæt. Data er afbildet således, at fremspiring/vækststart for en given afgrøde starter på samme dato.

Fra et endnu ikke publiceret vinterhvedeforsøg udlagt ved Jynde vad og Borris er i figurene 4.6 og 4.7 vist analyser af data fra årene 1985 og 1986. Afvigelsen fra 0 på R er ved Jynde vad og Borris henholdsvis $-4 - 4 \text{ mm dag}^{-1}$ og $-3 - 7 \text{ mm dag}^{-1}$. De summerede



Figur 4.6: Markforsøg med vinterhvede ved Jyndeved i 1985 (ikke publiceret) afbildet med vækststart den 16/4. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R . c: $\overline{R_a}$, der er akkumuleret af R .



Figur 4.7: Markforsøg med vinterhvede ved Borris i 1985-86 (ikke publiceret) afbildet med vækststart den 16/4. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R . c: $\overline{R_a}$ der er akkumuleret af R .

afvigelser $\overline{R_a}$ udviser forskellig tendens ved de to forsøgslokaliteter. Ved Jyndeved undersimuleres fordampningen i ca. tre uger efter, at det beregnede grønne bladarealindeks er maksimal. Undersimuleringen fører til en akkumuleret afvigelse fra 0 på -50 mm. I den resterende del af vækstperioden er der god overensstemmelse mellem model og målte data. Ved Borris oversimuleres fordampningen over hele vækstperioden med ca. 30 mm. Datamaterialet fra Borris antyder en oversimulering af fordampningen i starten af vækstperioden med ca. 20 mm, derefter en undersimulering på ca. 10 mm de efterfølgende 4 uger. Ved afslutning af vækstperioden sker igen en oversimulering på ca. 20 mm. Det skal til datamaterialet fra Borris bemærkes, at der ikke er målt med neutronspreddning i 100 cm dybde. Et muligt vandforbrug i dybden 80-100 cm er derfor ikke målt med neutronspreddningsmetoden, hvilket muligvis kan forklare tendensen til oversimulering af fordampningen.

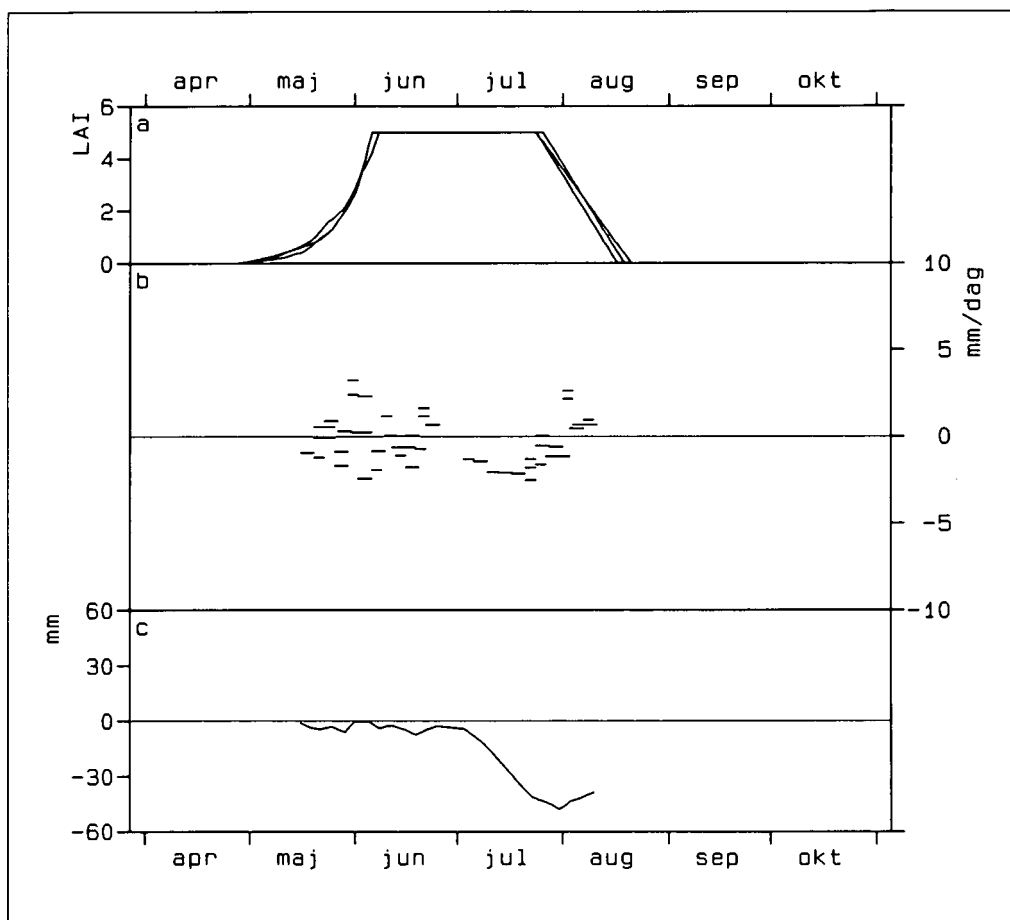
I figurene 4.8 og 4.9 er vist analyser af data fra forsøg med vår- og vinterbyg (Hejlesen og Andersen, 1984). R afviger fra 0 med størrelsesordenen -3 - 3 mm dag⁻¹ for vårbyg og vinterbyg. Enkelte afvigelser for vinterbyg ligger dog mellem -4 og 4 mm dag⁻¹. Over hele vækstperioden undersimuleres fordampningen med 50 mm for vårbyg, hvorimod der er overensstemmelse mellem målt og simuleret fordampning fra vinterbyg. $\overline{R_a}$ er for begge afgrøder omtrent 0 i starten af vækstperioden, hvor bladarealet simuleres tiltagende. I perioden med maksimal bladarealindeks summeres $\overline{R_a}$ over en periode på 4 uger til -50 mm for vårbyg. For vinterbyg summeres afvigelsen over en periode på 2 uger til -15 mm. $\overline{R_a}$ stiger derefter i den resterende del af vækstperioden til 5 mm. Datamaterialet antyder, en tendens til undersimulering af daglig aktuel fordampning især fra vårbyg i perioden med maksimal bladarealindeks.

Analyse af data fra et forsøg med ærter (Jensen, 1987) er vist i figur 4.10. R varierer omkring 0 med afvigelser på op til -2 og 3 mm dag⁻¹. $\overline{R_a}$ summeres til ca. 0 mm for hele vækstperioden. Datamaterialet antyder, at der i middel opnås gode modelberegneede værdier af daglig aktuel fordampning fra ærter.

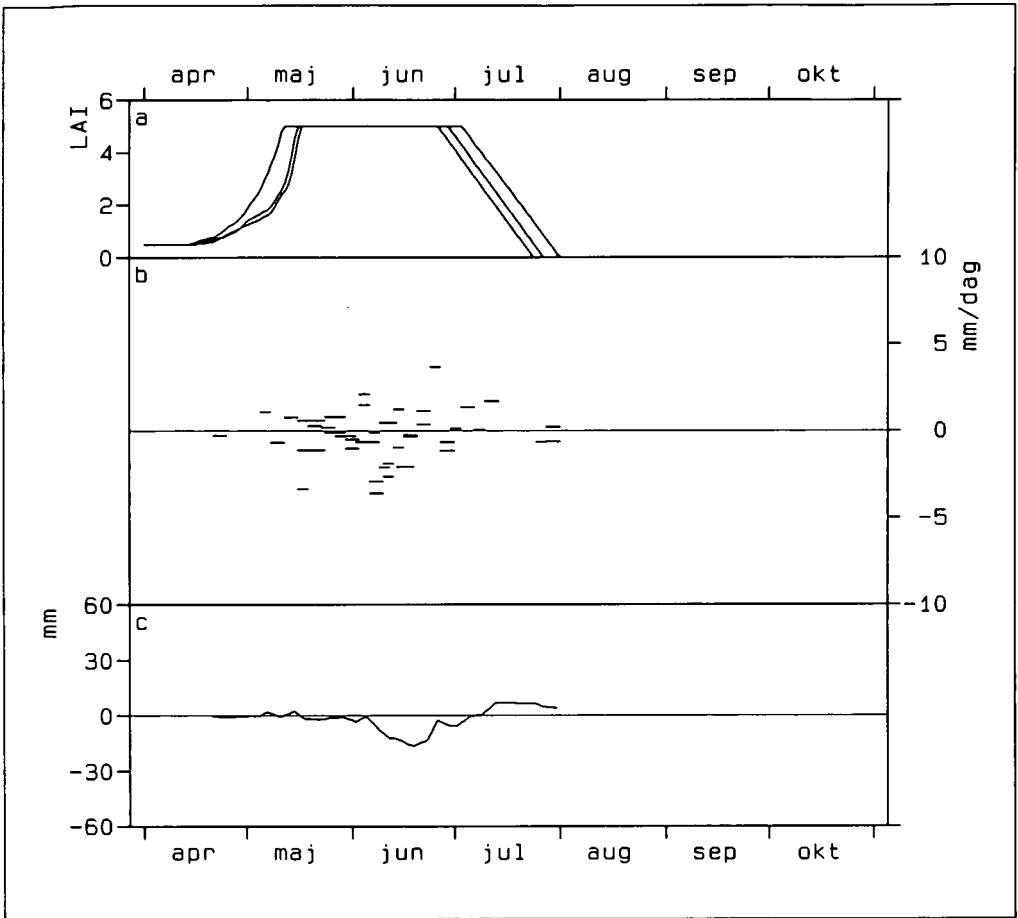
Data fra et forsøg med middeltidlige kartofler (Jørgensen, 1984) danner baggrund for dataanalysen vist i figur 4.11. Afvigelserne fra 0 på R er koncentreret indenfor intervallet -2 - 2 mm dag⁻¹ med enkelte værdier på op til 5 mm dag⁻¹. $\overline{R_a}$ summeres til 0 mm over hele vækstperioden. Der synes at være en tendens til undersimulering af fordampningen fra middeltidlige kartofler i første halvdel af perioden, hvor beregnet grøn bladarealindeks er maksimal. Omvendt ses en tendens til oversimulering af fordampningen i den resterende del af vækstperioden.

I figur 4.12 er vist analyser af data fra markforsøg med sildige kartofler (Jørgensen og Edlefsen, 1987). R afviger -2 - 2 mm dag⁻¹ fra 0. Dog er enkelte afvigelser i størrelsesordenen -4 mm dag⁻¹. $\overline{R_a}$ summeres til -20 mm over hele vækstperioden. Generelt viser analysen i gennemsnit god overensstemmelse mellem beregnede og målte værdier, dog undersimuleres fordampningen med ca. 15 mm over to uger beliggende midt i vækstperioden.

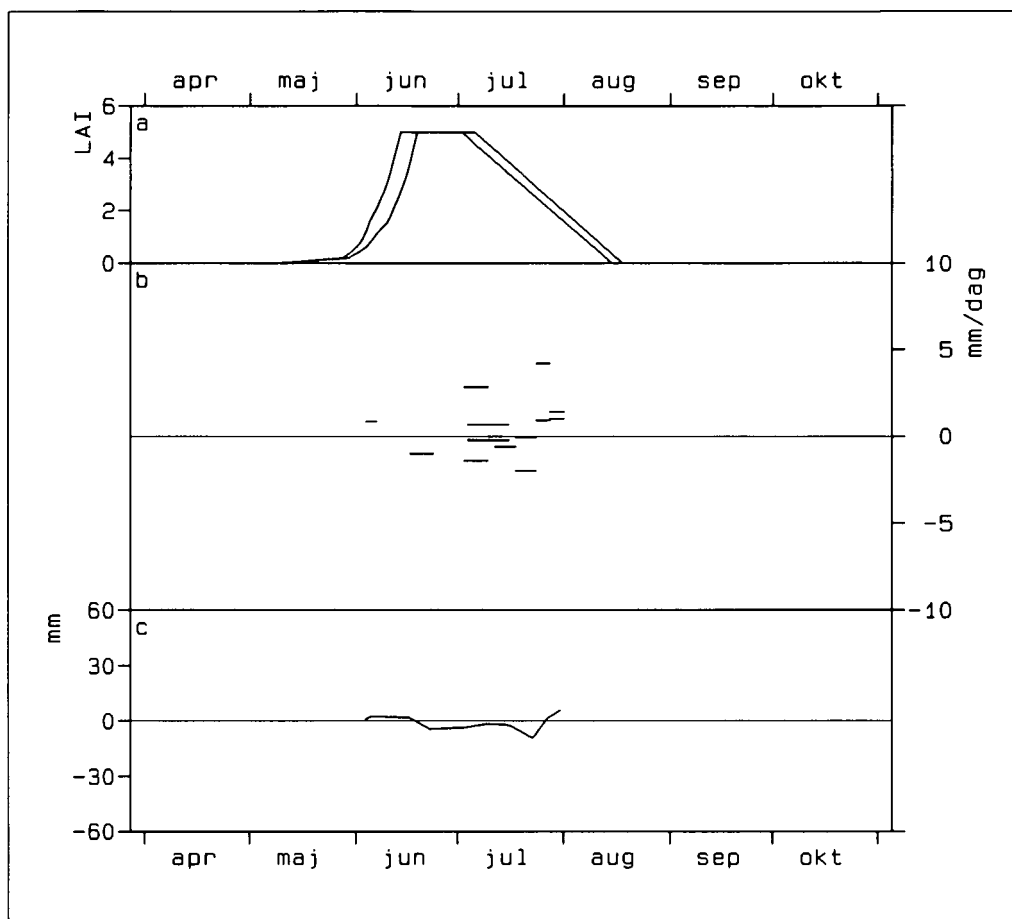
Analyser af data fra et markforsøg med bederoer (upubliceret) er vist i figur 4.13. Af-



