



Sammenligning af metoder til bestemmelse af potentiel vandfordampning

Harald E. Mikkelsen og Jørgen E. Olesen
Afdeling for Jordbrugsmeteorologi
Forskningscenter Foulum
8830 Tjele



Sammenligning af metoder til bestemmelse af potentiel vandfordampning

Danmarks JordbrugsForskning
Biblioteket
Forskningscenter Flakkebjerg
4200 Slagelse

Harald E. Mikkelsen og Jørgen E. Olesen
Afdeling for Jordbrugsmeteorologi
Forskningscenter Foulum
8830 Tjele

Indholdsfortegnelse

Resumé	5
Summary	6
1 Indledning	7
2 Metoder	9
2.1 Penman	11
2.2 Modificeret Penman	12
2.3 Makkink	13
2.4 HL315	14
3 Datamateriale	16
3.1 Højbakkegård	16
3.2 Foulum	16
3.3 IHD stationer	17
3.4 Statens forsøgsstationer	17
3.5 Fordampningsmålenet	17
4 Målinger med HL315	22
4.1 IHD stationer	22
4.2 Landsdækkende stationsnet	22
5 Sammenligning af metoder	36
5.1 Højbakkegård	36
5.2 Foulum	48
5.3 Statens forsøgsstationer	54
6 Konklusion	60
Erkendtlighed	62
Referencer	63
A Symbolliste	66

Resumé

Potentiel vandfordampning er fordampningen fra en udbredt overflade af en kort, grøn afgrøde, som dækker jorden helt, som kun har lille modstand mod vandtransport, og som altid er velforsynet med vand.

Følgende metoder til bestemmelse af potentiel fordampning er sammenlignet og vurderet:

- Fordampning bestemt efter Penmans metode (1956).
- Fordampning bestemt efter Penman, men med globalstråling som energivariabel.
- Fordampning bestemt efter Penman, men med modelberegnet nettostråling og jordvarmeffluks.
- Fordampning bestemt efter Makkink.
- Fordampning målt med fordampningsmåler HL315.
- Fordampning bestemt ved vejebart lysimeter med kort græs.

Der er en række problemer forbundet med måling af fordampning med HL315. Ud over observationsfejl omfatter disse problemer effekter af forskellige læforhold, oaseeffekt, varmekapacitet i vandbeholderen og overdækning af vandbeholderen med trådnæt. Indflydelsen af lævirkning og oaseeffekt på målingerne i det landsdækkende net kan formentlig udgøre op til ca. 10 % af fordampningen. Påvirkningen kan være i både op- og nedadgående retning.

Ved anvendelse af data fra Højbakkegård er der udviklet en alternativ metode baseret på Penman-ligningen til operationel beregning af potentiel fordampning. Endvidere er potentiel fordampning beregnet efter Penmans metode under anvendelse af en model til beregning af nettostråling og jordvarmeffluks. Begge metoder giver tilfredsstillende estimater.

Det anbefales fremover at beregne potentiel fordampning efter en modificeret Penman, hvor globalstrålingen indgår som energivariabel. Hvor det er muligt, kan Penman-ligningen dog anvendes direkte, evt. med modelberegnet nettostråling og jordvarmeffluks. Makkink-ligningen bør ikke anvendes til beregning af potentiel fordampning, hvor der foreligger data for vindhastighed og luftfugtighed, men kan anvendes, hvor sådanne data ikke kan fremskaffes.

Summary

Potential evapotranspiration is defined as the evaporation from an extended surface of a short green crop which fully shades the ground, exerts little resistance to water flow, and always well supplied with water.

The following methods for determining potential evapotranspiration are compared and evaluated:

- Evapotranspiration calculated with the Penman (1956) equation.
- Evapotranspiration calculated with the Penman equation, where global radiation replaces the energy term.
- Evapotranspiration calculated with the Penman equation with model estimates of net radiation and soil heat flux.
- Evapotranspiration calculated with the Makkink equation.
- Pan evaporation from HL315 pans.
- Evapotranspiration from a weighable lysimeter with short grass.

Measurement of pan evaporation with HL315 gives a number of problems, including problems with shelter, oasis effect, heat capacity of the water volume in the pan and the screen placed over the pan. The influence of shelter and oasis effect on the measurements in the country-wide station network is probably of the same magnitude, and may lead to a 10 % error on the average evaporation.

Based on data from Højbakkegård an alternative method for operational calculation of potential evapotranspiration based on the Penman equation has been developed. Potential evapotranspiration calculated with the Penman equation using model calculated net radiation and soil heat flux have also been evaluated. Both methods give satisfactory results.

It is recommended to calculate potential evapotranspiration with a modified Penman equation, where global radiation is used as the energy term. The Penman equation may, however, be used directly or with a model calculated net radiation and soil heat flux. The Makkink equation should not be used where data for wind velocity and air humidity are available, but may be used where such data cannot be obtained.

1 Indledning

Potentiel fordampning er et hyppigt anvendt begreb i studier af fordampning og vandbalance. Der er dog ikke altid enighed om definitionen af dette begreb. Rosenberg et al. (1983) har givet følgende syntese af de hyppigste definitioner på potentiel fordampning:

Potentiel fordampning er fordampning fra en udbredt overflade af en kort, grøn afgrøde, som dækker jorden helt, som kun har lille modstand mod vandtransport, og som altid er velforsynet med vand. Potentiel fordampning kan ikke overstige fordampningen fra en fri vandoverflade under de samme vejrforhold.

I praksis anvendes ofte en kortklippet og vandet græsplæne som reference for potentiel fordampning. Den potentielle fordampning er ikke nødvendigvis den maksimale fordampning, der kan finde sted fra en vegetation. Den maksimale fordampning fra en afgrøde vil være bestemt både af energibalancen og af afgrødestrukturen, som bestemmer overfladeruheden, der har betydning for modstanden mod fordampning. Aslyng og Hansen (1985) fandt en større nettostråling over flere landbrugsafgrøder end over kort græs på Højbakkegård. Dette vil sammen med disse afgrøders større ruhed betyde, at den maksimale fordampning fra en række afgrøder på visse tidspunkter kan være større end den potentielle fordampning. Dette kan der rådes bod på ved at anvende afgrøde specifikke konstanter til justering af potentiel fordampning (Feddes, 1987).

Potentiel fordampning anvendes i en række sammenhænge. De typiske anvendelser er i vandbalancemodeller, f. eks. Aslyng og Hansen (1982) og Olesen og Heidmann (1990), i modeller til vandingsstyring (Plauborg og Olesen, 1991), i simple vandingsregnskab (Andersen, 1989), og til opgørelse af vandingsbehov (Gregersen og Knudsen, 1980).

Som grundlag for udarbejdelse af vandingsregnskab er i en årrække benyttet data fra et landsdækkende net af fordampningsmålestationer, hvor fordampningen fra en beholder med vand (HL315) måles ugentligt. De fleste anvendelser, hvori der indgår modelberegninger, kræver dog daglige data for potentiel fordampning. Sådanne daglige data er ofte beregnet med Penman- eller Makkink-ligningerne ved brug af meteorologiske data. Der anvendes således en række forskellige metoder til beregning af potentiel fordampning, hvilket i visse situationer kan give anledning til forskellige værdier for fordampningens størrelse, specielt over kortere tidsrum (dage eller uger). Der er derfor behov for en standard for beregning af potentiel fordampning i Danmark. Denne standard skal være operationel, hvilket i praksis betyder, at det skal være muligt at beregne potentiel fordampning for vilkårlige lokaliteter i Danmark på såvel klimatiske data som aktuelle

meteorologiske data. Standarden skal endvidere give realistiske estimater for potentiel fordampning på døgn-, måneds- og årsbasis. Endelig skal det være muligt at anvende metoden klimatologisk.

I denne rapport sammenlignes en række metoder til måling eller beregning af potentiel fordampning, og der gives en anbefaling for en fremtidig standard.

2 Metoder

Der findes en række forskellige indfaldsvinkler til bestemmelse af vandfordampning. De fleste metoder bygger på en eller flere af følgende ligninger.

Vandbalanceligningen udtrykker, at der for et område skal være balance mellem tilførsel og afgang af vand:

$$P = R + E_a + \Delta S \quad (2.1)$$

hvor P er nedbør (mm),

R er afstrømning (mm),

E_a er aktuell fordampning (mm),

ΔS er tilvækst i vandindhold i jord, grundvand, søer m.v. (mm).

Vandbalanceligningen anvendes ofte for større områder, f. eks. afstrømningsoplande. I en modificeret form anvendes ligningen dog også i forsøg, hvor fordampningen bestemmes ved måling jordvandindhold og nedbør, samt på fordampningsstationer, hvor ændring i vandindhold i et vandfyldt kar bestemmes.

Næsten al den energi, der er til rådighed for processer i jord-plante-atmosfære systemet, herunder fordampning, stammer fra solstråling. Strålingsbalancen udtrykkes ved følgende ligning, hvor nettostråling regnes positiv for energistrøm mod jorden (Aslyng, 1976):

$$R_n = S_i - S_u + L_i - L_u = S_n + L_n \quad (2.2)$$

hvor R_n er nettostråling (W m^{-2}),

S_i er globalstråling (W m^{-2}),

S_u er kortbølget refleksion (W m^{-2}),

L_i er langbølget indstråling (W m^{-2}),

L_u er langbølget udstråling (W m^{-2}),

S_n er kortbølget nettostråling (W m^{-2}),

L_n er langbølget nettostråling (W m^{-2}).

Nettostrålingen er et mål for den strålingsenergi, som absorberes eller benyttes ved energikrævende processer. Dette kan samles i energibalanceligningen, hvor jorden er referen-ceflade, og energitilgang regnes positiv og energiafgang negativ:

$$R_n + Q_E + Q_a + Q_s + Q_i + Q_f = 0 \quad (2.3)$$

hvor Q_E er energi til fordampning (W m^{-2}),
 Q_a er fri varme til atmosfæren (W m^{-2}),
 Q_s er energi til jord (W m^{-2}),
 Q_i er energi til smeltning af is eller frysning af vand (W m^{-2}),
 Q_f er energi til fotosyntese eller forbrænding (W m^{-2}).

Q_i og Q_f er så små, at de ofte udelades i energibalancen.

Fordampning er tab af energi (Q_E) fra jord- eller planteoverfladen til atmosfæren. Hvis Q_i og Q_f ignoreres i energibalancen (2.3) fås:

$$R_n + Q_s = -Q_E - Q_a \quad (2.4)$$

Sættes $Q_E = -\lambda E_a$, og $C = -Q_a$ fås:

$$R_n + Q_s = \lambda E_a + C \quad (2.5)$$

hvor λ er vands fordampningsvarme,
 E_a er aktuel fordampning.

Denne ligning beskriver, at den netto tilførte energi tabes ved fordampning (latent varme, λE) og ved varmetransport (fri varme, C) til atmosfæren. Disse to processer foregår ved turbulent transport, der dog ofte simplificeres ved hvirveldiffusion:

$$\lambda E_a = \frac{c_p \rho}{\gamma} [e_s(T_b) - e_a] g_w \quad (2.6)$$

$$C = c_p \rho (T_b - T_a) g_h \quad (2.7)$$

hvor c_p er luftens specifikke varmekapacitet,
 ρ er luftens massefylde,
 γ er psykrometerkonstanten,
 $e_s(T_b)$ er mættede dampes tryk ved bladtemperaturen T_b ,
 e_a er luftens aktuelle damptryk,
 g_w er ledningsevnen for vanddamp,
 T_a er lufttemperaturen,
 g_h er ledningsevnen for fri varme.

I det følgende omtales fire metoder til bestemmelse af potentiel fordampning. Disse metoder vil blive sammenlignet og vurderet i afsnit 4 og 5.

2.1 Penman

Penman (1948) fandt ved kombination af energibalanceligningen (2.3) og ligningerne for turbulent transport af fri og latent varme (2.6 og 2.7), at det med nogle få antagelser er muligt at beskrive fordampningen med en ligning, hvor overfladetemperaturen ikke indgår. Ligningen blev modificeret af Penman (1956), således at den nu har følgende udseende:

$$E_P = \frac{s(R_n + Q_s)}{\lambda(s + \gamma)} + \frac{\gamma f(u_2)(e_s - e_a)}{s + \gamma} \quad (2.8)$$

hvor E_P er potentiel fordampning ($\text{mm d\o g n}^{-1}$),

R_n er nettostråling ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d\o g n}^{-1}$),

Q_s er jordvarmeffluks ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d\o g n}^{-1}$),

e_s er mættede dampes tryk (mb),

e_a er aktuel damptryk (mb),

λ er vands fordampningsvarme (ca. 2.465 MJ kg^{-1}),

γ er psykrometerkonstanten ($0.667 \text{ mb } ^\circ\text{C}^{-1}$),

s er damptrykskurvens hældning ($\text{mb } ^\circ\text{C}^{-1}$),

$f(u_2) = 0.263(0.5 + 0.54u_2)$ ($\text{mm mb}^{-1} \text{ d\o g n}^{-1}$),

u_2 er vindhastighed i 2 m højde (m s^{-1})

Denne ligning beskriver fordampningen fra en kort homogen afgrøde, der er velforsynet med vand. Metoden er videreudviklet af Monteith (1963, 1964) til at omfatte vegetation generelt. Dette involverer dog en bestemmelse af stomatamodstand og aerodynamisk modstand, som kan være vanskelig i praksis.