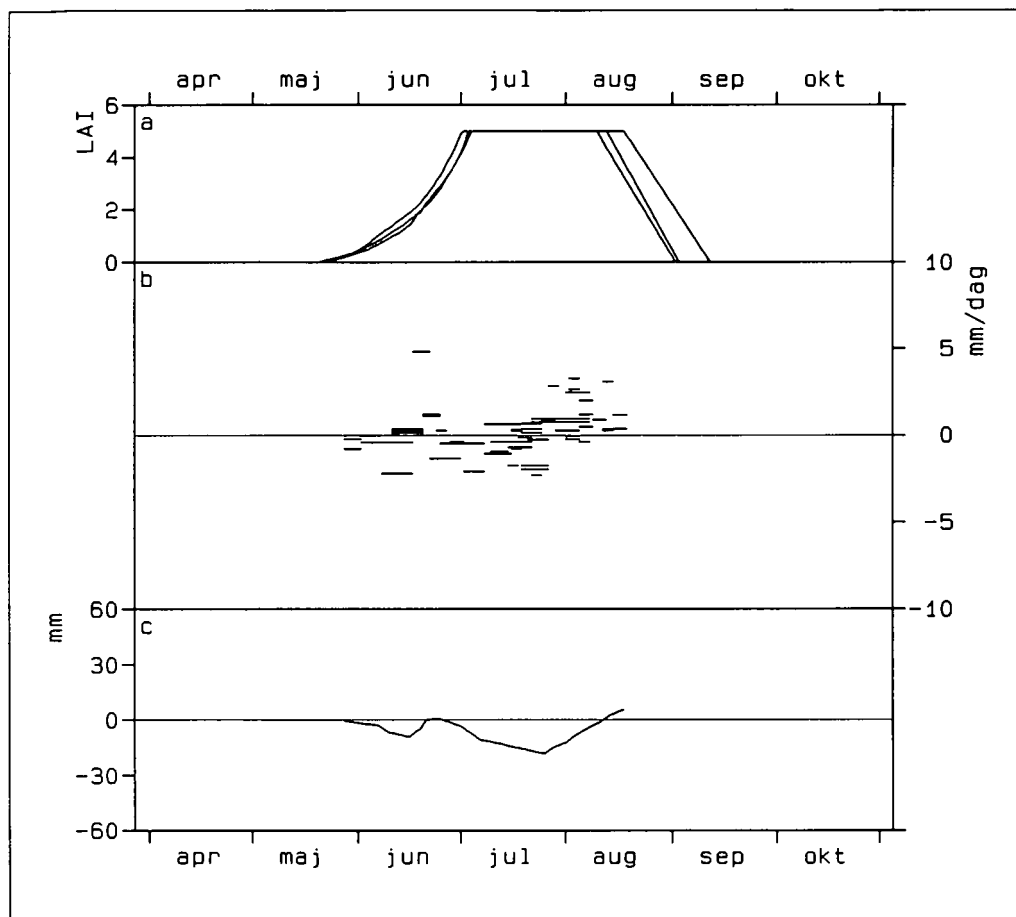
Figur 4.8: Markforsøg med vårbyg ved Jyndevad i 1978-80 (Hejlesen og Andersen, 1984) afbildet med fremspiring den 28/4. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøg-sår. b: Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R . c: $\overline{R_a}$ der er akkumuleret af R .



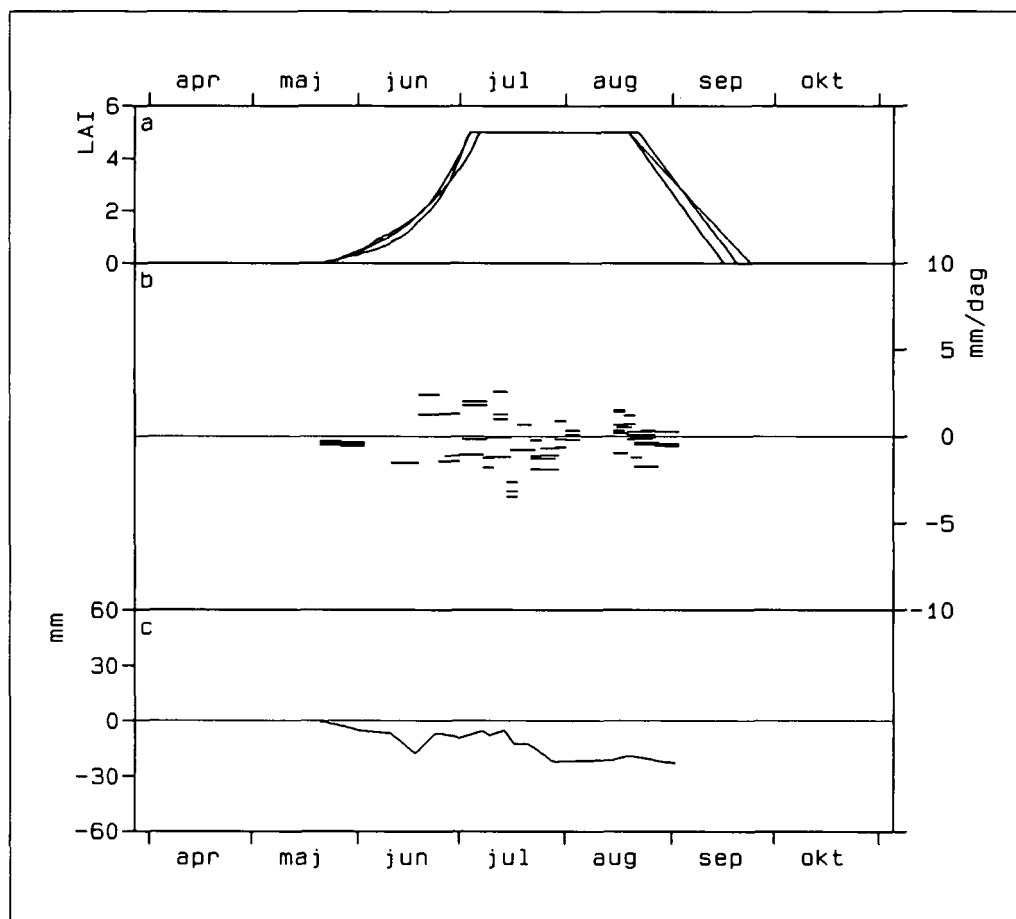
Figur 4.9: Markforsøg med vinterbyg ved Jyndevad i 1978-80 (Hejlesen og Andersen, 1984) afbildet med vækststart den 16/4. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret-målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R . c: $\overline{R_a}$ der er akkumuleret af R .



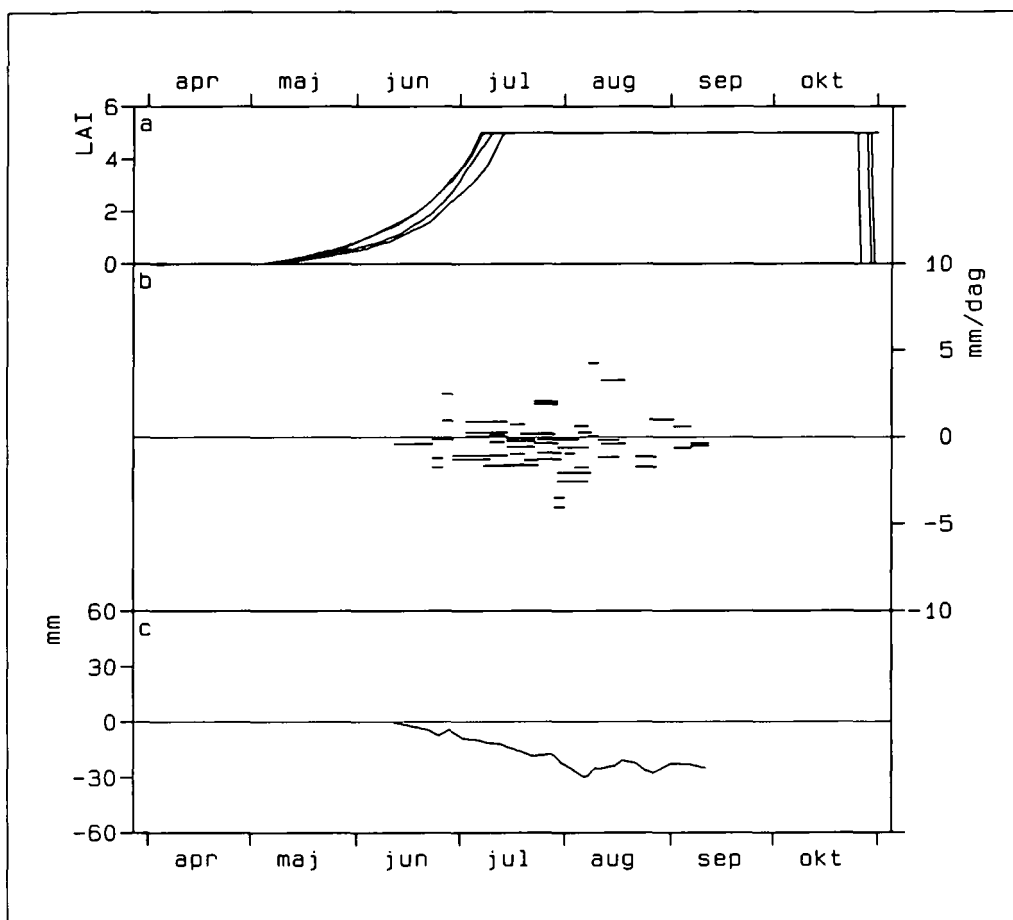
Figur 4.10: Markforsøg med ærter ved Jyndevad i 1985-86 (Jensen, 1987) afbildet med fremspiring den 10/5. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R . c: $\overline{R}_a$, der er akkumuleret af R .



Figur 4.11: Markforsøg med middeltidlige kartofler ved Jyndevad i 1981-83 (Jørgensen, 1984) afbildet med fremspiring den 21/5. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R . c: $\overline{R_a}$, der er akkumuleret af R .



Figur 4.12: Markforsøg med sildige katofter ved Jydeved i 1984-86 (Jørgensen og Edlefsen, 1987) afbildet med fremspiring den 21/5. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R . c: $\bar{R}_a$, der er akkumuleret af R .



Figur 4.13: Markforsøg med roer ved Jydevad i 1981-83 og 1986 (upubliceret) afbildet med fremspiring den 5/5. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R_a . c: $\overline{R_a}$, der er akkumuleret af R_a .

vigelserne fra 0 på R er $-3 - 2 \text{ mm dag}^{-1}$ med enkelte afvigelser i størrelsesordenen $-4 - 4 \text{ mm dag}^{-1}$. $\overline{R_a}$ summeres til -30 mm over en periode på fem uger, hvor det beregnede bladarealindeks er stigende og senere maksimal. Dataanalysen antyder, at fordampningen undersimuleres i første halvdel af vækstperioden. Senere i vækstperioden er der god overensstemmelse mellem målte og beregnede værdier af aktuel fordampning.

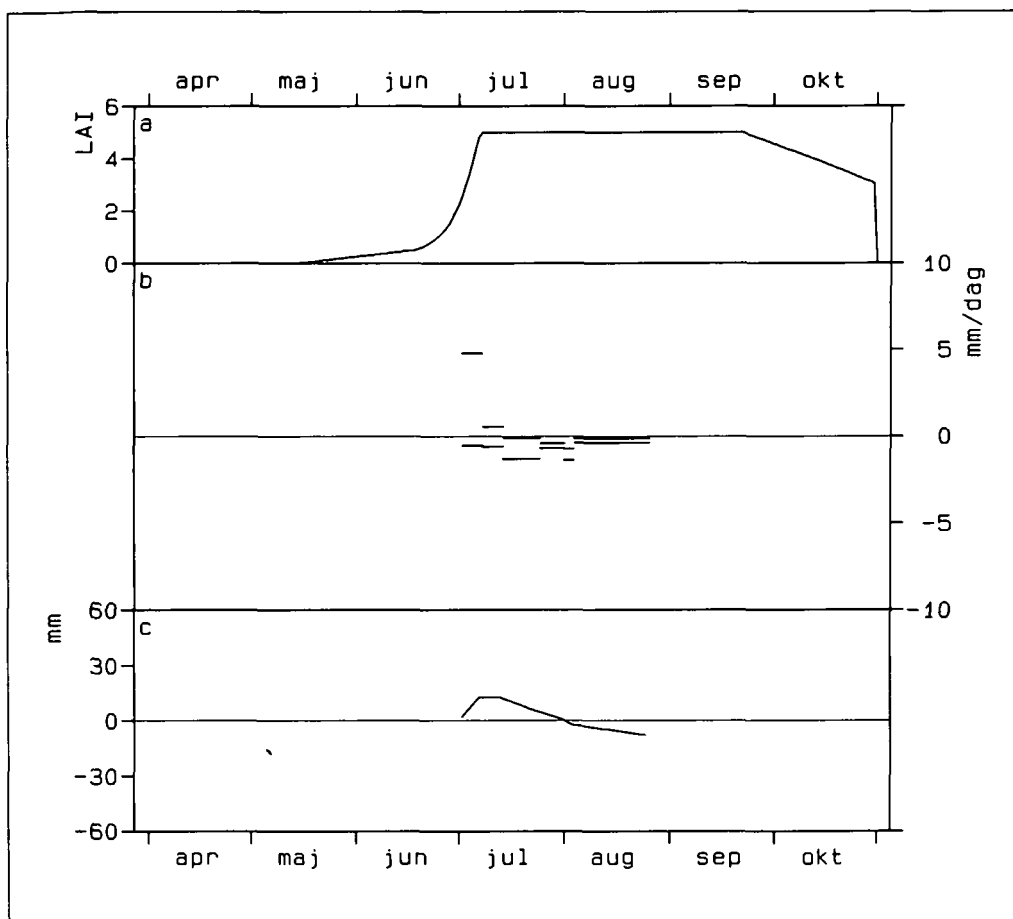
Analyser af data fra et markforsøg med majs (upubliceret) er vist i figur 4.14. Afvigelserne fra 0 på R er i størrelsesordenen $-2 - 1 \text{ mm dag}^{-1}$ med enkeltafvigelser på 5 mm dag^{-1} . Det sparsomme datamateriale antyder en tendens til oversimulering af fordampningen i starten af vækstperioden og en undersimulering af fordampningen, hvor beregnet grøn bladarealindeks er maksimal.

I figur 4.15 er vist analyse af data fra et markforsøg med vinterraps (Jensen, 1986). R afviger fra 0 i størrelsesordenen $-1.5 - 1 \text{ mm dag}^{-1}$. Enkelte afvigelser er dog på 3 mm dag^{-1} . $\overline{R_a}$ summeres over hele vækstperioden til -35 mm . Dataanalysen antyder, at fordampningen i gennemsnit undersimuleres i hele perioden fra vækststart til to uger før, det beregnede bladarealindeks aftager.

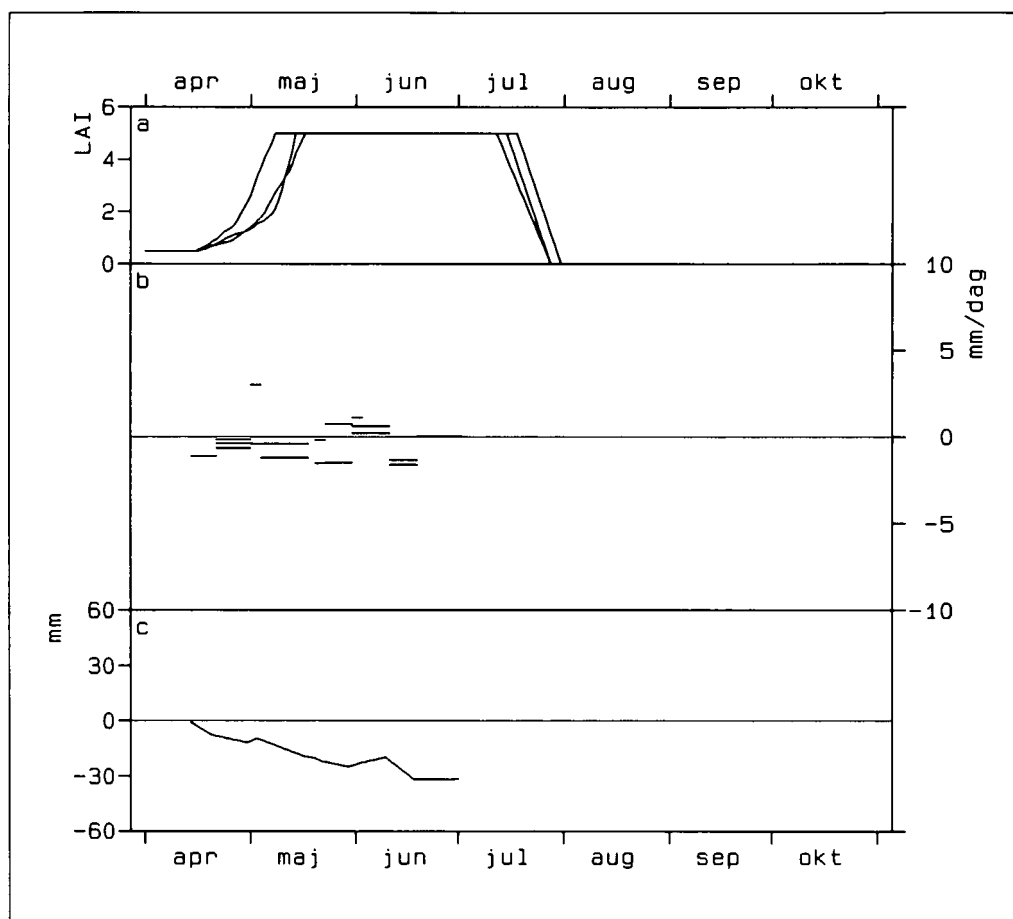
Analysen af data fra et markforsøg med alm. rajgræs (Thomsen, 1989) er udført for hver kombination af forsøgslokalitet og slætantal. I figur 4.16 og 4.17 er vist analysen for fire slæt. R varierer omkring 0 fra $-2 - 2 \text{ mm dag}^{-1}$ og fra $-3 - 3 \text{ mm dag}^{-1}$ i datamaterialet fra henholdsvis Jyndevad og Foulum. $\overline{R_a}$ udviser forskellig tendens på de to forsøgslokaliteter. I Jyndevad er $\overline{R_a}$ konstant faldende i perioden fra start til slut i dataperioden. Afvigelsen fra 0 i hele dataperioden summeres til -45 mm . I Foulum falder $\overline{R_a}$ til -15 mm i første slæt og stiger til 20 mm i andet slæt. Datamaterialet antyder, at aktuel fordampning fra græs i gennemsnit undersimuleres med 0.5 mm dag^{-1} ved Jyndevad. Jordvandsmålinger er ikke foretaget i 100 cm dybde ved Foulum, hvorved den målte fordampning er usikkert bestemt. Dette spinkle datamateriale er derfor mindre velegnet som valideringsgrundlag og derfor udeladt i efterfølgende analyser.

I figur 4.18 er vist analysen af almindelig rajgræs med fem slæt. R afviger ved Jyndevad fra 0 i størrelsesordenen $-2 - 2 \text{ mm dag}^{-1}$ med enkelte afvigelser på 8 mm dag^{-1} . $\overline{R_a}$ summeres i dataperioden til -50 mm . Datamaterialet antyder, at aktuel fordampning fra græs i Jyndevad i gennemsnit undersimuleres med 1 mm dag^{-1} fra andet til femte slæt.

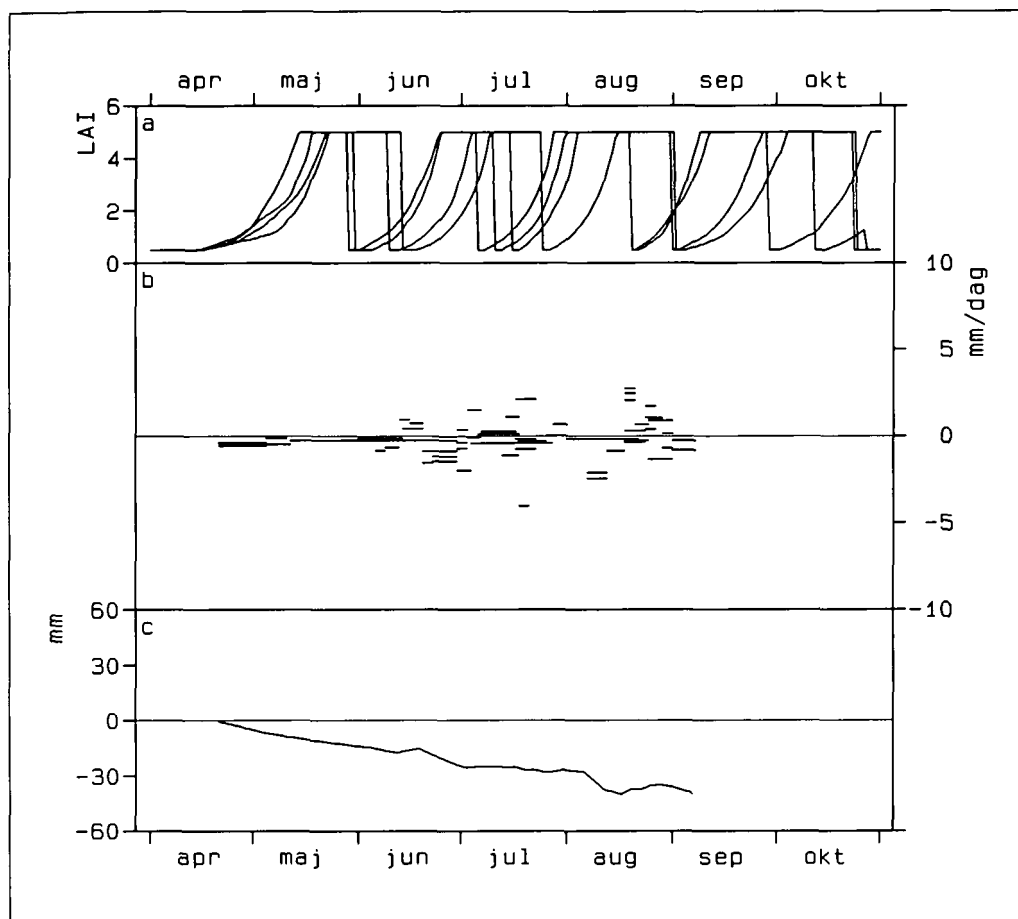
I figur 4.19 er vist analyse af data fra rajgræsforsøg med syv slæt. R varierer ved Jyndevad fra 0 i størrelsesordenen $-2 - 1 \text{ mm dag}^{-1}$ med enkelte afvigelser i intervallet $-7 - 4 \text{ mm dag}^{-1}$. Som ved fire slæt er $\overline{R_a}$ i Jyndevad faldende fra start til slut i dataperioden. Afvigelsen summeres til -40 mm . Dataanalysen antyder, at aktuel fordampning i gennemsnit undersimuleres i Jyndevad i hele perioden.



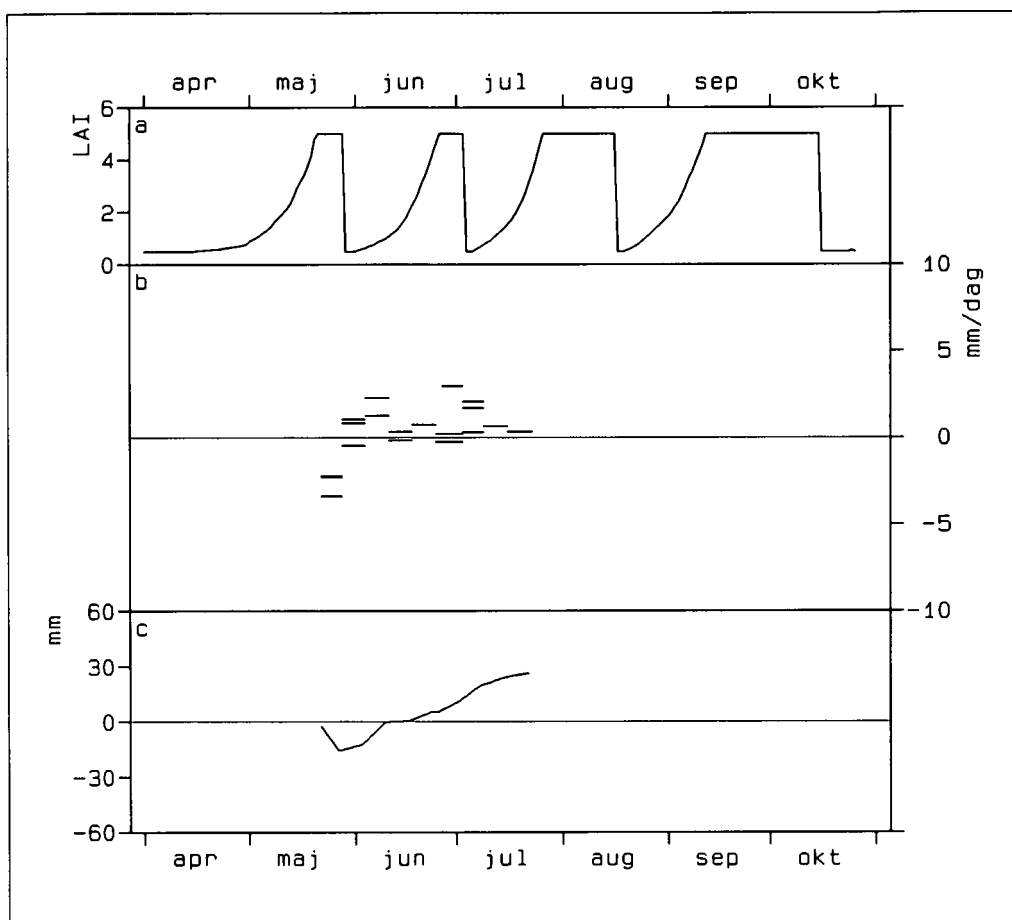
Figur 4.14: Markforsøg med majs ved Jyndevad i 1986 (upubliceret) afbildet med fremspiring den 10/5. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R . c: $\overline{R}_a$, der er akkumuleret af R .