Kristensen (1979) og Hansen et al. (1981) sammenlignede Penman-fordampningen (E_P) med fordampningen fra vejebare lysimetre (E_l) med kortklippet græs ved Højbakkegård. Kristensen (1979) sammenlignede månedsværdier for de to fordampninger for perioden 1964-1978, og fandt at E_P overstiger E_l med ca. 14 % i vækstsæsonen, dog kun ca. 10 % i sommermånederne. Forskellen var størst i forårsmånederne, hvilket skyldtes utilstrækkeligt vegetationsdække i lysimetrene i starten af vækstsæsonen.

Hansen et al. (1981) udvalgte døgnværdier fra perioden maj til september, hvor græsset var i vækst. Værdierne blev udvalgt fra årene 1974-1978, og kriterierne var, at der ikke forekom nedbør den pågældende dag eller forudgående nat, at der ikke var vandet den pågældende dag, og at der ikke var problemer med registreringen. For disse døgnværdier fandtes, at E_P i middel var ca. 3 % større end E_l . Dette skyldtes i det væsentlige forskelle i maj-værdierne, og kan forklares ved en sen udvikling af græsset i lysimeterkarrene. Hansen et al. (1981) konkluderer derfor, at der for juni til september er en god overensstemmelse mellem Penman-værdierne og fordampningen fra kort græs med bladareal udviklet 1-2 uger efter klipping.

2.2 Modificeret Penman

Nettostråling og jordvarmeffluks måles ikke i landsdækkende stationsnet i Danmark. Penman-ligningen (2.8) kan derfor ikke anvendes direkte til bestemmelse af potentiel fordampning. Summen af nettostråling og jordvarmeffluks vil dog være korreleret med globalstrålingen. Penman-ligningen kan derfor modificeres til:

$$E_{pA} = \beta_{A0} + \beta_{A1} \frac{sS_i}{\lambda(s + \gamma)} + \beta_{A2} \frac{\gamma f(u_2)(e_s - e_a)}{s + \gamma} \quad (2.9)$$

hvor E_{pA} er potentiel fordampning ($\text{mm d\AA}^{-1}$),

$\beta_{A0} - \beta_{A2}$ er empiriske konstanter,

S_i er globalstråling ($\text{MJ m}^{-2} \text{d\AA}^{-1}$).

De empiriske konstanter varierer over året. Variationen i β_{Ax} , hvor $x = \{0,1,2\}$ er beskrevet ved fourier-rækker af formen:

$$\beta_{Ax} = \alpha_0 + \alpha_1 \cos(\omega) + \alpha_2 \sin(\omega) + \alpha_3 \cos(2\omega) + \alpha_4 \sin(2\omega) \quad (2.10)$$

På denne måde fås værdier for de empiriske konstanter i (2.9) for hver dag d i året, startende med $d = 1$ den 1. januar. Fasevinklen ω bestemmes ved $\omega = \frac{2\pi d}{365}$ og parametrene α_0 til α_4 estimeres for hver af de tre størrelser β_{A0} , β_{A1} og β_{A2} ved multipel lineær regression, se ligningerne 5.1-5.3.

En anden mulighed er at beregne nettostråling og jordvarmeffluks ud fra de observerede meteorologiske data. Korsgaard et al. (1991) har udviklet en model til beregning af nettostråling over og jordvarmeffluks under kort græs under danske forhold ved anvendelse af data fra automatiske klimastationer. Disse modelberegnedes værdier kan anvendes sammen med øvrige målte værdier til at beregne potentiel fordampning efter Penman. Denne værdi betegnes her E_{pB} .

Ved de fleste stationer måles vindhastigheden i 10 m højde. Denne vindhastighed omregnes til vindhastigheden i 2 m højde efter et logaritmisk vindprofil:

$$u_z = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2.11)$$

hvor u_z er vindhastigheden (m s^{-1}) i højden z (m),

u_* er friktionshastigheden (m s^{-1}),

κ er von Karman's konstant, $\kappa \approx 0.40$,

z_0 er ruhedslængden (m).

På grundlag af 2.11 fås følgende omregning fra vindhastighed i højden z til vindhastighed i 2 m højde:

$$u_2 = \frac{\ln(2/z_0)}{\ln(z/z_0)} u_z \quad (2.12)$$

hvor u_2 er vindhastigheden (m s^{-1}) i 2 m højde,

En typisk værdi for z_0 over kortklippet græs er 0.01 m.

2.3 Makkink

Observationer over velvandede afgrøder under tempererede klimaforhold viser, at fordampningen er stærkt afhængig af nettostrålingen. Endvidere er det andet led i Penman-ligningen (2.8) ofte kun en fjerdedel af størrelsen af det første led (de Bruin, 1987). Dette fører til den ligning for fordampningen E , som er foreslået af Priestley og Taylor (1972):

$$E = \alpha \frac{s(R_n + Q_s)}{\lambda(s + \gamma)} \quad (2.13)$$

hvor α er en koefficient med en værdi mellem 1.2 og 1.3.

Om sommeren vil nettostrålingen over en velvandet græsplæne ofte være ca. halvdelen af globalstrålingen. Erstatning af strålingsleddet i ligning (2.13) med globalstrålingen giver Makkink-ligningen (Makkink, 1957):

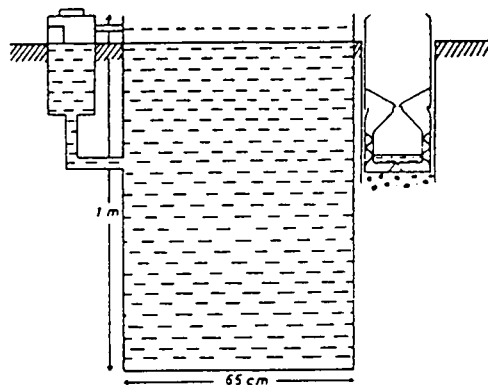
$$E_M = \beta_{M0} + \beta_{M1} \frac{sS_i}{\lambda(s + \gamma)} \quad (2.14)$$

hvor E_M er potentiel fordampning (mm),
 β_{M0} og β_{M1} er konstanter,
 S_i er globalstråling ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Denne ligning er i praksis lettere at anvende end Priestley-Taylor ligningen, da der kun indgår temperatur (via s) og globalstråling i beregningen. I praksis har Makkink-ligningen givet gode resultater under tempereret, fugtigt klima, men vist sig utilstrækkelig i tørt klima (Rosenberg et al., 1983).

Makkink (1957) foreslog følgende konstanter i ligning (2.14) til estimering af potentiel fordampning fra kort græs: $\beta_{M0} = -0.12$ og $\beta_{M1} = 0.61$. I Holland anvendes nu $\beta_{M0} = 0$ og $\beta_{M1} = 0.65$ i Makkink-ligningen (de Bruin, 1987). Aslyng og Hansen (1982) foreslog $\beta_{M0}=0$ og $\beta_{M1}=0.7$ til estimering af potentiel fordampning under danske forhold. I nærværende rapport anvendes det sidstnævnte sæt konstanter.

Makkink-ligningen har kun fysisk mening for sommermånederne (april-oktober). de Bruin (1987) argumenterer dog for, at metoden også kan anvendes med nogen rimelighed for vintermånederne. Da fordampningen i disse måneder er forholdsvis lav, gøres der ikke nogen stor absolut fejl ved dette.



Figur 2.1: Skematisk opbygning af fordampningsmåler HL315. Efter Aslyng og Hansen (1982).

2.4 HL315

Vandfordampning er siden 1956 blevet målt ved en række stationer med en fordampningsmåler af typen HL315. Fordampningsmåleren er en 1 m dyb cirkulær jernbeholder med et tværsnitsareal på 0.315 m^2 (Aslyng og Hansen, 1960). Målerens opbygning er skitseret i figur 2.1. Fordampningsmåleren er nedgravet med overkant 8 cm over jordoverfladen, og vandoverfladen i beholderen holdes omtrent i niveau med jordoverfladen. I måleren er 4 cm under dens overkant anbragt et trådnæt med 5 mm kvadratiske masker. Det er tilstræbt at holde et areal omkring måleren med kortklippet græs. Dette græsareal er på en del stationer blevet vandet. Vandstanden i måleren reguleres ugentligt ved tilsætning eller fjernelse af vand fra beholderen.

Nedbøren måles med en 200 cm^2 Hellmann nedbørmåler. Måleren er placeret i jorden ved siden af fordampningsmåleren med overkant i niveau med denne. Nedbøren måles samtidig med regulering af vandstanden i fordampningsmåleren.

Den ugentlige fordampning beregnes således:

$$E_H = k(P + D) \quad (2.15)$$

hvor E_H er potentiel fordampning (mm),

P er nedbør (mm),

D er tilsat (fjernet) vandmængde til (fra) fordampningsmåleren (mm),

k er en månedsafhængig konstant.

Aslyng og Stendal (1965) sammenlignede målinger med HL315 med fordampningen fra et vejebart lysimeter med kort græs, og fandt de korrektionsfaktorer (k), der er vist i tabel 2.1.

Tabel 2.1: Månedsafhængige faktorer k til korrektion af fordampning målt med HL315 (Aslyng og Stendal, 1965).

Måned	k
April	1.2
Maj	1.3
Juni	1.3
Juli	1.4
August	1.3
September	1.2
Oktober	1.0
November	0.7

Data fra fordampningsstationerne indrapporteres hver uge til Afdeling for Jordbrugsmeteorologi, som kvalitetskontrollerer data og lagrer disse i en database. Endvidere sendes data til Landskontoret for Planteavl, og data bruges som grundlag for oversigter over fordampningsforholdene, som bl.a. bringes i jordbrugets fagpresse og i Tekst-TV.

Kristensen (1971, 1979) sammenlignede HL315-fordampningen (E_H) med fordampningen fra vejebare lysimetre (E_l) med kortklippet græs ved Højbakkegård. Der var nogen afvigelse mellem de to metoder til måling af fordampning. Dette skyldes især to forhold. Den store vandmængde i fordampningsbeholderen har en varmekapacitet, som afviger væsentligt fra den omgivende jords varmekapacitet. Dette giver mindre målt fordampning i perioder med opvarming, og større fordampning i perioder med afkøling. Endvidere bevirker det tætte trådnæt en modstand mod fordampning, således at fordampningen reduceres i forhold til en fri vandoverflade. Der er delvis taget højde for disse to forhold i anvendelsen af månedsafhængige korrektionsfaktorer. Fejlkilderne vil dog bevirke en ret betydelig spredning på forskellen mellem HL315-fordampningen og den faktiske potentielle fordampning.

Kristensen (1979) foreslog anvendelse af en fordampningsmåler ifyldt groft sand til ca. 5 cm under vandniveau og med et skærptrådnæt med større maskevidde. En sådan fordampningsmåler gav i undersøgelsen på Højbakkegård gode resultater. Denne udformning af fordampningsmåleren har dog ikke været anvendt i større omfang i Danmark.

3 Datamateriale

I Danmark er der kun på to lokaliteter udført rutinemæssige klimamålinger over en længere årrække, som muliggør beregningsmæssig bestemmelse efter alle de metoder, som er beskrevet i afsnit 2. De to målesteder er klimastationer ved Højbakkegård ($55^{\circ}40'N, 12^{\circ}18'E$) og ved Foulum ($56^{\circ}30'N, 9^{\circ}34'E$). Data fra disse stationer er i afsnit 5 benyttet i sammenligningen af metoder til beregningen af den potentielle fordampning.

3.1 Højbakkegård

Klimamålingerne på Landbohøjskolens forsøgsareal ved Højbakkegård begyndte i 1950'erne og er fortsat op til nutiden med et omfattende måleprogram. Til nærværende undersøgelse er anvendt data fra perioden 1967 til 1986 i hvilket tidsrum der kun forekommer tre udfald af kortere varighed. Instrumenteringen er beskrevet af Aslyng (1965), Jensen og Aslyng (1966), Mogensen (1970) samt Hansen et al. (1981). Som supplement til klimamålingerne anvendes også fordampningen estimeret fra vejebare lysimetre, jf. Kristensen (1979).