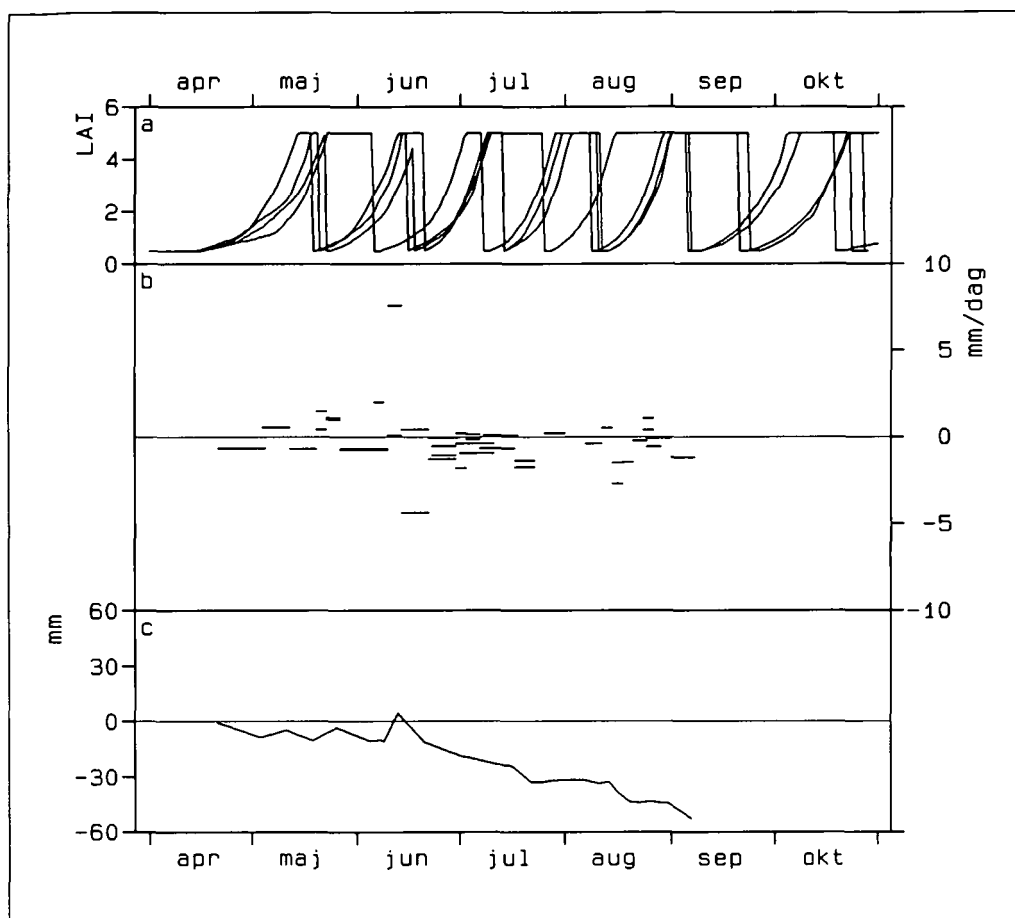
Figur 4.15: Markforsøg med vinterraps ved Jyndevad i 1982 og 1984-85 (Jensen, 1986) afbildet med vækststart den 16/4. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R . c: $\overline{R_a}$, der er akkumuleret af R .



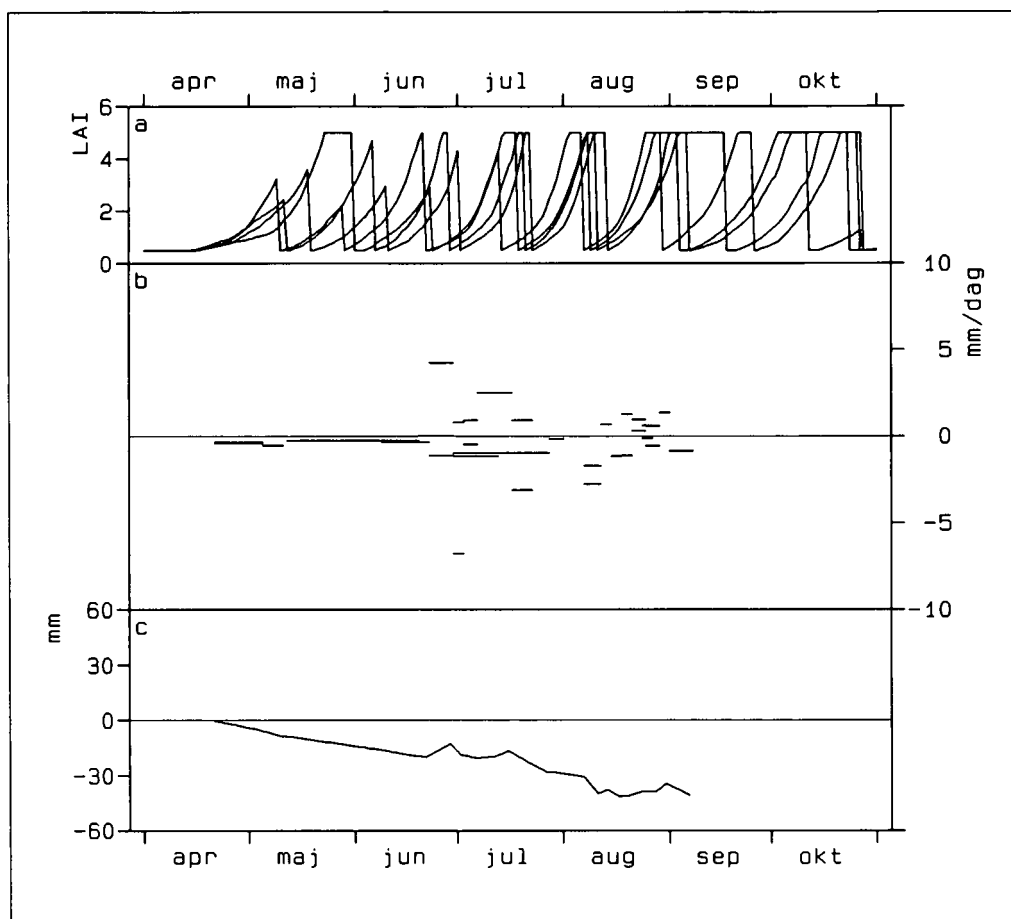
Figur 4.16: Markforsøg med alm. rajgræs (4 slæt) ved Jydevad i 1983-1986 (Thomsen, 1989) afbildet med vækststart den 16/4. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R_a . c: $\overline{R_a}$, der er akkumuleret af R_a .



Figur 4.17: Markforsøg med alm. rajgræs (4 slæt) ved Foulum i 1985 (Thomsen, 1989) afbildet med vækststart den 16/4. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R . c: $\overline{R_a}$, der er akkumuleret af R .



Figur 4.18: Markforsøg med alm. rajgræs (5 slæt) ved Jyndevad i 1983-86 (Thomsen, 1989) afbildet med vækststart den 16/4. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R . c: $\overline{R_a}$, der er akkumuleret af R .



Figur 4.19: Markforsøg med alm. rajgræs (7 slæt) ved Jydevad i 1983-86 (Thomsen, 1989) afbildet med vækststart den 16/4. a: Simuleret grøn bladarealindeks i forskellige forsøgsår. b: Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning R . c: $\overline{R}_a$, der er akkumuleret af R .

Tabel 4.3: Eksempel på størrelsen af fejlkilde på E_{am} og R under antagelse af, at periodelængden $n = 3$ og $E_a = 4 \text{ mm dag}^{-1}$.

Aflæsningstidspkt.		Vandindhold, mm		Nedbør ved	E_{am}	R
start	slut	M_{st}	M_{sl}	slutaflæsning, mm	mm dag ⁻¹	mm dag ⁻¹
8.00	8.00	150	138	20	4.0	0.0
8.00	16.00	150	158	20	-2.7	6.7
16.00	8.00	146	138	20	2.7	1.3

Tabel 4.4: Eksempel på størrelsen af fejlkilde på E_{am} og R under antagelse af, at periodelængden $n = 10$ og $E_a = 4 \text{ mm dag}^{-1}$.

Aflæsningstidspkt.		Vandindhold, mm		Nedbør ved	E_{am}	R
start	slut	M_{st}	M_{sl}	slutaflæsning, mm	mm dag ⁻¹	mm dag ⁻¹
8.00	8.00	150	110	20	4.0	0.0
8.00	16.00	150	130	20	2.0	2.0
16.00	8.00	146	110	20	3.6	0.4

4.3 Diskussion af analysemetoder og resultater

Udgangspunktet for sammenligningen af de to metoder til estimering af daglig aktuel fordampning E_a og E_{am} er differensen $R (=E_a - E_{am})$, og en vurdering af dennes afvigelse fra 0. Antages R at være normalfordelt med middelværdien μ og variansen σ^2 kan en statistisk test afsløre, hvorvidt μ afviger signifikant fra 0. I det foregående afsnit er en sådan statistisk analyse af forskelle i daglig aktuel fordampning ikke foretaget, idet antagelsen om varianshomogenitet ikke er opfyldt for R . Der redegøres nærmere herfor i det følgende.

Betragtes alle observationer af R i hele datamaterialet for en given afgrøde er det et ukomplet datasæt, idet observationsantallet på et givent dagnummer i året er forskelligt. Dette skyldes årsvariation i klima og afgrødeudvikling, forskellige forsøgsomstændigheder samt udvælgelsen af afstrømningsfri perioder med neutronmålinger. Variationen på R er med sikkerhed forskellig, idet den beregnes ved differensen af E_a og E_{am} . Disse er beregnet som et dagligt gennemsnit over en periode med længden n , der er bestemt af målehyppigheden i forsøget, jf. ligning 4.1.

Usikkerhederne på E_{am} er ukendte, men med sikkerhed forskellige, idet bl.a. aflæsningen af neutronudstyret ikke som forudsat er sket på et defineret tidspunkt i døgnet f.eks. kl. 8.00 om morgenen. Herved introduceres en fejl på estimatet E_{am} , der beregnes henholdsvis for stor eller lille, idet periodelængden n i praksis har varieret mellem $n-0.5$ og $n+0.5$. En mere betydende fejlkilde forekommer, såfremt en nedbørs- eller vandingsmængde ukorrekt medtages i en beregningsperiode på grund af de i praksis skiftende aflæsningstidspunkter. Fejlens betydning aftager, når periodelængden vokser. I tabel 4.3 og 4.4 er givet eksem-

pler for at anskueliggøre størrelsesordenen af disse fejlkilder.

Det forudsættes i eksemplerne (tabel 4.3 og 4.4), at nedbøren falder efter kl. 8.00. Det fremgår, at R er lig nul, når slutaflæsningstidspunktet er lig startaflæsningstidspunktet. Den introducerede fejl på R forårsaget af forskellig aflæsningstidspunkt samt nedbør på slutaflæsningstidspunktet aftager fra 6.7 til 2.0 mm dag⁻¹, når periodelængden øges fra 3 til 10.

Usikkerheden på E_{am} er endvidere bestemt af nøjagtigheden på neutronspretningsmetoden. En gennemgang af metodens teori og virkemåde er givet af blandt andre Hansen og Jensen (1988) samt Ølgaard (1965). Kristensen (1971) anslår, at vandindholdet i jorden kan måles med en sikkerhed på ± 1 vol. % ved 95 % sikkerhedsgrænse forudsat, at de anvendte kalibreringsfunktioner er korrekt bestemte. Dette svarer til en sikkerhed på ± 1 mm pr. 10 cm jorddybde. Hvis vandindholdet i dybden 0-30 cm blev estimeret udfra en neutronmåling i 20 cm, viste beregninger (Kristensen, 1971), at vandindholdet i hele profilet var 1-12 mm større end vandindholdet i samme profil, hvor vandindholdet i dybden 0-10 cm var estimeret udfra en måling i 10 cm. Ved målinger med neutronspretning i det øvre jordlag er der risiko for lækage af hurtige neutroner, hvorfor det vil være nødvendig at anvende en speciel kalibrering for dette jordlag. Kristensen (1973) fandt ved anvendelse af en speciel kalibreringsfunktion, at vandindholdet i dybden 0-20 cm kan estimeres med samme nøjagtighed, som kan forventes med gravimetriske metoder.

Flere typer inddata er bestemmende for fejlen på E_a , herunder størrelsen af potentiel fordampning, der i modellen svarer til potentiel fordampning fra en kortklippet græsafrøde, størrelsen af det beregnede grønne bladarealindeks samt værdier for de jordfysiske parametre. Potentiel fordampning fra vejetablerede afgrøder med betydelig højde må midt i vækstperioden formodes at være større end reference-fordampningen, jf. Doorenbos og Kassam (1979). Aslyng og Hansen (1985) fandt, at aktuel fordampning fra flere afgrøder var 10-20 % større end reference-fordampningen. Størrelsen af potentiel fordampning fra landbrugsafgrøder er dog ikke velundersøgt under danske forhold og derfor ikke indregnet i vandbalancemodellen. Afgrødemodellen er ikke valideret for alle afgrøder, idet der ikke på nuværende tidspunkt er tilstrækkelig data til rådighed. Det formodes derfor, at beregningen af stigende og aftagende grøn bladarealindeks ikke i alle tilfælde er korrekt. Der er i simuleringen anvendt et sæt jordtypeafhængige parametre, der generelt karakteriserer jorden ved forsøgslokaliteterne Jyndevad, Borris og Foulum. Det må formodes, at bedre estimater af E_a kan opnås, såfremt jordtypen beskrives mere præcist for de enkelte led i forsøgene, idet der derved kan tages hensyn til den rumlige variabilitet.

Usikkerheden på R er iøvrigt bestemt af de usikkerheder, der naturligt er tilstede, når modelsimuleringer sammenlignes med punktmålinger på markniveau. Her tænkes især på, at modelberegningerne i denne sammenligning gælder for markforhold uden indflydelse af lokalklimatiske faktorer bl.a. læhegn og skråninger.

I datamaterialet er fundet store enkelt afvigelser fra 0 på R henholdsvis størrelsesordenen -7 - 7 mm dag⁻¹ i Jyndevad og -10 - 10 mm dag⁻¹ i Foulum. Det må formodes, at disse

Tabel 4.5: Middelværdi og spredning på R' beregnet på data fra storparceller ved Afdeling for Jordbrugsmeteorologi i Foulum. Minimum n er 3.

Afgrøde	$\overline{R'}$, mm	s	Obs.	Max. n	Antal år
Alle	0.28	7.89	578	15	4
Vårbyg	1.15*	6.62	138	14	4
Vinterhvede	0.11	7.47	134	12	4
Vårraps	-0.31	6.58	74	13	3
Ærter	-0.40	6.59	42	11	2
Alm. rajgræs	0.14	9.60	190	15	4
Signifikansniveauer:					
*: $0.05 > P > 0.01$, **: $0.01 > P > 0.001$, ***: $0.001 > P$					

afvigelser overvejende kan forklares ved ovennævnte fejlkilder på E_{am} . De generelle afvigelser fra 0 på R er i størrelsesordenen $-2 - 2 \text{ mm dag}^{-1}$ og $-4 - 4 \text{ mm dag}^{-1}$ for henholdsvis Jyndevad og Foulum. Disse afvigelser kan formentlig i hovedsagen forklares som tilfældig variation, men for visse afgrøder delvis også som systematiske forskelle.

En mere generel vurdering af forskelle mellem modelberegninger og målte data opnås ved at sammenligne størrelsen af aktuel fordampning beregnet for de afstrømningsfrie neutronmåleperioder:

$$E'_{am} = (M_{st} - M_{sl} + P + I) \quad (4.2)$$

hvor E'_{am} er målt aktuel fordampning i en given periode, mm,

M_{st} og M_{sl} er jordvandindhold målt ved start og slut af perioden, mm,

P er nedbør i perioden, mm, og

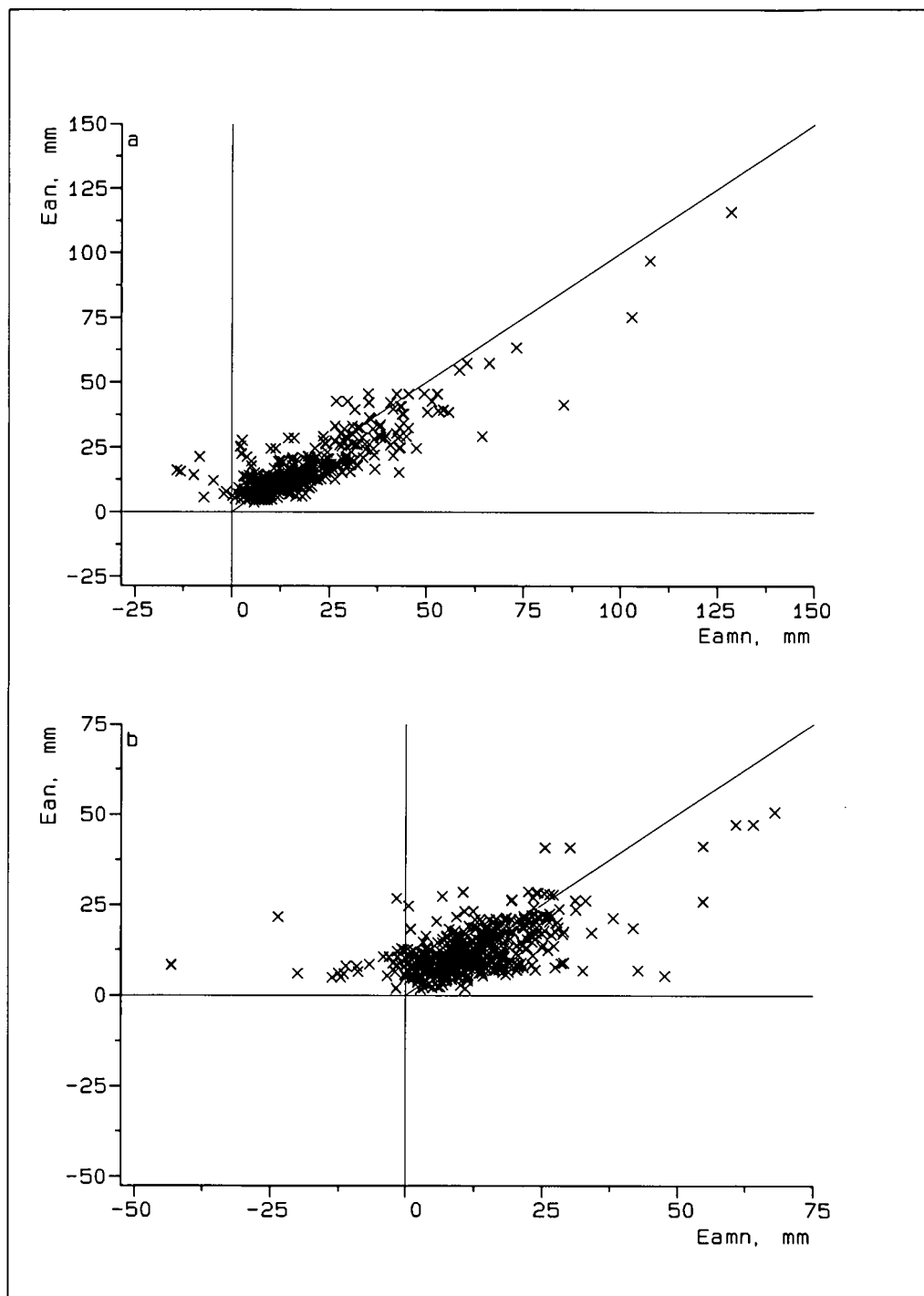
I er vanding i perioden, mm.

Den beregnede aktuelle fordampning i samme periode betegnes E'_a .

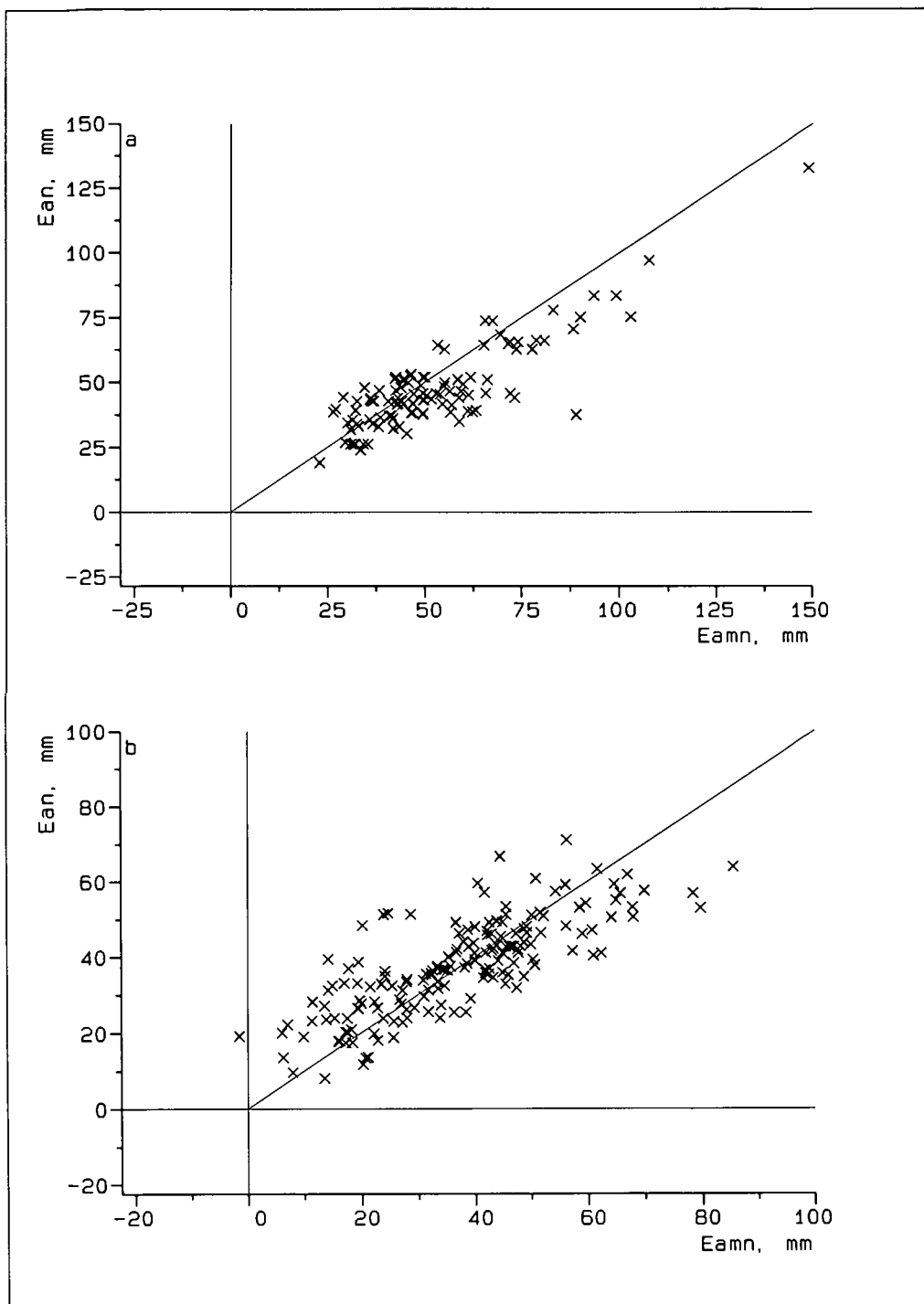
I figur 4.20 og 4.21 er vist E'_a afbildet mod E'_{am} , hvor minimum n er valgt henholdsvis til 3 og 14. Det fremgår af figur 4.20, at flere målte fordampninger er negative, og at usikkerheden på E'_{am} er relativt stor. Usikkerheden på de målte fordampninger reduceres betydeligt ved at øge periodelængden n til mindst 14.

Betragtes differenserne $R' = E'_a - E'_{am}$ kan forskelle på målt og beregnet aktuel fordampning belyses ved en t-test. Under antagelse af at R' er normalfordelt med middelværdi μ og varians σ^2 testes hypotesen $\mu = 0$. Testen viser, om der er signifikant forskel på målt og beregnet aktuel fordampning. I tabel 4.5 og 4.6 er gengivet resultatet af en sådan analyse af data fra Foulum og Jyndevad. Minimum n er valgt lig 3.

Det fremgår af tabel 4.5, at middelværdien $\overline{R'}$ ikke er signifikant forskellig fra nul ved



Figur 4.20: Beregnet fordampning E'_a afbildet mod målt fordampning E'_{am} . Minimum n lig 3. a: Data fra markforsøg ved Jydevad. b: Data fra storparceller ved Foulum.



Figur 4.21: Beregnet fordampning E'_a afbildet mod målt fordampning E'_{am} . Minimum n lig 14. a: Data fra markforsøg ved Jydevad. b: Data fra storparceller ved Foulum.