Temperatur og luftfugtighed er målt i 2 m højde i vejrhytte. Globalstråling er målt med solarimetre fra Kipp & Zonen. Nettostråling er målt med radiometer placeret over kort græs. Jordvarmeffluks er målt i 3 cm dybde under kort græs. Vindhastighed er målt i 2 m og 12 m højde. Klimamålingerne udføres som 10-minutters observationer, som efter behov integreres til timeværdier eller, som i det aktuelle tilfælde, døgnværdier.

Ved klimamålinger - især strålingsmålinger - der anvendes i forbindelse med fordampningsestimater, er det af største vigtighed, at referenceoverfladen, som efter standarden er en grøn, kortklippet græsafgrøde i vækst, holdes i optimal stand. Dette indebærer, at afgrøden skal være optimalt forsynet med vand, hvilket er foregået ved vanding på Højbakkegård siden 1971. Referenceoverfladen kan i almindelighed ikke opretholdes under disse betingelser i perioden november til ind i april, idet græsset da ikke er i vækst. Tidligere er der ofte set bort fra dette problem, som syntes at have ringe praktisk interesse, fordi vintermånederne tilsammen altid udviser et betydeligt nedbøroverskud. I forbindelse med ændret dykningspraksis og fremkomsten af miljøspørgsmål er det nu mere væsentligt at få en god bestemmelse af potentiel fordampning udenfor den egentlige vækstsæson.

3.2 Foulum

Forsøgsarealet ved Afdeling for Jordbrugsmeteorologi på Foulum er anlagt i 1985 og har fungeret med fuldt måleprogram siden maj 1986. Stationen er mere detaljeret beskrevet af

Olesen (1987). I denne undersøgelse er anvendt data fra perioden 1987 til 1990. Som ved Højbakkegård er klimadataene målt over en referenceoverflade bestående af kortklippet græs, som holdes optimalt forsynet med vand.

Målepraksis ved Foulum er den samme som overfor beskrevet for Højbakkegård, dvs. 10 minutters observationer, som integreres til døgnværdier til brug for analysen.

3.3 IHD stationer

I forbindelse med den Internationale Hydrologiske Dekade blev der blandt andet gennemført målinger af fordampning i to afstrømningsoplande, Karup Å i Jylland og Stevns på Sjælland. Fordampning er målt med HL315 fordampningsmålere på 6 lokaliteter i hvert område (Stendal, 1978a,b). På en hovedstation i hvert område var desuden opstillet meteorologisk måleudstyr til måling af bl.a. strålingsforhold over kortklippet græs. Da græsset ikke blev vandet på disse stationer, er målingerne af nettostråling dog af ringe værdi til beregning af potentiel fordampning efter Penman (Aslyng og Hansen, 1982). Figur 3.1 viser placeringen af stationerne i de to oplande.

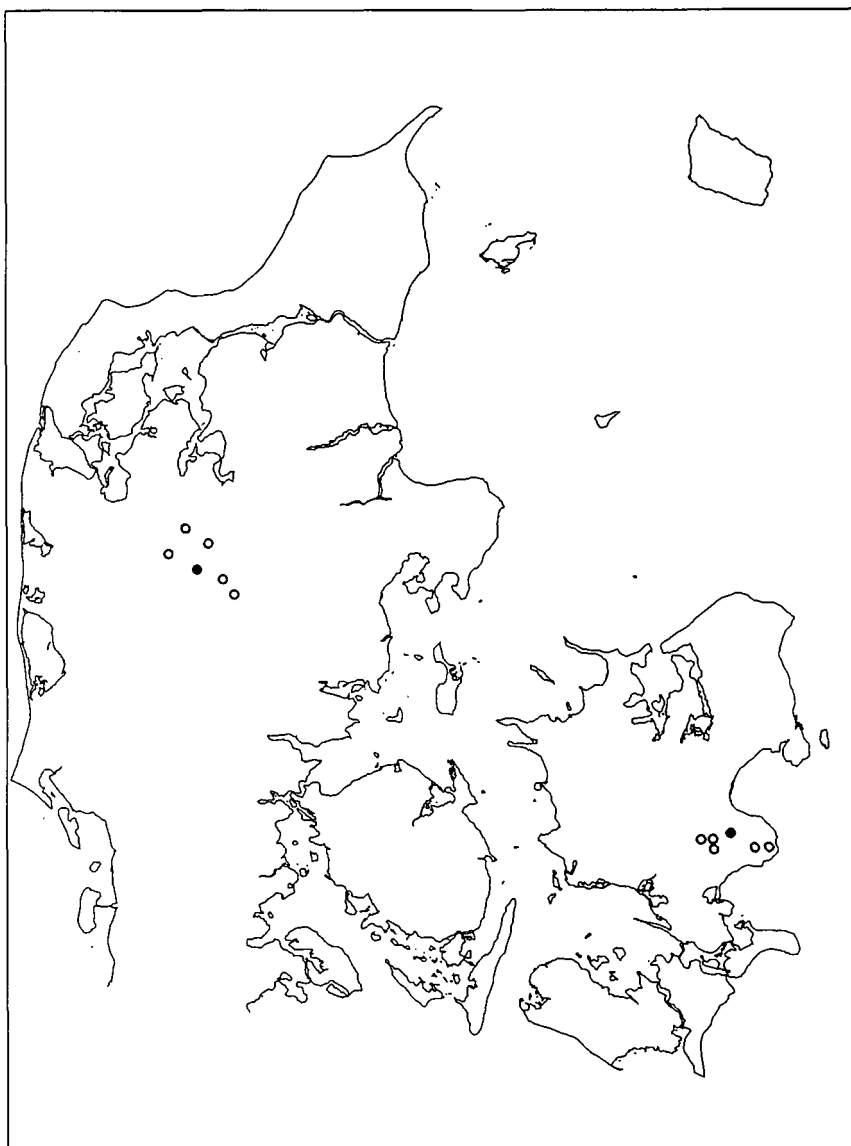
3.4 Statens forsøgsstationer

Ved seks af statens forsøgsstationer er der foretaget målinger med HL315 samt målinger af solskinstimer uafbrudt siden 1961. Disse data er gennemgående af høj kvalitet. Stationernes placering er vist i figur 3.2. Antallet af solskinstimer kan anvendes til en beregning af globalstrålingen (Olesen, 1990), og på baggrund heraf kan potentiel fordampning beregnes efter Makkink. I afsnit 5 sammenholdes den beregnede potentielle fordampning med HL315-målingen.

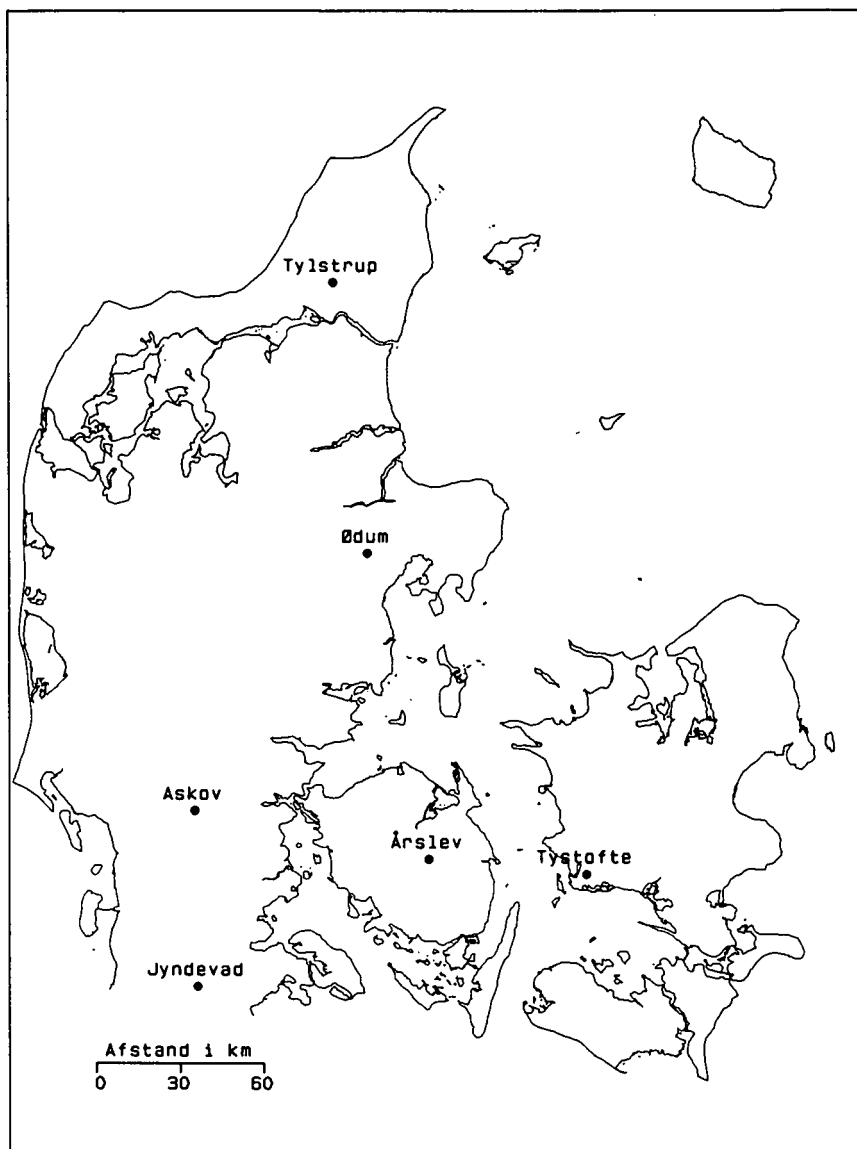
3.5 Fordampningsmålenet

Direkte målinger af vandfordampning med HL315 er foretaget ved en række andre lokaliteter siden 1956 og har været det væsentligste element i den danske klimatologi for potentiel fordampning. Næsten alle statens forsøgsstationer er eller har været udstyret med en fordampningsmåler. Stationernes placering er vist i figur 3.3, og i tabel 4.1 og 4.2 er givet oversigter over funktionsperioden for de enkelte stationer.

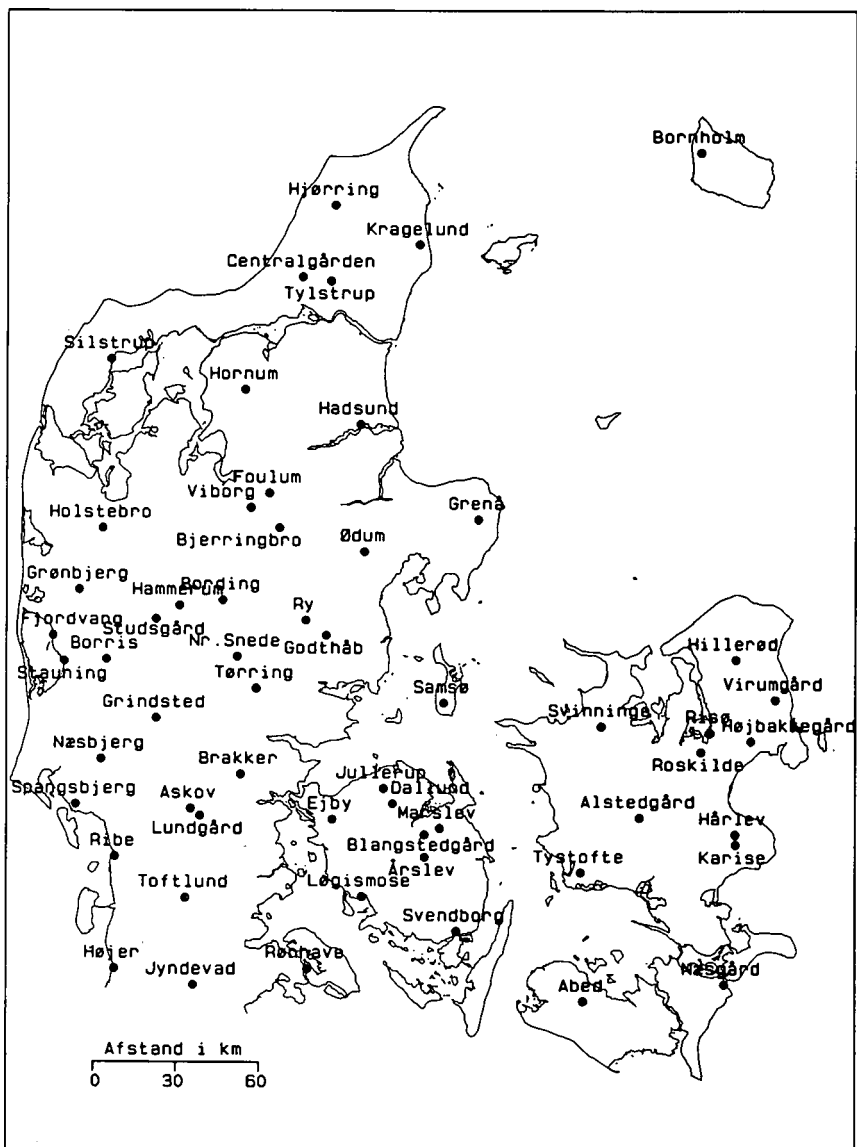
Målingen, som er beskrevet i afsnit 2, udføres på de fleste lokaliteter en gang om ugen og bør foretages på et frit sted i marklignende omgivelser omgivet af en velvandet standardoverflade i lighed med den ovenfor beskrevne. Inspektioner foretaget på stationerne har imidlertid afsløret, at disse betingelser kun er opfyldt på et mindretal af målestederne. En del målesteder er således anbragt i haver o. lign., andre er ikke omgivet af græs (enkelte er endog beliggende umiddelbart op til vejanlæg, gårdspladser eller andre helt ubevoksede arealer). På de fleste målesteder gælder endvidere, at omgivelserne efterlades uvandede gennem hele vækstsæsonen eller dele heraf. Endelig lader pasningen af målerne en del



Figur 3.1: Placering af fordampningsmålere i Karup og Stevns områderne under IHD. De fyldte cirkler angiver hovedstationer.