Tabel 4.6: Middelværdi og spredning på R' beregnet på forsøgsdata fra Jyndevad. Minimum n er 3.

Afgrøde	$\overline{R'}$, mm	s	Obs.	Max. n	Antal år
Alle	-1.53***	7.75	466	49	9
Vinterhvede	-5.52	15.83	14	15	1
Vårbyg	-1.18	5.08	46	7	3
Vinterbyg	-1.11	5.46	41	8	3
Ærter	1.50	8.85	15	12	2
Kartofler m.tidl.	0.81	7.72	58	17	3
Kartofler sild.	-1.16	5.86	66	8	3
Roer	-2.63*	8.01	60	12	4
Majs	-1.32	10.38	12	22	1
Vinterraps	-3.62	7.34	18	17	3
Alm. rajgræs	-2.13**	8.09	136	49	4
Signifikansniveauer:					
*: $0.05 > P > 0.01$, **: $0.01 > P > 0.001$, ***: $0.001 > P$					

Foulum, med undtagelse af vårbyg. Spredningen er stor og nogenlunde konstant mellem afgrøder. Der synes at være en tendens til oversimulering af aktuel fordampning fra vårbyg og alm. rajgræs samt en tendens til en undersimulering af fordampningen fra vårraps og ærter. Tilsvarende tendenser blev antydnet i det foregående afsnit i analysen af aktuel fordampning på daglig basis.

Af tabel 4.6 fremgår, at middelværdien $\overline{R'}$ er signifikant forskellig fra 0 i hele datamaterialet og i data fra forsøg med bederoer og alm. rajgræs i Jyndevad, men ikke signifikant for øvrige afgrøder. Spredningen er stor 7.75 for hele datamaterialet, men ret variabel mellem afgrøder. Tendensen til under- og oversimulering af aktuel fordampning fra de forskellige afgrøder genfindes i forrige afsnit i analysen af aktuel fordampning på daglig basis.

Generelt er der tendens til en undersimulering af fordampningen i Jyndevad. Dette kan muligvis forklares ved indflydelsen af advektiv energi fra de ofte tørre omgrænsende arealer, der ligger i nærhed af forsøgsmarkerne. En sådan faktor, der øger den målte fordampning, er vanskelig at kvantificere og derfor heller ikke medtaget i vandbalancemodellen.

5 Systemafprøvning

Gennem samarbejde med Landskontoret for Planteavl har MARKVAND-systemet været afprøvet på flere konsulentcentre samt direkte hos enkelte landmænd. I 1988 og 1989 blev systemet afprøvet overfor landmænd på ca. tolv konsulentcentre fortrinsvis beliggende i Midt-, Vest- og Sønderjylland. Antallet af ejendomme, der deltog i afprøvningen, varierede fra to til syv pr. konsulentcenter. I 1990 foregik afprøvningen på 13 konsulentcentre med ialt 31 landmænd. Flere af konsulenterne og landmændene var gengangere fra de to første afprøvningsrunder. Endvidere blev systemet i 1990 afprøvet af seks landmænd med egne PC'er.

Formålet med afprøvningen var bl.a.: at sammenligne vandingsforslag beregnet med MARKVAND med et manuelt vandingsregnskab, at sammenligne det beregnede jordvandunderskud i MARKVAND med jordvandunderskuddet beregnet på grundlag af tensiometer aflæsninger og at afprøve brugervenligheden af grænsefladen til håndtering og præsentation af ind- og uddata.

Afprøvningsne har medført, at systemet på flere områder er tilpasset krav og ønsker fra landbruget og rådgivningstjenesten. De fleste ændringer er foretaget i brugergrænsefladen til systemet, herunder opbygning af skærm billeder til håndtering af ind- og uddata. Få men væsentlige ændringer er foretaget i systemets modeller, herunder justering af fordampning fra bar jord i vandbalancemodellen og justering af bladarealindeks for græs i afgrødemodellen. Endvidere er systemet gennem afprøvningsperioden udvidet til at omfatte flere afgrøder.

Sammenfattende kan det ud fra afprøvningsne konkluderes, at MARKVAND-systemet er et velegnet værktøj til støtte for beslutninger om vanding i landbruget. Et udpræget ønske var, at få systemet udvidet til at opstille en prioriteret rækkefølge af hvilke afgrøder og marker, der bør vandes, når vandingskapaciteten er begrænset.

6 Konklusion

MARKVAND er et EDB-baseret vandingsstyringssystem til støtte for beslutning om vanding i landbruget. Systemet anviser i sin nuværende form vanding i en 5-døgns prognoseperiode uden en egentlig prioritering mellem afgrøder og marker, når vandingskapaciteten er utilstrækkelig.

MARKVAND-systemet er opbygget af empiriske modeller samt en brugergrænseflade til håndtering af ind- og uddata. Bladareal- og rodudvikling samt fænologisk udvikling beregnes i afgrødemodellen på baggrund af temperatursummer. I vandbalancemodellen beregnes daglige værdier for aktuel fordampning, afdræning og jordvandsunderskud i rodzonen på baggrund af beregnet afgrødeudvikling, jordfysiske data samt klimatiske elementer, herunder potentiel fordampning samt lokal nedbør og vanding. I vandbalancemodellen antages, at aktuel fordampning ikke kan overstige potentiel fordampning, der i modellen svarer til potentiel fordampning fra en kortklippet græsafrøde. I beslutningsmodellen beregnes vandingsforslag, når det relative jordvandsunderskud overskrider en værdi, som afhænger af afgrøde og afgrødens udvikling.

Vandbalancemodellen er afprøvet ved anvendelse af målinger af jordvandindhold ved Jyndevad, Borris og Foulum. Dataanalyserne viser, at usikkerheden på den målte fordampning er stor. Den største usikkerhedsfaktor er formodentlig en fejlagtig men uundgåelig indregning af nedbørs- og vandingsmængder i de perioder, der anvendtes til opgørelse af målt fordampning.

I forsøgsmaterialet fra Foulum findes generelt ingen statistisk sikker forskel mellem beregnet og målt fordampning. Derimod findes for alle afgrøder under et i Jyndevad en statistisk sikker forskel og en tendens til underestimering af fordampningen for de fleste afgrøder. Årsagen til disse afvigelser kan ikke forklares med sikkerhed, men kan skyldes fejl i inddata til vandbalancemodellen, herunder at advektiv energi ikke indregnes i modellen, at niveauet af potentiel fordampning under visse omstændigheder er ukorrekt eller at beregningen af stigende og aftagende grøn bladarealindeks er forkert.

På baggrund af dataanalyserne kan konkluderes, at vandbalancemodellen generelt beregner korrekte værdier for daglig aktuel fordampning. Forbedring på beregningen kan formentlig opnås ved forbedring af afgrødemodellens simulering af grøn bladarealindeks. Det bør endvidere undersøges, om simuleringen kan forbedres ved at anvende en afgrødespecifik maksimal fordampning. Hertil kræves dog bedre målinger af aktuel fordampning fra afgrøderne.

MARKVAND har i vækstsæsonerne 1988-90 været afprøvet på flere konsulentcentre samt

i 1990 direkte hos landmænd. Sammenfattende kan det ud fra afprøvningerne konkluderes, at MARKVAND-systemet er et velegnet værktøj til støtte for beslutning om vanding i landbruget. Et udpræget ønske fra brugerne er, at få systemet udvidet til at opstille en prioriteret rækkefølge af hvilke afgrøder og marker, der bør vandes, når vandingskapaciteten er utilstrækkelig.

MARKVAND-systemet er i sin nuværende form færdigudviklet og håndterer vandingsvejledning for en række udbredte kulturafrøder i landbruget. Systemet videreudvikles i et igangværende projekt, hvor der opstilles en prioriteringsmodel, der kan anvise hvilke afgrøder og marker, det bedst kan betale sig at vande.

7 Litteratur

Andersen, A. (1986). Rodvækst i forskellige jordtyper. Tidsskr. Planteavl 90, 60. Beretning nr. S 1827.

Andersen, B. (1989). Vandingsvejledning. Landskontoret for Planteavl. Århus

Andersen, S. (1980). Landbrugsplanterne. DSR Forlag. Landbohøjskolen. København. B 1-60, D 1-37 og E 1-57.

Anonym (1985). Internt notat. Jyndevad Forsøgsstation. Afd. for Kulturteknik, Statens Planteavlsforsøg.

Aslyng, H. C. (1978). Vanding i jordbruget. 4. udg. DSR Forlag. Den kgl. Veterinær- og Landbohøjskole. 167 pp.

Aslyng, H. C. (1987). Vanding i jordbruget. DSR Forlag. Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole. København. 167 pp.

Aslyng, H.C. og Hansen, S. (1982). Water Balance and Crop Production Simulation. The Royal Veterinary and Agricultural University. Copenhagen. 200 pp.

Aslyng, H. C. og Hansen, S. (1985). Radiation, water and nitrogen balance in crop production. Field experiments and simulation models WATCROS and Nitcros. Hydrotechnical laboratory. The Royal Veterinary and Agricultural University. Copenhagen. 146 pp.

Danmarks Statistik (1986). Landbrugsstatistik 1985. 330 pp.

Doorenbos, J. og Kassam, A. H. (1979). Yield response to water. F.A.O. Irrigation and drainage paper 33. 193 pp.

Flengmark, P. (1984). Sorter af markært 1981-83. Statens Planteavlsforsøg. Meddelelse nr. 1759.

Flengmark, P. (1985). Sorter af bælgssæd og olieplanter 1985. Statens Planteavlsforsøg. Meddelelse nr. 1811.

Flengmark, P. (1986). Sorter af bælgssæd og olieplanter 1986. Statens Planteavlsforsøg. Meddelelse nr. 1858.

Flengmark, P. (1987a). Sorter af bælgsgød og olieplanter 1987. Statens Planteavlsvforsøg. Meddelelse nr. 1902.

Flengmark, P. (1987b). Sorter af rodfrugter, majs og grønforerplanter 1987. Statens Planteavlsvforsøg. Meddelelse nr. 1906.

French, B. K. og Legg, B. L. (1979). Rothamsted irrigation 1964-76. J. agric. Sci., Camb. 92, 15-37.

Gallagher, J. N., Biscoe, P. V. og Scott, R. K. (1976). Barley and its environment. VI. Growth and development in relation to yield. J. Appl. Ecol. 13, 563-583.

Gregersen, A. og Knudsen, H. (1981). Normalværdier for vandingsbehov, afstrømning og nettevandbehov ved forskellig rodzonekapacitet. Tidsskr. Planteavl 85, 72. Beretning nr. S1537.

Hansen, L. (1976). Jordtyper ved Statens Forsøgsstationer. Tidsskr. Planteavl 80, 742-758.

Hansen, S. (1984). Estimation of potential and actual evapotranspiration. Nordic Hydrology 15, 205-212.

Hansen, S. og Jensen, H.E. (1988). Spatial variability of soil physical properties. Theoretical and experimental analyses. II. Soil water variables - data acquisition, processing and basic statistics. Department of soil and water and plant nutrition, The Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen. 54 pp.

Hansen, S., Storm, B. og Jensen, H.E. (1986). Spatial variability of soil physical properties Theoretical and experimental analyses. I. Soil sampling, experimental analyses and basic statistics of soil physical properties. Department of soil and water and plant nutrition, The Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen. 54 pp.

Heick, J. (1972). Rodudvikling i sandjord i relation til jordfysiske forhold. Hydroteknisk Laboratorium. Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole. København. 138 pp.

Hejlesen, E. og Andersen J. B. (1984). Stofproduktion og næringsstofoptagelse i vinter- og vårbyg ved forskellige vandingsfrekvenser. Tidsskr. Planteavl 88, 49-61.

Hiler, E. A. og Clark, R. N. (1971). Stress day index to characterize effects of water stress on crop yields. Trans. Am. Soc. agric. Engrs. 14, 757-761.

Holst, K.Aa. og Kristensen, K.J. (1981). Model for bestemmelse af aktuel fordamning. Dansk Komite for Hydrologi, Rapport nr. Suså H5, København 61 pp.