Figur 3.2: Forsøgsstationer med soltmemålinger og måling af potentiel fordampning med HL315.



Figur 3.3: Placering af fordampningsmålestationer.

tilbage at ønske. Således findes der ofte alger i vandet, ituslåede måleglas eller beskadigede afdækningsnet. Data fra det nuværende fordampningsnet fremkommer således under ganske uensartede betingelser.

Data fra stationerne findes lagret i en database ved Afdeling for Jordbrugsmeteorologi, som omfatter alle målinger siden de regelmæssige målingers start i 1957. Endvidere er månedsværdier fra stationerne publiceret af Aslyng og Hansen (1960), Aslyng og Stendal (1965), Statens Forsøgsvirksomhed i Plantekultur (1964-71), Gregersen (1972-86), Thomsen (1987) og Olesen (1988,1989,1990).

4 Målinger med HL315

Fordampningsmåleren af typen HL315 har primært været anvendt i det landsdækkende målenet, som er beskrevet i afsnit 3.5. Måleren har dog også været anvendt i enkelte andre undersøgelser, hvoraf nogle vil blive omtalt i dette afsnit, hvor kvaliteten af målingerne med HL315 vil blive vurderet.

4.1 IHD stationer

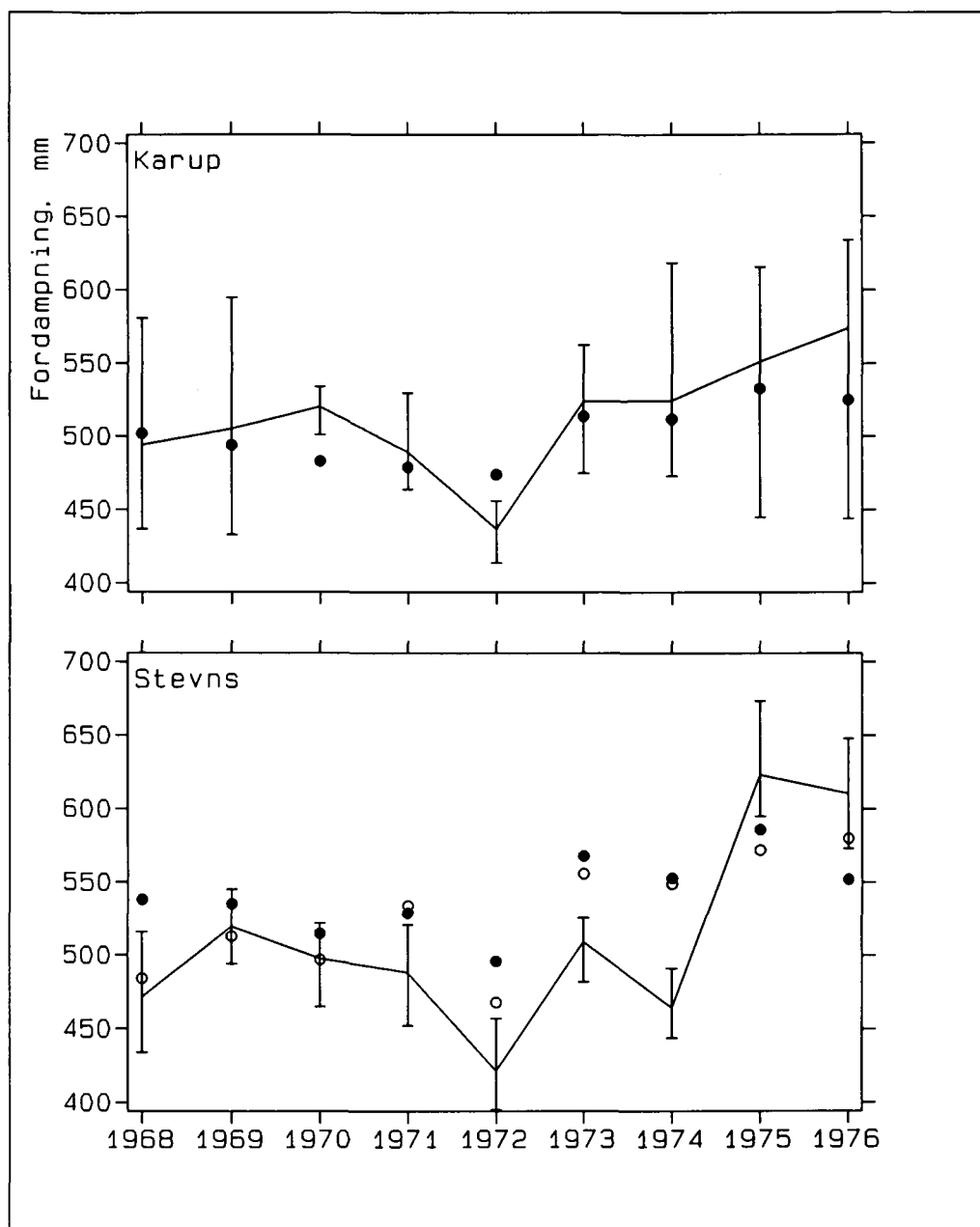
Figur 4.1 viser variationen i årlig målt fordampning med HL315 mellem seks stationer i hvert af afstrømningsoplandene i IHD-undersøgelsen. Den største variation fås i de målte fordampninger i Karup området. Dette skyldes dels, at dette område er lidt større end Stevns området, dels at en station (Vistorp) var placeret i et engareal. Denne placering har forhindret en oase effekt ved Vistorp, men ikke ved de øvrige stationer (Aslyng og Hansen, 1982). Variationen mellem stationer i Karup området er derfor størst i tørre år, f. eks. 1975 og 1976.

Der er en god overensstemmelse mellem Makkink-fordampningen og den målte fordampning med HL315 i Karup-området. I Stevns området er Makkink-fordampningen generelt lidt større end HL315-fordampningen. Derimod er der her en rimelig sammenhæng mellem HL315-fordampningen og Penman-fordampningen ved Højbakkegård. Undtagelser herfra er de tørre år i 1975 og 1976, hvor oaseeffekten formentlig har betydet en urealistisk høj fordampning fra HL315.

4.2 Landsdækkende stationsnet

Tabel 4.1 og 4.2 giver en oversigt over stationerne i det landsdækkende net af fordampningsmålestationer med HL315. Stationernes placering, læforhold og funktionsperiode er vist. Endvidere er stationernes relative fordampning beregnet ved for hvert år i funktionsperioden at udregne forholdet mellem stationens fordampning i perioden 1/4-31/10 og landsgennemsnittet for samme periode. Den relative fordampning er opgjort i procent af landsgennemsnittet. Der er herefter beregnet middelværdi og spredning af denne relative fordampning. Tabellerne viser kun spredningen for stationer, som har fungeret i mere end 10 år.

Figur 4.2 viser et kort med den relative fordampning indtegnet for stationer med mere end 10 års funktionsperiode. Der synes at være tendens til større fordampning i Vestjylland og på Sjælland, og mindre fordampning i det centrale og østlige Jylland og på Fyn. Der er dog flere undtagelser herfra. Disse målinger giver således ikke et entydigt billede af



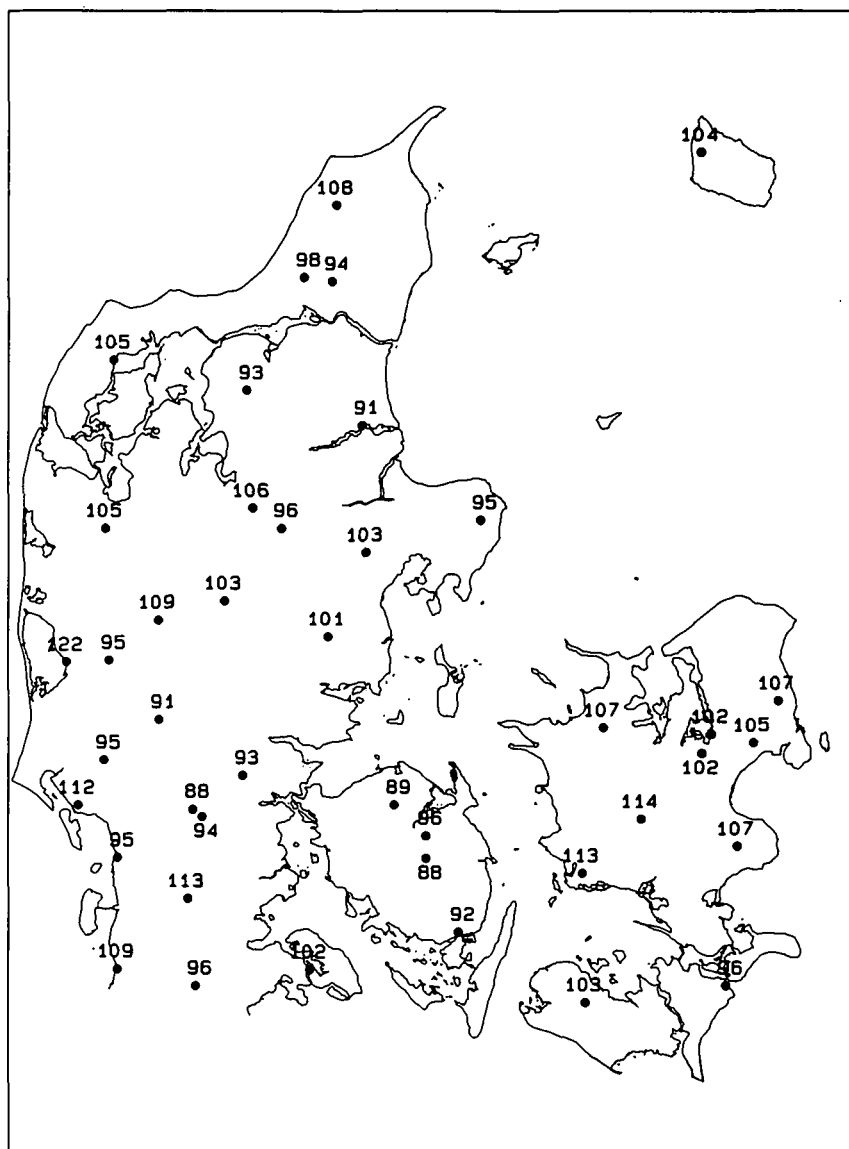
Figur 4.1: Årlig fordampning for perioden april til oktober i IHD undersøgelsesområder. Linjerne viser middel, minimum og maksimum af fordampning målt med HL315 på seks stationer i hvert område. Endvidere er vist Makink-fordampning (●) beregnet med klimadata fra hovedstationen i hvert område samt Penman-fordampning (○) beregnet med data fra Højbakkegård.

Tabel 4.1: Fordampningsmålestationer med HL315 i Jylland. For hver station er angivet middelværdi og spredning på årlig relativ fordampning som procent af landsgennemsnittet for perioden april til oktober.

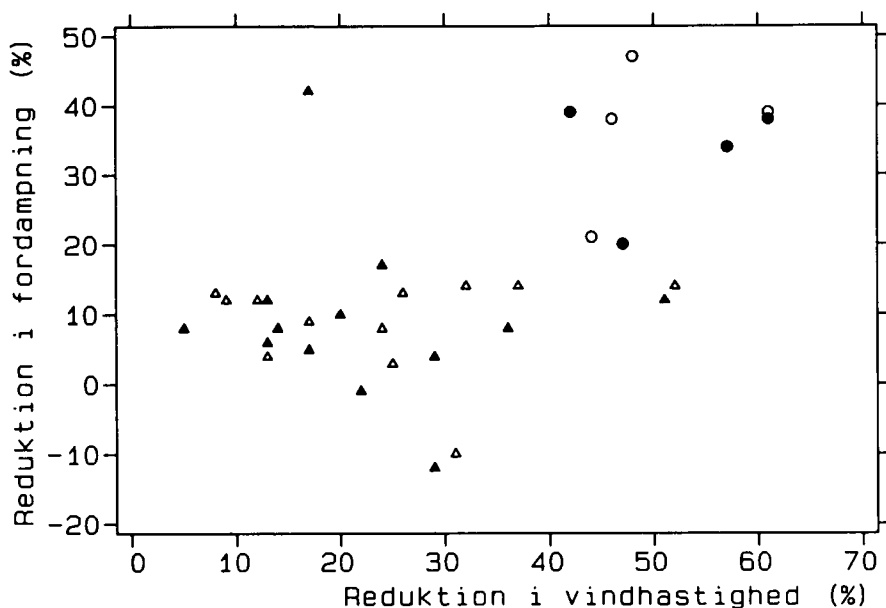
Station	Placering		Læ	Periode	Relativ fordampning (%)		
	Bredde	Længde			Antal år	Middel	Spredning
Hjørring	57°26'N	9°59'E	middel	1979-	12	108	8.0
Silstrup	56°56'N	8°39'E	ringe	1963-	28	105	8.8
Tylstrup	57°11'N	9°57'E	meget	1956-	34	94	8.8
Hornum	56°50'N	9°26'E	meget	1956-	34	93	11.5
Centralgården	57°12'N	9°47'E		1956-1970	14	98	7.2
Hadsund	56°43'N	10° 7'E	middel	1979-	11	91	4.8
Kragelund	57°18'N	10°29'E	meget	1983-	8	96	
Ødum	56°18'N	10° 8'E	middel	1956-	34	103	7.3
Bjerringbro	56°23'N	9°38'E	middel	1964-	24	96	8.5
Godthåb	56° 2'N	9°54'E	middel	1966-	24	101	11.7
Grenå	56°24'N	10°48'E	middel	1964-	27	95	8.0
Foulum	56°29'N	9°34'E	middel	1984-	7	112	
Samsø	55°48'N	10°34'E		1988-	3	94	
Holstebro	56°23'N	8°36'E	middel	1979-	12	105	5.0
Viborg	56°27'N	9°28'E	ringe	1965-	23	106	13.3
Studsgård	56° 6'N	8°56'E	middel	1956-1988	32	109	11.4
Grindsted	55°46'N	8°55'E	middel	1964-	26	91	8.2
Bording	56° 9'N	9°18'E	meget	1968-1987	20	103	12.0
Brakker	55°35'N	9°24'E	middel	1966-	25	93	4.1
Askov	55°28'N	9° 7'E	meget	1956-	34	88	8.1
Lundgård	55°27'N	9°10'E	ringe	1958-	32	94	8.3
Næsbjerg	55°38'N	8°36'E	ringe	1979-	12	95	5.6
Nr.Sned	55°58'N	9°23'E	ringe	1979-1987	9	109	
Tørring	55°52'N	9°29'E	meget	1988-	3	89	
Borris	55°57'N	8°38'E	middel	1956-	34	95	7.3
Stauning	55°57'N	8°23'E		1964-1978	15	122	10.7
Spangsbjerg	55°30'N	8°28'E		1956-1973	17	112	10.9
Ribe	55°19'N	8°41'E		1958-1977	20	95	8.9
Fjordvang	56°02'N	8°18'E		1958-1963	5	110	
Grønbjerg	56°11'N	8°28'E	meget	1989-	2	83	
Hammerum	56° 8'N	9° 3'E	middel	1989-	1	97	
Toftlund	55°11'N	9° 5'E	middel	1979-	11	113	9.4
Højer	54°57'N	8°41'E	ringe	1956-1987	31	109	8.8
Jyndevad	54°54'N	9° 8'E	middel	1956-	34	96	8.4
Rønhave	54°57'N	9°46'E	ringe	1956-	34	102	7.4

Tabel 4.2: Fordampningsmålestationer med HL315 på Øerne. For hver station er angivet middelværdi og spredning på årlig relativ fordampning som procent af landsgennemsnittet for perioden april til oktober.

Station	Placering		Læ	Periode	Relativ fordampning (%)		
	Bredde	Længde			Antal år	Middel	Spredning
Dallund	55°29'N	10°16'E		1966-1976	11	89	5.2
Blangstedgård	55°23'N	10°27'E		1956-1983	27	96	6.6
Årslev	55°18'N	10°27'E	middel	1956-	34	88	5.5
Svendborg	55° 4'N	10°37'E	meget	1965-1987	23	92	16.8
Marslev	55°24'N	10°32'E		1968-1970	2	106	
Løgismose	55°11'N	10° 5'E		1968-1970	2	81	
Jullerup	55°32'N	10°13'E	meget	1984-1987	4	74	
Ejby	55°26'N	9°55'E		1988-	3	95	
Tystofte	55°15'N	11°20'E	middel	1956-	34	113	8.8
Svinninge	55°43'N	11°29'E	meget	1965-	24	107	8.9
Risø	55°41'N	12° 6'E		1964-1981	18	102	6.8
Højbakkegård	55°39'N	12°20'E	ringe	1956-	34	105	6.6
Roskilde	55°37'N	12° 3'E	middel	1969-	21	102	6.8
Hårlev	55°21'N	12°13'E		1968-1976	9	101	
Virumgård	55°47'N	12°29'E		1956-1968	12	107	6.2
Hillerød	55°55'N	12°16'E	middel	1979-1988	9	101	
Karise	55°19'N	12°13'E	middel	1980-	11	107	7.6
Abed	54°50'N	11°20'E	ringe	1956-	34	103	9.1
Næsgård	54°52'N	12° 7'E	meget	1966-	25	96	13.6
Alstedgård	55°25'N	11°41'E	ringe	1981-	10	114	7.2
Bornholm	55°11'N	14°45'E		1956-	34	104	14.3



Figur 4.2: Gennemsnitlig relativ fordampning i procent af landsgennemsnittet for perioden april til oktober for stationer med mere end 10 års funktionstid. Data fra 1957-90.

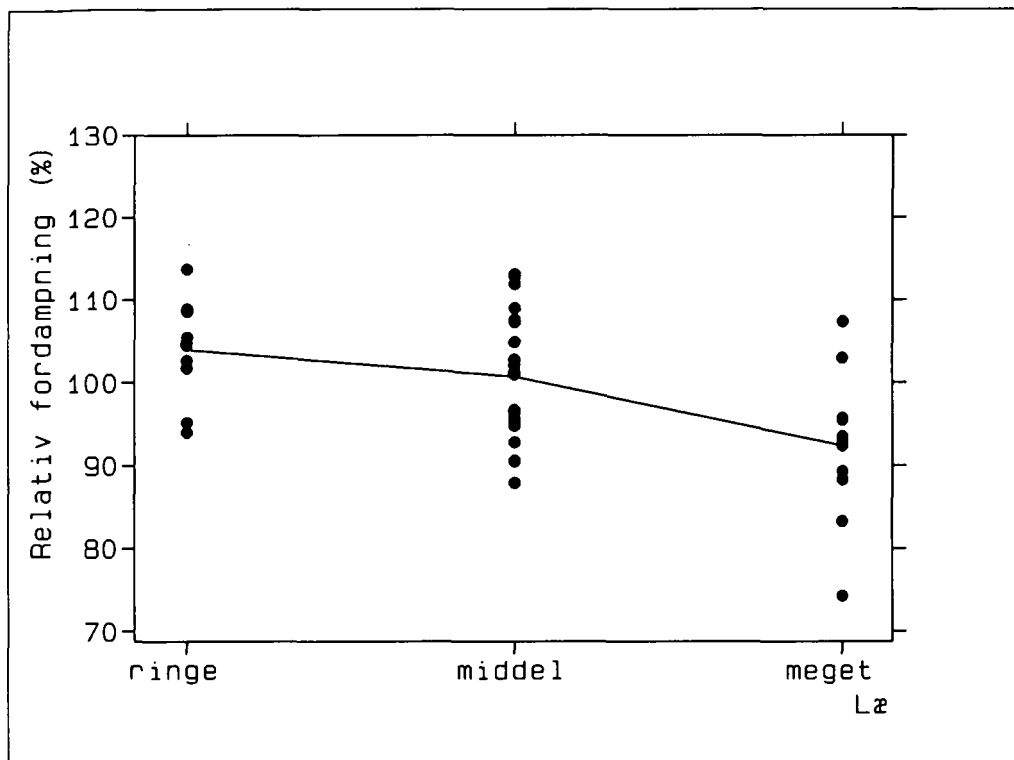


Figur 4.3: Reduktion i fordampning fra HL315 ved placering under forskellige læforhold på statens forsøgsstationer i perioden 1/4 til 30/11. Cirkler angiver placering i have eller frugtplantage, og trekanter angiver placering under markforhold. Fyldte symboler angiver årene 1958-59 og åbne symboler 1960-63. Data fra Aslyng og Hansen (1960) og Aslyng og Stendal (1965).

den regionale variation i fordampningen i Danmark. Der er flere årsager til dette, bl.a. betydnngen af stationernes læforhold og vandingspraksis for den målte fordampning.

Aslyng og Hansen (1960) og Aslyng og Stendal (1965) undersøgte betydningen af læforhold for fordampningsmåling med HL315. Der var ved en række af statens forsøgsstationer opstillet fordampningsmålere under forskellige læforhold. Middel vindhastighed i 2 m højde blev målt på de samme steder. Figur 4.3 viser et sammendrag af disse resultater. Placering under bedre læforhold i marken har i de fleste tilfælde reduceret fordampningen med ca. 10 %, mens placering i frugtplantage eller have giver en større reduktion. En undtagelse herfra er Hornum 1958-59 med en fordampningsreduktion på 42 %, hvor måleren under gode læforhold var anbragt på et areal med korn. Læforholdene ved jordoverfladen har derfor været bedre end vindmålingen i 2 m højde giver udtryk for. Tilsvarende må for havernes vedkommende skønnes, at læforholdene ved jordoverfladen ofte er bedre end det, som vindmålingen antyder.

I tabel 4.1 og 4.2 er der for en del af stationerne i det landsdækkende net foretaget en opdeling af stationerne med hensyn til læforhold omkring fordampningsmåleren. Der benyttes tre lægrupper: ringe, middel og meget. Opdelingen i læforhold er skønnet ud



Figur 4.4: Gennemsnitlig relativ fordampning ved stationer i procent af landsgennemsnit for fordampning i perioden april til oktober opdelt efter skønnede læforhold på stationerne. Punkterne angiver middelværdierne for de enkelte stationer, og linjen angiver middel for hver lægruppe.

fra optegnelser af afstand til læhegn, træer, bygninger m.v.

I figur 4.4 er den gennemsnitlige relative fordampning i procent af landsgennemsnittet ved en række stationer opdelt efter lægruppe. Middelværdierne for de tre lægrupper er henholdsvis 104, 101 og 92 % af landsgennemsnittet. Her opnås også en reduktion på ca. 10 % ved placering under gode læforhold. Der synes at være den største variation i fordampningen for stationer med meget læ, hvilket kan skyldes at læets udformning har stor betydning.