- Holst, K.Aa. og Madsen, H.B. (1988).* Modelling the irrigation need. Acta Agric. Scand. 38, 261-269.
- Imtiyaz, M. (1983).* Growth, yield and water relations of barley as influenced by soil moisture stress. Hydrotechnical Laboratory, The Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen, Denmark. 202 pp.
- Imtiyaz, M., Kristensen, K. J. og Mogensen, V. O. (1982).* Influence of irrigation on water extraction, evapotranspiration, yield and water use efficiency of spring wheat and barley. Acta. Agric. scand. 32, 263-271.
- Jensen, A. (1988).* Sorter af rodfrugter, majs og grønfødeplanter 1988. Grøn Viden, Landbrug nr. 20.
- Jensen, A. (1989).* Sorter af rodfrugter, majs og grønfødeplanter 1989. Grøn Viden, Landbrug nr. 34.
- Jensen, F. (1986).* Vanding af vår- og vinterraps. Tidsskr. Planteavl 90, 251- 258.
- Jensen, F. (1987).* Vandingsbehov i forskellige vækstfaser hos ærter. Tidsskr. Planteavl 91, 113-119.
- Jørgensen, V. (1984).* Vandforsyningens indflydelse på udbytte og kvalitet af kartofler. Tidsskr. Planteavl 88, 453-468.
- Jørgensen, V. (1985).* Styling af vanding i planteavlsbrug. Agrologisk Tidsskrift, Marken nr. 5, 10-18.
- Jørgensen, V. og Edlefsen, O. (1987).* Vandforsyningens indflydelse på udbytte og kvalitet af industrikartofler. Tidsskr. Planteavl 91, 329-347.
- Knudsen, H. (1978).* Vanding i jordbruget. Betænkning fra udvalget vedr. kunstig vanding i jordbruget. Betænkning nr. 141. Landbrugsministeriet.
- Kristensen, K. J. (1971).* Måletæthed og -sikkerhed ved måling af jordfugtighed med neutron moderation. Norw. Comm. I.H.D. Rep. No. 2, 96-117.
- Kristensen, K.J. (1973).* Depth intervals and topsoil moisture measurement with the neutron depth probe. Nordic Hydrology 4, 77-85.
- Kristensen, K.J. og Jensen, S.E. (1975).* A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration. Nordic Hydrology 6, 170-188.
- Madsen, H. B. (1983).* Himmerlands jordbundsforhold. C.A. Reitzels Forlag. København. 329 pp.

Madsen, H. B. og Holst, K. (1987). Potentielle marginaljorder. Marginaljorder og miljøinteresser. Miljøministeriets projektundersøgelser 1986. Teknikerrapport nr. 1.

Makkink, G.F. (1957). Ekzamen de la formulo de Penman. Repr. Neth. J. Agric. Sci. 5, 290-305.

Mikkelsen, H.E. (1990). Beregning af klimanormaler til kvadratnet for nitratmålinger. Normaler for nedbør, lufttemperatur og potentiel fordampning. AJMET Arbejdsnotat nr. 11. Afd. for Jordbrugsmeteorologi, Statens Planteavlsvforsøg.

Mikkelsen, M. og Andreassen, F. M. (1984). Klimatiske og jordbundsmæssige årsager til udbyttevariation i markært. Hovedopgave i Landbrugets Planteavl. Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole. København. 125 pp.

Mikkelsen, S.A., Olesen, J.E. og Friis, E. (1983). Jordbrugsmeteorologi II. Rapport fra Jordbrugsmeteorologiprojektet 1981-1982. Tidsskr. Planteavl 87, 297. Beretning nr. S1655.

Mogensen, V. O. (1980). Drought sensitivity at various growth stages of barley in relation to relative evapotranspiration and water stress. Agron. J. 72, 1033-1038.

Mogensen, V. O. (1990). Markvandingssystemer. Kulturteknik II. DSR Forlag. Den kgl. Veterinær- og Landbohøjskole, København. 166 pp.

Mogensen, V. O. og Hansen, B. S. (1979). Drought periods in Denmark 1956-1976. Calculations for field irrigation. Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole. Årsskr. 1979, 25-42.

Olesen, J. E. (1987). Mikrometeorologi. Ugeskrift for Jordbrug 132, 1041-1046.

Olesen, J.E. (1988). Jordbrugsmeteorologisk årsoversigt 1987. Tidsskr. Planteavl 92, 16. Beretning nr. S1924.

Olesen, J.E. (1990a). Calculation of temperature sum normals using a statistical formula. AJMET Research Note No. 13. Afdeling for Jordbrugsmeteorologi, Statens Planteavlsvforsøg.

Olesen, J.E. (1990b). Estimation of global radiation from cloud cover measurements. AJMET Research Note No. 18. Afdeling for Jordbrugsmeteorologi, Statens Planteavlsvforsøg.

Olesen, J.E. og Heidmann, T. (1990). EVACROP. Et program til beregning af aktuel fordampning og afstrømning fra rodzonen. AJMET Arbejdsnotat nr. 9. Afdeling for Jordbrugsmeteorologi, Statens Planteavlsvforsøg.

Olesen, J.E. og Plauborg, F. (1990). Datastruktur og database i MARKVAND. AJMET arbejdsnotat nr. 19. Afdeling for Jordbrugsmeteorologi, Statens Planteavlsforsøg.

Olsen, M. (1958). Orienterende forsøg vedrørende jordens dybdebehandling. Hedeselskabets forskningsvirksomhed. Beretning nr. 3. 41 pp.

Pedersen, K. E. (1986). Sorter af rodfrugter, majs og grønfoderplanter 1986. Statens Planteavlsforsøg. Meddelelse nr. 1873.

Plauborg, F. (1990). MARKVAND. Vandingsstyring på PC. Brugervejledning. Version 3.00. AJMET arbejdsnotat nr. 20. Afdeling for Jordbrugsmeteorologi. Landbrugscentret. Statens Planteavlsforsøg.

Stegman, E. C. (1983). Irrigation scheduling: Applied timing criteria. In: Advances in Irrigation (Hillel, D.; ed.). Academic Press, New York, Vol 2, 1-30.

Thompson, N., Barrie, I.A. og Ayles, M. (1981). The Meteorological office rainfall and evaporation calculation system: (MORECS July 1981). Hydrological Memorandum No. 45. Meteorological Office, Bracknell, UK.

Thomsen, P. C. (1989). Slætantal, kvælstofmængder og vanding i alm. rajgræs. Tidsskr. Planteavl 93, 33. Beretning nr. S2026.

Ølgaard, P.L. (1965). On the theory of the neutronic method for measuring the water content in soil. Risø Report no. 97. Research Establishment Risø, Danish Atomic Energy Commission.

A Symbolliste

- γ Psykrometerkonstanten, 66.7 Pa °C⁻¹
- λ Vands fordampningsvarme, 2.465 MJ mm⁻¹
- θ_F Relativt plantetilgængeligt vandindhold, mm mm⁻¹
- θ_{Fo} Relativt plantetilgængeligt vandindhold i overjord, mm mm⁻¹
- θ_{Fu} Relativt plantetilgængeligt vandindhold i underjord, mm mm⁻¹
- θ_f Relativt vandindhold ved markkapacitet, mm mm⁻¹
- θ_{fo} Relativt vandindhold i overjord ved markkapacitet, mm mm⁻¹
- θ_{fu} Relativt vandindhold i underjord ved markkapacitet, mm mm⁻¹
- θ_w Relativt vandindhold ved visnekapacitet, mm mm⁻¹
- θ_{wo} Relativt vandindhold i overjord ved visnekapacitet, mm mm⁻¹
- θ_{wu} Relativt vandindhold i underjord ved visnekapacitet, mm mm⁻¹
- A_r Relativt jordvandsunderskud i rodzone, %
- A_{Fl} Tilladeligt relativt jordvandsunderskud gældende for vækstfase F_l , %
- A_u Relativt jordvandsunderskud i øvre rodzonereservoir, %
- C_I Kapacitet af interceptionsreservoiret gældende for det totale bladarealindeks, mm
- C_b Kapacitet i subzonereservoir, mm
- C_e Kapacitet i evaporationsreservoir, mm
- C_r Kapacitet for plantetilgængeligt vand ved markkapacitet i rodzone, mm
- C_{rJ} Kapacitet for plantetilgængeligt vand ved markkapacitet i maksimal rodzone bestemt af jordtypen, mm
- C_u Kapacitet i øvre rodzonereservoir, mm
- c_I Kapacitetskonstant for interceptionsreservoir, 0.5 mm
- c_T Transpirationskonstant, mm

- c_e Basisevaporationskonstant, mm
- c_r Rodvæksthastighed, mm dag⁻¹
- D_b Afdræning ud af subzone, mm dag⁻¹
- D_r Afdræning ud af rodzone, mm dag⁻¹
- E_a Aktuell fordampning fra jord og afgrøde, mm dag⁻¹
- E'_a Aktuell fordampning i en given periode, mm
- E_{aI} Aktuell fordampning fra interceptionsreservoir, mm dag⁻¹
- E_{aT} Aktuell fordampning fra afgrøden ved transpiration, mm dag⁻¹
- E_{ae} Aktuell fordampning fra jordoverfladen, mm dag⁻¹
- E_{aig} Aktuell fordampning fra interceptionsreservoir gældende for grønne blade, mm dag⁻¹
- E_{aiy} Aktuell fordampning fra interceptionsreservoir gældende for gule blade, mm dag⁻¹
- E_{am} Målt gennemsnitlig daglig aktuell fordampning, mm dag⁻¹
- E'_{am} Målt aktuell fordampning i en given periode, mm
- E_p Klimatisk bestemt potentiel fordampning, mm dag⁻¹
- E_{pT} Potentiel fordampning ved planters transpiration, mm dag⁻¹
- E_{pc} Potentiel fordampning fra afgrøden, mm dag⁻¹
- E_{pcg} Potentiel fordampning fra grønt bladareal, mm dag⁻¹
- E_{pcy} Potentiel fordampning fra gult bladareal, mm dag⁻¹
- E_{pe} Potentiel fordampning fra jordoverfladen, mm dag⁻¹
- F Vækstfase i afgrøde
- F_l Vækstfase l i afgrøde, $l \in [1, l_x]$
- F_{lx} Sidste vækstfase i afgrøde, $l_x \in [1, 5]$
- I Vandingsmængde, mm
- I_E Vandingseffektivitet, %
- $I_{E(obs)}$ Brugerangivet vandingseffektivitet, %
- I_f Foreslået vandingsmængde, mm
- k_p Ekstinktionskoefficient for fordeling af potentiel fordampning, 0.6

- k_{qb} Afdræningskonstant for subzone
- k_{gr} Afdræningskonstant for rodzone
- L Totalt bladarealindeks
- L_g Bladarealindeks for grønne blade
- L_{gC} Bladarealindeks for grønne blade i græs efter afhugning
- L_{ge} Bladarealindeks for grønne blade, hvor væksthastighed af grønne blade ændres fra konstant til eksponentiel
- L_{gm} Bladarealindeks for grønne blade ved vækststop/fuldmodenhed
- L_{gv} Bladarealindeks for grønne blade ved vækststart/fremspiring
- L_{gz} Maksimalt bladarealindeks for grønne blade
- L_y Bladarealindeks for gule blade
- L_{ym} Bladarealindeks for gule blade ved fuldmodenhed
- M_{sl} Målt vandindhold med neutronspreddning ved slut på en måleperiode, mm
- M_{st} Målt vandindhold med neutronspreddning ved start på en måleperiode, mm
- n Antal dage i perioden mellem to målinger med neutronspreddning
- P Nedbør, mm dag⁻¹
- P_I Overskydende nedbør efter interception, mm dag⁻¹
- R Simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning, mm dag⁻¹
- R' Simuleret minus målt aktuel fordampning i en given periode, mm
- R_{si} Globalstråling, MJ dag⁻¹
- $\overline{R_a}$ Akkumuleret middelværdi af simuleret minus målt gennemsnitlig daglig aktuel fordampning, mm
- $\overline{R'}$ Middelværdi af simuleret minus målt aktuel fordampning R' , mm
- S Given temperatursum, °C
- S_{FI} Temperatursumskrav for vækstfase F_I , °C
- S_{Lagj} Temperatursumskrav for perioden uden genvækst efter j 'te afhugning, °C
- S_{Le} Temperatursumskrav hvor væksthastighed af grønne blade ændres fra konstant til eksponentiel, °C

- S_{Lm} Temperatursumskrav for fuldmodenhed, °C
- S_{Lr} Temperatursumskrav for begyndende gulfarvning af grønne blade, °C
- S_{Lx} Temperatursumskrav for maksimalt bladarealindeks for grønne blade, °C
- S_a^b Aktuel temperatursum beregnet fra dag a til b , °C
- $S_{t_0}^t$ Aktuel temperatursum beregnet fra dag t_0 til t , °C
- S'_{Lm} Brugerbestemt temperatursumskrav for fuldmodenhed, °C
- S'_{Lr} Brugerbestemt temperatursumskrav for begyndende gulfarvning af grønne blade, °C
- s Damptrykkurvens hældning ved en given temperatur, Pa °C⁻¹
- T Døgnmiddel lufttemperatur, °C
- T_b Basistemperatur, °C
- T_t Døgnmiddel lufttemperatur for dag t , °C
- t_0 Startdato for vækst af blade og rødder
- t_{Cj} Dato for j 'te afhugning i græs, $j \in [1, 10]$
- $t_{FI(obs)}$ Observeret dato for afslutning på vækstfase F_l
- t_S Dato beregnet på baggrund af temperatursum S og kendt startdato
- $t_{S_{F_l}}$ Dato for afslutning af vækstfase F_l beregnet ud fra temperatursummen S_{F_l} og startdatoen t_{l-1}
- $t_{S_{L_0}}$ Startdato for vækst af blade og rødder beregnet på baggrund af temperatursummen S_{L_0} og startdatoen 1. marts
- $t_{S_{L_{agj}}}$ Dato for genvækst i græs efter den j 'te afhugning beregnet på baggrund af temperatursummen $S_{L_{agj}}$ og startdatoen t_{Cj}
- $t_{S_{L_e}}$ Dato for ændring af væksthastighed af grønne blade fra konstant til eksponentiel beregnet ud fra temperatursummen S_{L_e} og startdatoen t_0
- $t_{S_{L_m}}$ Dato for vækststop/fuldmodenhed beregnet på baggrund af temperatursummen S_{L_m} og startdatoen t_0
- $t_{S_{L_r}}$ Dato for begyndende gulfarvning af grønne blade beregnet på baggrund af temperatursummen S_{L_r} og startdatoen t_0
- $t_{S_{L_x}}$ Dato for maksimalt bladarealindeks for grønne blade beregnet på baggrund af temperatursummen S_{L_x} og startdatoen t_0