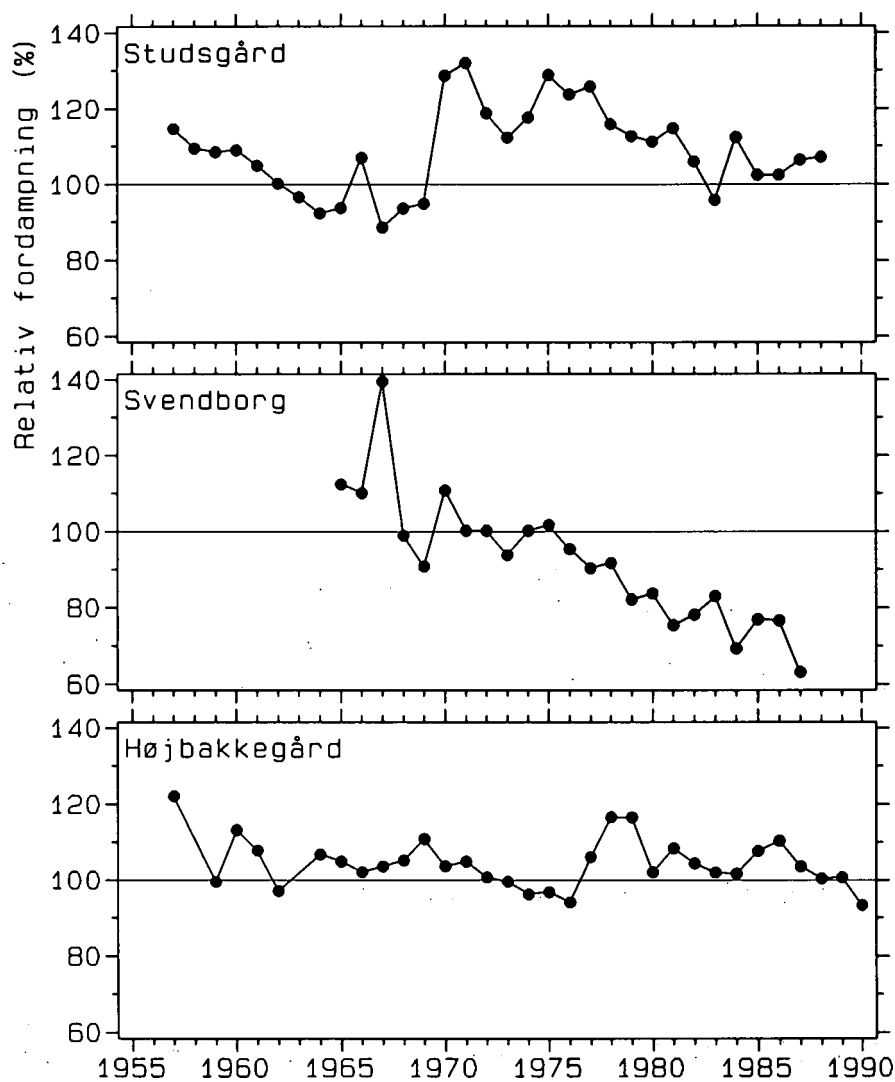
Figur 4.5 viser den tidslige udvikling i relativ fordampning ved tre stationer. Ved Højbakkegård synes niveauet ikke at ændre sig i tiden. Den største ændring finder sted ved Svendborg, hvor vækst af læhegn og byudvikling har bevirket, at stationen fra at ligge relativt åbent til sidst havde så gode læforhold, at fordampningen lå 30 % under landsgennemsnittet. Stationen i Svendborg blev nedlagt i 1988 som følge af læforholdene. Også ved Studsgård har vækst af læhegn formentlig påvirket målingerne. Der synes dog her at være et spring på ca. 20 % i niveauet i 1970. Stationen har dog ikke været flyttet, og der kan ikke umiddelbart gives en forklaring på niveauforskudningen.

Arealet omkring fordampningsmåleren ved Højbakkegård har været systematisk vandet siden 1971 (Mogensen og Hansen, 1979). Dette er ikke tilfældet ved en række af de øvrige stationer. Når der ikke vandes omkring fordampningsmåleren, kan fordampningen fra HL315 som følge af advektion forventes at være højere i tørre perioder, hvor fordampningen fra det omliggende areal er reduceret. Dette er illustreret i figur 4.6, hvor forskellen mellem fordampning ved Højbakkegård og to stationer på Sjælland uden vanding er afbildet mod nedbør i maj til august. Det ses, at disse stationer har højere fordampning end Højbakkegård i tørre år. Denne oaseeffekt er dog mest udtalt ved Tystofte, hvor den i tørre år udgør mere end 100 mm.

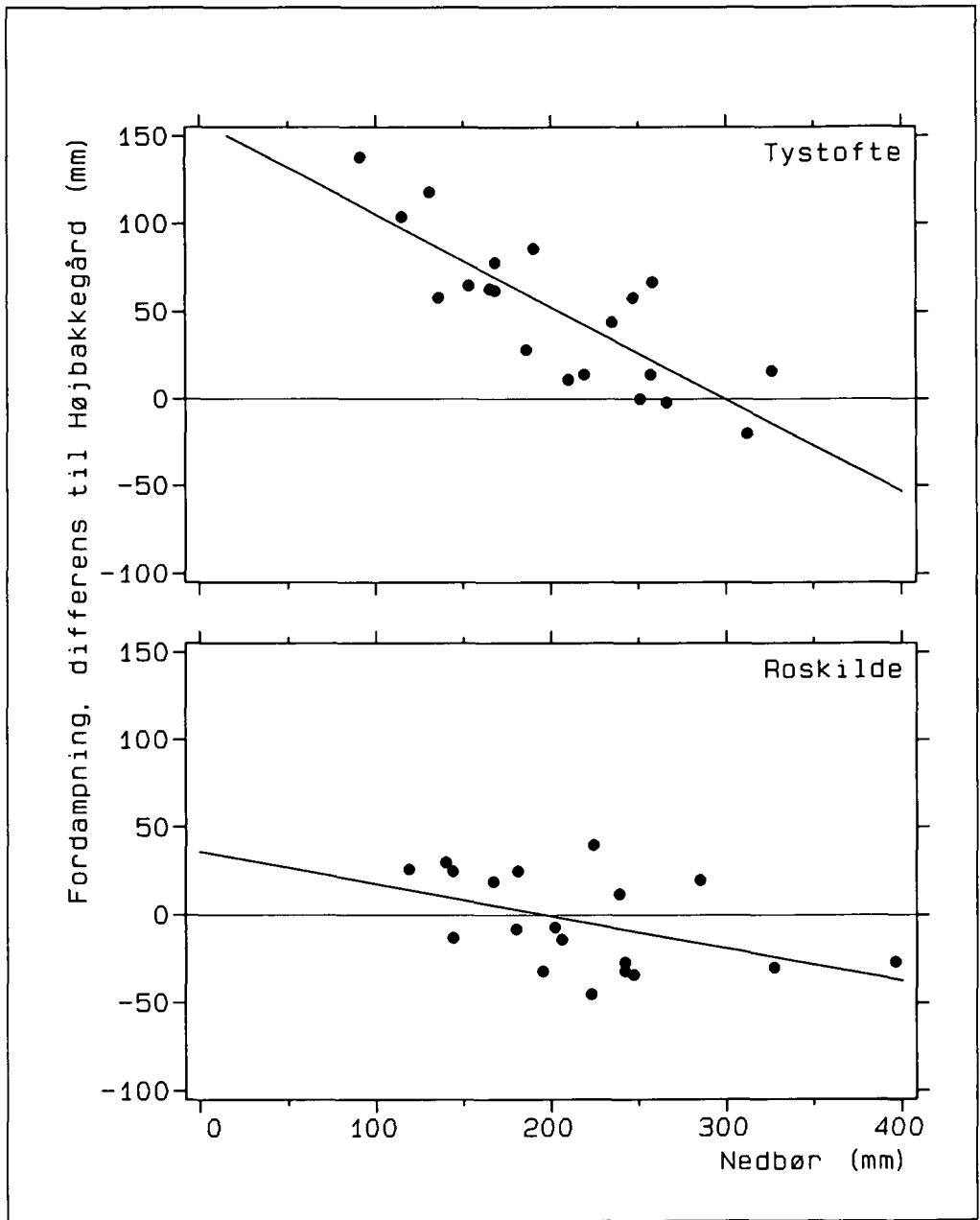
Oaseeffekten er også illustreret i figur 4.7 og 4.8 for alle stationer i henholdsvis tre tørre og tre våde år. For de tørre år er der en tendens til faldende fordampning med stigende nedbørmængde ved stationerne. En tilsvarende tendens findes ikke for de våde år. I tørre år ligger fordampningen ved Højbakkegård, hvor der vandes systematisk, under regressionslinjen, mens den i våde år (hvor vanding af de omliggende arealer kun har ringe betydning) ligger over. Figur 4.7 antyder, at oaseeffekten i tørre år udgør mellem 50 og 100 mm. Den faldende tendens i figur 4.7 kan også delvis skyldes forskelle mellem landsdele i klimaforhold, som er korreleret med nedbørmængden. Det er dog sandsynligt at størsteparten af stigningen i fordampning ved lave nedbørmængder skyldes oaseeffekten.

Figur 4.9 viser en større spredning på fordampningen mellem stationer i tørre år. Dette kan dog skyldes, at fordampningsniveauet generelt er højere i disse år. Der er således ikke en tilsvarende tendens i variationskoefficienten.

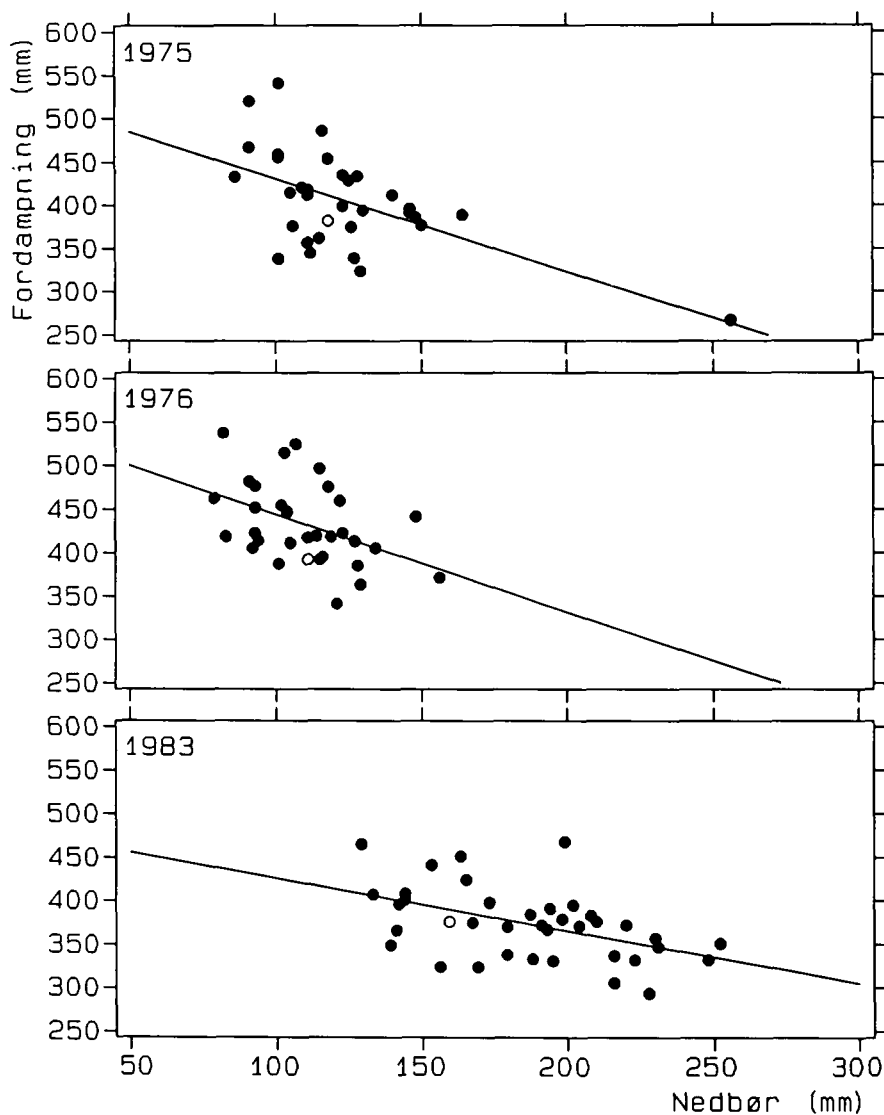
Betydningen af læforhold og oaseeffekt for fordampning målt med HL315 må på denne baggrund skønnes at være af samme størrelse, og hver at kunne udgøre op mod 10 % af fordampningen. En stor del af den variation, der er vist i figur 4.9 kan derfor tilskrives



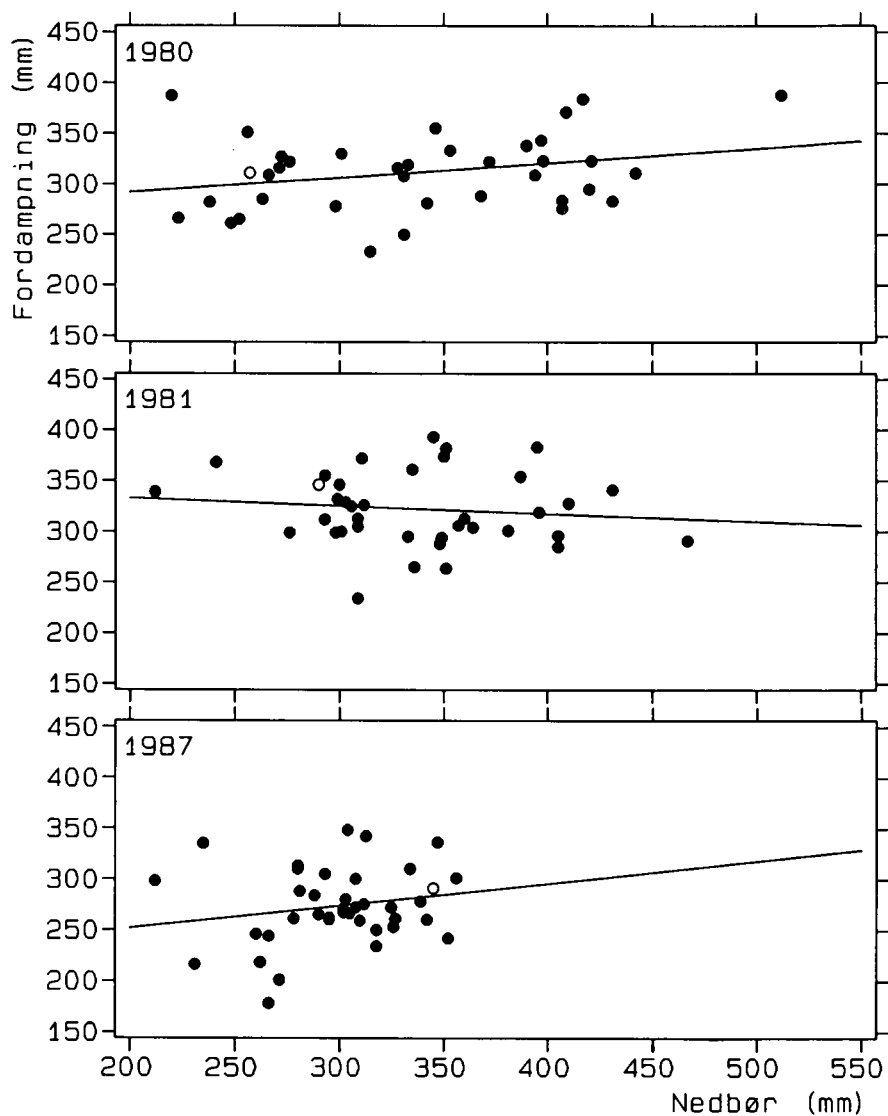
Figur 4.5: Årlig relativ fordampning ved Studsgård, Svendborg og Højbakkegård i perioden april til oktober i procent af landsgennemsnittet for samme periode.



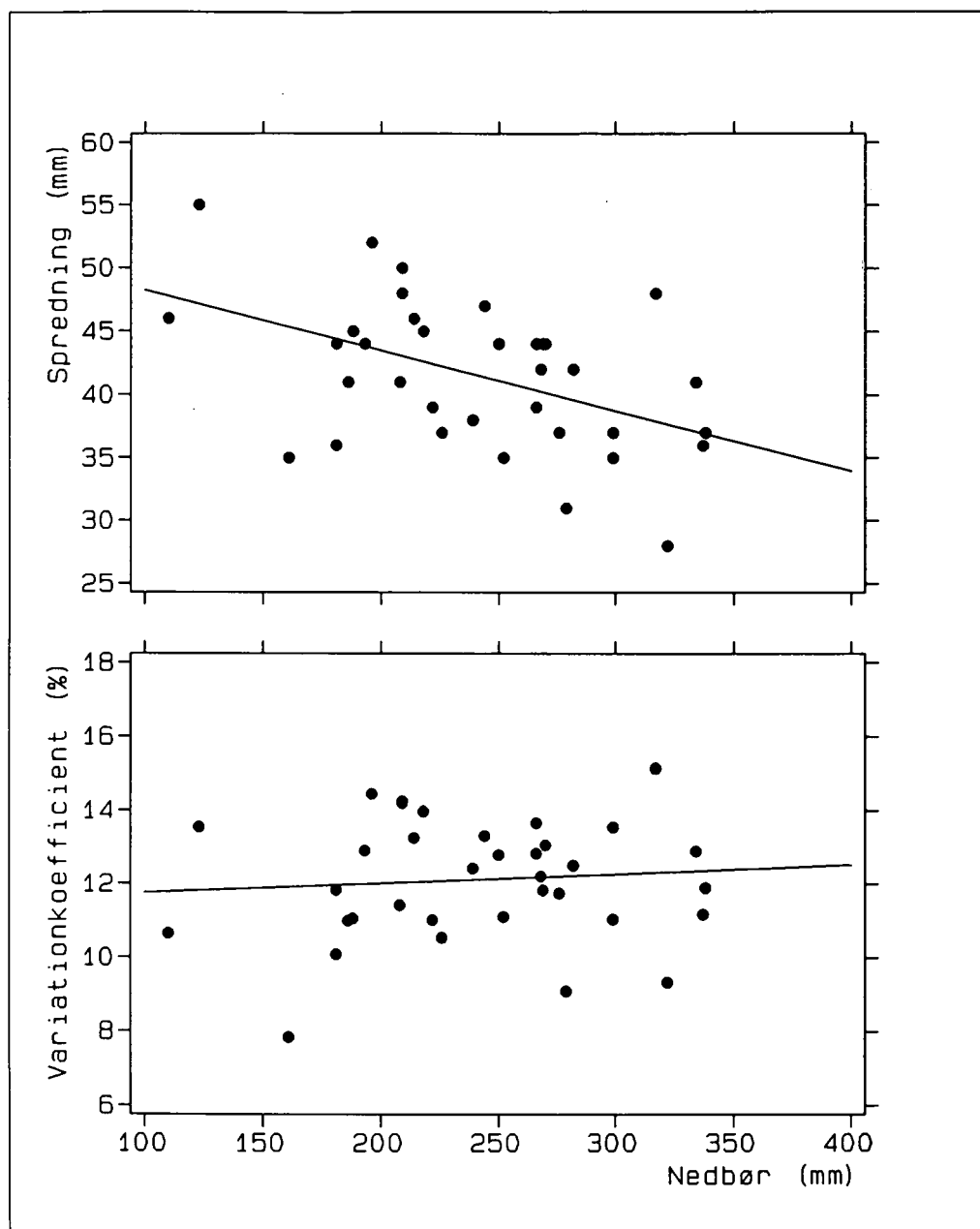
Figur 4.6: Fordampning målt med HL315 ved Tystofte og Roskilde minus fordampning målt med HL315 ved Højbakkegård for månederne maj til august mod nedbør i de samme måneder. Regressionslinje indlagt. Data fra 1971-1990.



Figur 4.7: Fordampning i maj til august i tre tørre år mod nedbør i samme periode for alle stationer med HL315. Højbakkegård er markeret med (o), de øvrige stationer med (•). Regressionslinje indlagt.



Figur 4.8: Fordampning i maj til august i tre våde år mod nedbør i samme periode for alle stationer med HL315. Højbakkegård er markeret med (o), de øvrige stationer med (•). Regressionslinje indlagt.



Figur 4.9: Spredning og variationskoefficient i fordampning i maj til august for hvert år i perioden 1957-1990 mod nedbør i de samme måneder.

disse effekter, snarere end reelle forskelle i fordampningen mellem forskellige egne i landet.

Foruden læ- og oaseeffekt er også andre mere tilfældige fejlkilder forbundet med målingerne på fordampningsstationerne. Disse skyldes hovedsageligt observationspraksis. Der er således konstateret problemer med urene nedbørmålere, forkert placeret opsamlingsflaske i nedbørmåler, huller i eller manglende net over fordampningsmåleren, algevækst i fordampningsmålere m.v. Data fra fordampningsnettet bliver dog i forbindelse med dataindsamlingen hver uge kvalitetskontrolleret, hvilket fjerner de fleste grove fejl.

Der findes ikke systematiske opgørelser af læforhold og vandingspraksis ved fordampningsstationerne. Det er derfor ikke muligt at korrigere de indsamlede data for oaseeffekt og læforhold.

5 Sammenligning af metoder

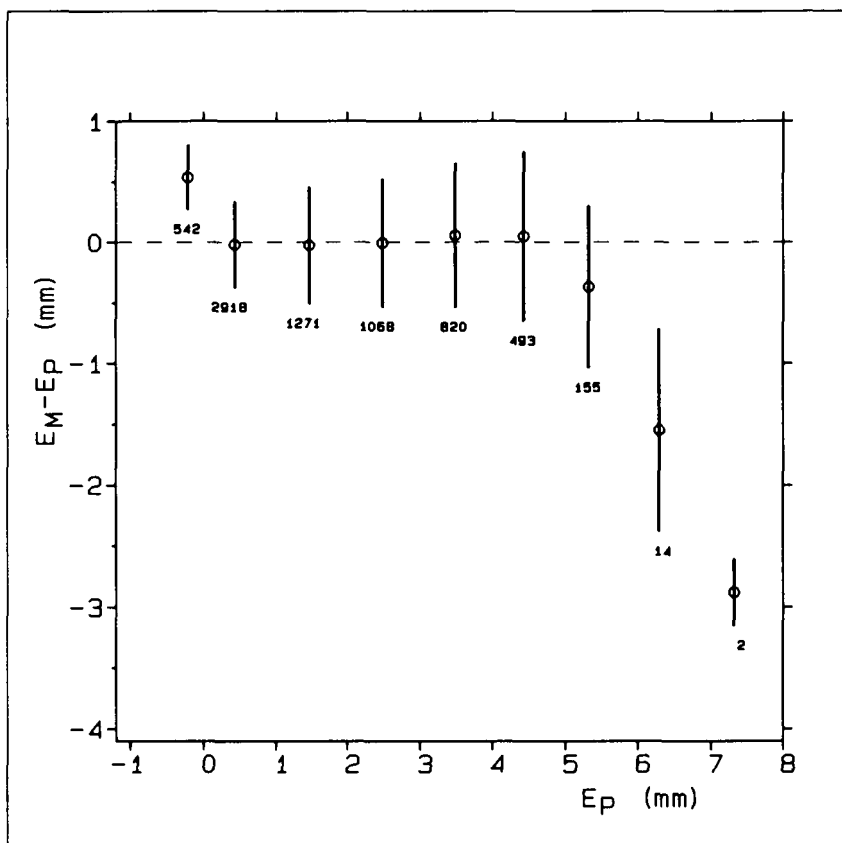
Efter en analyse af dataserier fra forskelligt indrettede HL315-målere, lysimetre og beregnet Penman fordampning konkluderede Kristensen (1979), at potentiel fordampning under danske forhold med rimelig nøjagtighed kan estimeres med såvel Penmans metode som med HL315-målere. Som forudsætning for anvendelsen af HL315 anfører Kristensen dog, at afdækningsnettet ikke må forhindre ventilationen i at nå vandoverfladen, samt at konvektion i vandet må forhindres, f. eks. ved en delvis sandopfyldning af målekarret. Som nævnt i indledningen er formålet med nærværende undersøgelse at udvikle en operationel metode til beregning af potentiel fordampning ud fra de klimamålinger, som rutinemæssigt foretages på de automatiske klimastationer. Da disse ikke omfatter nettostrålingsmålinger, må metoden baseres på enten globalstrålingsmålingen eller en nettostråling modelleret ud fra de målte klimadata.

Med baggrund i Kristensens (1979) konklusion og det senere arbejde af Hansen et al. (1981) antages den potentielle fordampning beregnet efter *Penmans metode* (E_P), som *reference* i det videre arbejde. Analysen er hovedsagelig baseret på dataserierne fra Højbakkegård og Foulum, men vil tillige omfatte en sammenligning af beregnet potentiel fordampning og fordampning målt med HL315 ved seks forsøgsstationer.

5.1 Højbakkegård

Daglige værdier for potentiel fordampning efter Penman (E_P) og Makkinks (E_M) metoder er beregnet og differensen $E_M - E_P$ vises mod E_P i figur 5.1. Det bemærkes, at Penman fordampningen giver et betydeligt antal negative fordampningsværdier, som ikke findes, når den potentielle fordampning beregnes efter Makkink. Årsagen er, at nettostrålingen under danske forhold ofte er negativ i vinterperioden. Ved moderate fordampninger ses overensstemmelsen mellem de to metoder at være udmærket, men ved meget høj E_P tabes denne sammenhæng med E_M helt. Betragtet i middel over en længere årrække (1967-86) ses dog af tabel 5.1, at de to estimater er i god overensstemmelse, især i vækstsæsonen. Til sammenligning er i tabellen også vist en Penman beregnet fordampning, hvor alle negative værdier er sat lig 0.