- t_h Dato for høst af afgrøden
- t_v Dato for start på vinterperioden, 1. november
- V_I Vandindhold i interceptionsreservoir, mm
- V_b Vandindhold i subzonerreservoir, mm
- V_e Vandindhold i evaporationsreservoir, mm
- V_r Vandindhold i rodzonerreservoir, mm
- V_u Vandindhold i øvre rodzonerreservoir, mm
- z_0 Effektiv roddebyde før vækststart/fremspiring, mm
- z_m Effektiv roddebyde ved vækststop/fuldmodenhed, mm
- z_o Dybden af overjord, mm
- z_r Aktuell effektiv roddebyde, mm
- z_v Effektiv roddebyde ved vækststart/fremspiring, mm
- z_x Maksimal effektiv roddebyde, mm
- z_{xA} Maksimal effektiv roddebyde bestemt af afgrøde, mm
- z_{xJ} Maksimal effektiv roddebyde bestemt af jordtype, mm
- $z_{xJ'}$ Maksimal effektiv roddebyde bestemt af jordtype og brugers oplysninger vedrørende JBnr. og tekstur for underjorden, mm

B Konstanter for klimagrid

Tabel B.1: UTM koordinater i zone 32 for midtpunkter i kvadrater i klimagrid.

Nummer	East (km)	North (km)	Nummer	East (km)	North (km)
1	540	6380	23	540	6180
2	580	6380	24	580	6180
3	500	6340	25	620	6180
4	540	6340	26	660	6180
5	580	6340	27	700	6180
6	460	6300	28	460	6140
7	500	6300	29	500	6140
8	540	6300	30	540	6140
9	580	6300	31	580	6140
10	460	6260	32	620	6140
11	500	6260	33	660	6140
12	540	6260	34	700	6140
13	580	6260	35	500	6100
14	620	6260	36	540	6100
15	460	6220	37	580	6100
16	500	6220	38	620	6100
17	540	6220	39	660	6100
18	580	6220	40	700	6100
19	620	6220	41	620	6060
20	700	6220	42	660	6060
21	460	6180	43	700	6060
22	500	6180	44	875	6125

Tabel B.2: Parameter estimater for Fourierrækker til estimering af normal døgnmiddeltemperatur for hvert kvadrat i klimagriddet. Døgnmiddeltemperaturen estimeres efter ligning 2.3 og angives i °C.

Grid nummer	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_4$
1	7.173	-7.765	-3.435	0.386	-0.287
2	7.011	-7.657	-3.511	0.466	-0.196
3	7.075	-7.239	-3.484	0.293	-0.198
4	7.152	-7.600	-3.456	0.327	-0.218
5	7.231	-7.767	-3.518	0.396	-0.197
6	7.655	-7.347	-3.608	0.260	-0.181
7	7.647	-7.614	-3.582	0.274	-0.192
8	7.229	-7.745	-3.344	0.306	-0.179
9	7.210	-7.623	-3.439	0.337	-0.138
10	7.538	-7.270	-3.562	0.256	-0.174
11	7.228	-7.656	-3.423	0.242	-0.186
12	7.400	-7.794	-3.351	0.297	-0.201
13	7.425	-7.824	-3.372	0.324	-0.238
14	7.648	-7.594	-3.612	0.413	-0.170
15	7.520	-7.333	-3.525	0.208	-0.198
16	7.134	-7.625	-3.285	0.234	-0.193
17	7.386	-7.821	-3.365	0.277	-0.212
18	7.765	-7.751	-3.528	0.313	-0.211
19	7.370	-7.932	-3.279	0.376	-0.256
20	7.920	-8.233	-3.657	0.320	-0.242
21	7.590	-7.380	-3.518	0.171	-0.193
22	7.357	-7.478	-3.342	0.162	-0.189
23	7.442	-7.649	-3.390	0.212	-0.189
24	7.951	-7.455	-3.706	0.311	-0.161
25	8.018	-7.827	-3.674	0.303	-0.210
26	7.955	-8.091	-3.640	0.299	-0.228
27	7.685	-8.201	-3.574	0.299	-0.227
28	7.826	-7.389	-3.540	0.160	-0.176
29	7.440	-7.507	-3.425	0.139	-0.191
30	7.617	-7.405	-3.461	0.178	-0.181
31	7.768	-7.800	-3.490	0.227	-0.201
32	7.827	-7.795	-3.630	0.256	-0.181
33	7.757	-8.028	-3.606	0.227	-0.192
34	7.671	-7.955	-3.624	0.245	-0.152
35	7.660	-7.454	-3.389	0.112	-0.131
36	7.831	-7.488	-3.433	0.173	-0.127
37	7.955	-7.797	-3.616	0.269	-0.206
38	8.030	-7.696	-3.662	0.271	-0.154
39	7.966	-7.993	-3.652	0.249	-0.163
40	8.098	-8.013	-3.854	0.292	-0.059
41	8.197	-7.837	-3.759	0.255	-0.156
42	8.045	-7.999	-3.610	0.231	-0.214
43	8.104	-7.851	-3.904	0.244	-0.047
44	7.921	-7.439	-4.350	0.506	0.291

Tabel B.3: Parameter estimater for Fourierrækker til estimering af normal potentiel fordampning for hvert kvadrat i klimagriddet. Potentiel fordampning estimeres efter ligning 2.4 og angives i mm.

Grid nummer	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_4$
1	1.518	-1.695	0.091	0.283	-0.013
2	1.520	-1.702	0.091	0.288	-0.012
3	1.513	-1.676	0.098	0.269	-0.003
4	1.517	-1.683	0.093	0.279	-0.013
5	1.518	-1.691	0.092	0.282	-0.013
6	1.511	-1.671	0.098	0.267	-0.003
7	1.506	-1.663	0.097	0.262	-0.003
8	1.500	-1.650	0.095	0.259	-0.012
9	1.516	-1.674	0.091	0.268	-0.014
10	1.475	-1.583	0.102	0.225	-0.005
11	1.475	-1.608	0.101	0.242	-0.014
12	1.483	-1.614	0.097	0.239	-0.017
13	1.514	-1.648	0.084	0.241	-0.012
14	1.564	-1.710	0.076	0.261	-0.006
15	1.488	-1.589	0.102	0.222	-0.011
16	1.467	-1.593	0.104	0.238	-0.019
17	1.497	-1.626	0.090	0.241	-0.013
18	1.533	-1.665	0.071	0.244	-0.003
19	1.529	-1.663	0.073	0.242	-0.004
20	1.567	-1.711	0.076	0.253	-0.018
21	1.483	-1.598	0.098	0.232	-0.017
22	1.484	-1.606	0.096	0.237	-0.019
23	1.518	-1.640	0.083	0.245	-0.012
24	1.551	-1.680	0.064	0.248	0.002
25	1.588	-1.718	0.064	0.248	-0.002
26	1.592	-1.725	0.072	0.252	-0.013
27	1.540	-1.680	0.082	0.246	-0.025
28	1.491	-1.603	0.093	0.229	-0.018
29	1.493	-1.603	0.089	0.226	-0.020
30	1.510	-1.625	0.085	0.235	-0.019
31	1.542	-1.662	0.072	0.237	-0.018
32	1.571	-1.693	0.073	0.242	-0.017
33	1.586	-1.709	0.078	0.247	-0.022
34	1.557	-1.692	0.080	0.247	-0.025
35	1.530	-1.627	0.091	0.222	-0.011
36	1.525	-1.636	0.081	0.229	-0.018
37	1.552	-1.669	0.062	0.234	-0.012
38	1.581	-1.700	0.056	0.241	-0.008
39	1.601	-1.726	0.065	0.252	-0.018
40	1.570	-1.700	0.052	0.251	-0.005
41	1.611	-1.732	0.049	0.247	-0.004
42	1.605	-1.733	0.061	0.256	-0.016
43	1.581	-1.712	0.053	0.255	-0.009
44	1.610	-1.791	0.024	0.295	0.015

Afdelinger mv. under Statens Planteavlsvforsøg

Direktionen

Direktionssekretariatet, Skovbrynet 18, 2800 Lyngby.....	45 93 09 99
Informationstjenesten, Skovbrynet 18, 2800 Lyngby.....	45 93 09 99
Afdeling for Biometri og Informatik, Lottenborgvej 24, 2800 Lyngby.....	45 93 09 99

Landbrugscentret

Centerledelse, Fagligt Sekretariat, Forskningscenter Foulum, Postbox 23, 8830 Tjele.	86 65 25 00
Afdeling for Grovfoder og Kartofler, Forskningscenter Foulum, Postbox 21, 8830 Tjele	86 65 25 00
Afdeling for Industriplanter og Froavl, Ledreborg Allé 100, 4000 Roskilde.....	42 36 18 11
Afdeling for Sortsafrøvning, Teglværksvej 10, 4230 Skælskør.....	53 59 61 41
Afdeling for Kulturteknik, Flensborgvej 22, 6360 Tinglev.....	74 64 83 16
Afdeling for Jordbiologi og -kemi, Lottenborgvej 24, 2800 Lyngby.....	45 93 09 99
Afdeling for Planteernæring og -fysiologi, Vejenvej 55, 6600 Vejen.....	75 36 02 77
Afdeling for Jordbrugsmeteorologi, Forskningscenter Foulum, Postbox 25, 8830 Tjele	86 65 25 00
Afdeling for Arealdata og Kortlægning, Enghavevej 2, 7100 Vejle.....	75 83 23 44
Borris Forsøgsstation, Vestergade 46, 6900 Skjern.....	97 36 62 33
Lundgård Forsøgsstation, Kongeåvej 90, 6600 Vejen.....	75 36 01 33
Rønhave Forsøgsstation, Hestehave 20, 6400 Sønderborg.....	74 42 38 97
Silstrup Forsøgsstation, Oddesundvej 65, 7700 Thisted.....	97 92 15 88
Tylstrup Forsøgsstation, Forsøgsvej 30, 9382 Tylstrup.....	98 26 13 99
Ødum Forsøgsstation, Åmdrupvej 22, 8370 Hadsten.....	86 98 92 44
Laboratoriet for Biavl, Lyngby, Skovbrynet 18, 2800 Lyngby.....	45 93 09 99
Laboratoriet for Biavl, Roskilde, Ledreborg Allé 100, 4000 Roskilde.....	42 36 18 11

Havebrugscentret

Centerledelse, Fagligt Sekretariat, Kirstinebjergvej 10, 5792 Årsløv.....	65 99 17 66
Afdeling for Grønsager, Kirstinebjergvej 6, 5792 Årsløv.....	65 99 17 66
Afdeling for Blomsterdyrkning, Kirstinebjergvej 10, 5792 Årsløv.....	65 99 17 66
Afdeling for Frugt og Bær, Kirstinebjergvej 12, 5792 Årsløv.....	65 99 17 66
Afdeling for Landskabsplanter, Granlidevej 22, Hornum, 9600 Års.....	98 66 13 33
Laboratoriet for Forædling og Formering, Kirstinebjergvej 10, 5792 Årsløv.....	65 99 17 66
Laboratoriet for Gartnertechnik, Kirstinebjergvej 10, 5792 Årsløv.....	65 99 17 66
Laboratoriet for Levnedsmiddelforskning, Kirstinebjergvej 12, 5792 Årsløv.....	65 99 17 66

Planteværnscentret

Centerledelse, Fagligt Sekretariat, Lottenborgvej 2, 2800 Lyngby.....	42 87 25 10
Afdeling for Plantepatologi, Lottenborgvej 2, 2800 Lyngby.....	42 87 25 10
Afdeling for Jordbrugszoologi, Lottenborgvej 2, 2800 Lyngby.....	42 87 25 10
Afdeling for Ukrudtsbekæmpelse, Flakkebjerg, 4200 Slagelse.....	53 58 63 00
Afdeling for Pesticidanalyser og Økotoksikologi, Flakkebjerg, 4200 Slagelse.....	53 58 63 00
Bioteknologigruppen, Lottenborgvej 2, 2800 Lyngby.....	42 87 25 10

Centrallaboratoriet

Centrallaboratoriet, Forskningscenter Foulum, Postbox 22, 8830 Tjele.....	86 65 25 00
---	-------------