Udtrykket til beregning af E_P (2.8) indeholder to led, hvoraf det første, som udtrykker den potentielle fordampnings afhængighed af strålingsenergi og temperatur, normalt er størst. Det andet led beskriver fordampningens sammenhæng med vindhastighed, mætningsdeficit og temperatur. Disse led er begge fysisk begrundet i fordampningsprocessen. Imidlertid indgår andet led ikke eksplicit i Makkinks ligning (2.14), som derved udelukker medtager stråling og temperatur ved beregningen, mens øvrige faktorer, som påvirker



Figur 5.1: Differensen mellem Makkink og Penman potentiel fordampning ($E_M - E_P$) plottet mod E_P . Længderne af de lodrette linjer angiver standardafvigelsen i $E_M - E_P$. Beregningen er sket på daglig basis, og de anførte tal i figuren angiver antallet af analyserede dage. Identitetslinjen $E_M - E_P = 0$ er indtegnet. Data fra Højbakkegård 1967-86.

Tabel 5.1: Gennemsnitlige månedstotaler for forskellige estimater af potentiel fordampning (mm) ved Højbakkegård 1967-86. I de to kolonner længst til højre findes hhv. middel og standardafvigelse for differensen $E_{pA} - E_P$. Med * angives, at hypotesen $\overline{E_{pA} - E_P} = 0$ accepteres på 1 % signifikansniveau. Med ** angives, at samme hypotese accepteres på 5 % signifikansniveau.

Periode	Penman	Penman > 0	Makkink	Mod. Penman	Middel af	Std. afv. på
	E_P (2.8)	$E_P > 0$ (2.8)	E_M (2.14)	E_{pA} (2.9)	$E_{pA} - E_P$	$E_{pA} - E_P$
Januar	5.7	7.5	5.5	5.1	** -0.6	2.4
Februar	7.2	8.1	11.8	7.4	** 0.2	1.9
Marts	26.7	26.8	29.5	26.9	** 0.2	2.4
April	58.9	58.9	57.7	58.1	** -0.8	2.2
Maj	94.1	94.1	92.9	95.3	** 1.2	3.2
Juni	106.0	106.0	109.2	105.6	** -0.4	4.3
Juli	106.0	106.0	107.2	105.0	** -1.0	3.4
August	88.3	88.3	90.2	89.9	* 1.6	3.2
September	50.1	50.1	50.2	50.2	** 0.1	2.2
Oktober	24.1	24.1	24.1	22.7	-1.4	1.7
November	10.1	10.9	9.3	10.8	** 0.7	2.0
December	5.2	7.2	4.3	5.7	** 0.6	2.8
Apr.-sep.	503.3	503.3	507.4	504.1	** 0.8	2.2
Året	582.3	588.0	591.9	585.3	** 3.0	16.4

fordampningen, er indeholdt i de empiriske konstanter β_{M0} og β_{M1} . Det må forventes, at en stor del af den ret betydelige spredning i figur 5.1 skyldes denne principielle forskel ved beregningen af henholdsvis E_P og E_M . Endvidere kan man formode, at den meget dårlige sammenhæng mellem de to estimater ved meget høje fordampningsintensiteter har samme årsag.

Som bemærket i afsnit 2 kan fordampningsberegningen ikke i Danmark baseres direkte på Penmans metode, da jordvarmeffluks og nettostråling ikke måles rutinemæssigt. Det er imidlertid ønskeligt at anvende en beregningsmetode, som giver en mere fysisk korrekt bestemmelse af den potentielle fordampning end Makkinks metode, og som giver bedre daglige estimater af fordampningen.

Til dette kan anvendes den metode, betegnet "modificeret Penman" (E_{pA}), som er beskrevet i afsnit 2.2. Metoden anvender samme funktion for vind- og fugtighedsafhængighed som Penman og samme strålings- og temperatur funktion som Makkink. Metodens primære formål er at give en forbedret beskrivelse af (især) ekstreme fordampningsforhold i sommerperioden. Ved kalibrering mod Penmans metode er ved multipel lineær regression på data fra Højbakkegård 1967-86 fundet følgende udtryk for de empiriske konstanter i (2.9-2.10):

$$\beta_{A0} = 0.114 - 0.0659 \cos(\omega) + 0.0451 \sin(\omega) - 0.0851 \cos(2\omega) - 0.0031 \sin(2\omega) \quad (5.1)$$

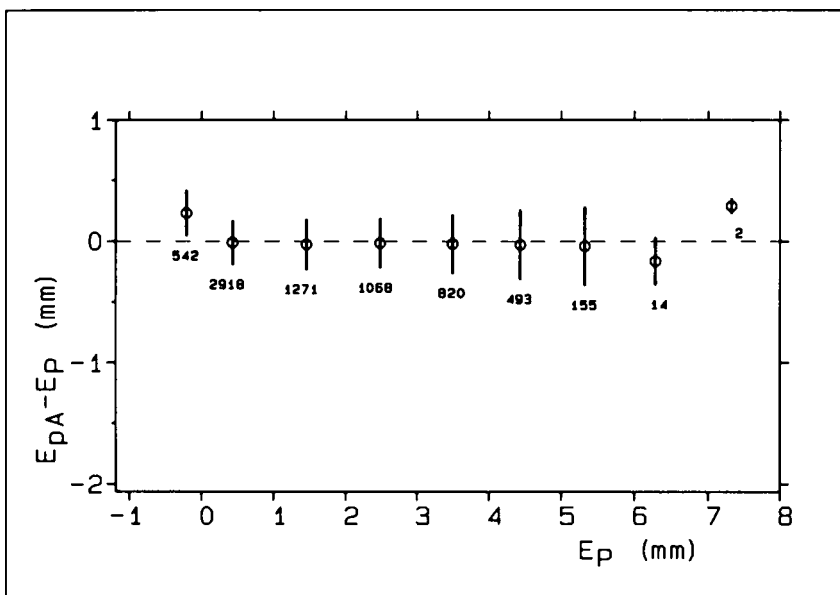
$$\beta_{A1} = 0.083 - 0.4629 \cos(\omega) + 0.0354 \sin(\omega) - 0.0914 \cos(2\omega) + 0.0286 \sin(2\omega) \quad (5.2)$$

$$\beta_{A2} = 0.963 - 0.1707 \cos(\omega) + 0.0123 \sin(\omega) - 0.0419 \cos(2\omega) + 0.0381 \sin(2\omega) \quad (5.3)$$

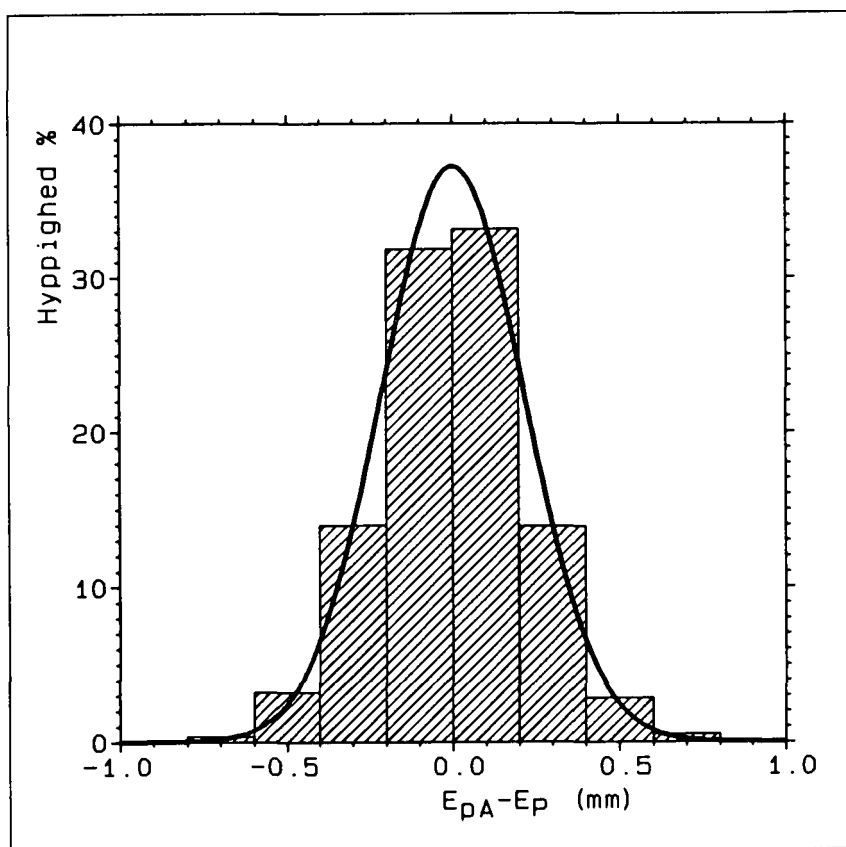
Den herved fremkomne model, modificeret Penman metode (E_{pA}), er sammenlignet med Penmans metode, og resultatet er vist i figur 5.2.

Ved sammenligning af figur 5.1 og 5.2 bemærkes, at sammenhængen ved høje fordampningsværdier mellem E_P og E_{pA} er væsentligt bedre end mellem E_P og E_M , ligesom spredningen generelt er mindre. Integreret på månedsbasis for 20-års perioden 1967-1986 er E_P og E_{pA} også i god overensstemmelse, jf. tabel 5.1. For hele året såvel som for vækstsæsonen er forskellen mindre end 1 %, ligesom overensstemmelsen på månedsbasis er udmærket. I tabel 5.1 er tillige angivet, om forskellen mellem E_P og E_{pA} er signifikant. En hypotese om, at middel på Penman fordampningen $\overline{E_P}$ er lig middel på den modificerede Penman fordampning $\overline{E_{pA}}$ er testet månedsvist (t-test). Det er fundet, at hypotesen accepteres i alle måneder undtagen oktober. Også for året og vækstsæsonen accepteres hypotesen.

Fordelingen af afvigelserne mellem E_P og E_{pA} er vist i figur 5.3 for den periode, hvor jorden i næsten alle tilfælde er snefri (april-november). Ved sammenligning med en normalfordeling med samme standardafvigelse og middelværdi ses meget god overensstemmelse. I en χ^2 -test forkastes den hypotese, at afvigelserne fra normalfordelingen er tilfældige, på 5 % signifikansniveau, men accepteres på 1 % niveau.



Figur 5.2: Differensen mellem modificeret Penman og original Penman fordampning ($E_{pA} - E_P$) plottet mod E_P . Længderne af de lodrette linjer angiver standardafvigelsen i $E_{pA} - E_P$. Beregningen er sket på daglig basis, og de anførte tal i figuren angiver antallet af analyserede dage. Identitetslinjen $E_{pA} - E_P = 0$ er indtegnet. Data fra Højbakkegård 1967-86.



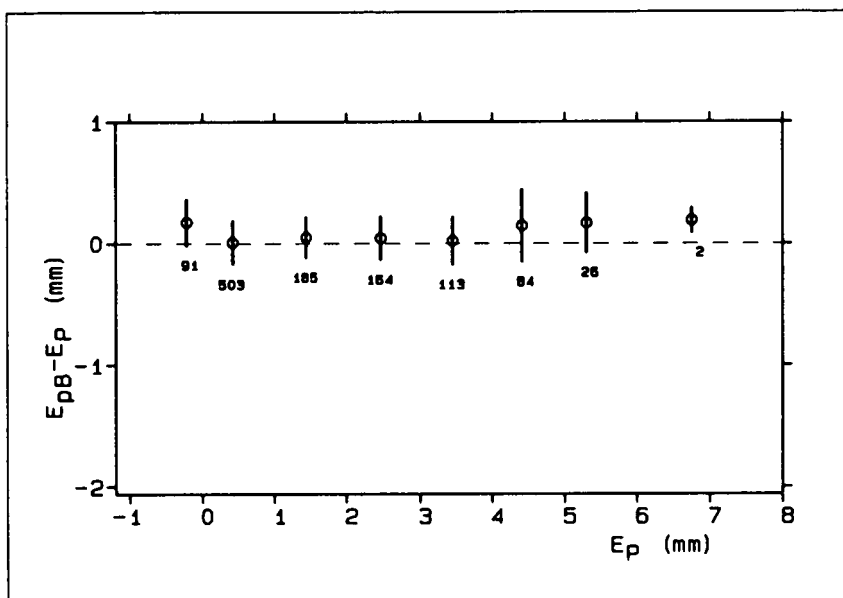
Figur 5.3: Fordelingen af døgnlige differencer (mm) mellem modificeret Penman (E_{pA}) og original Penman (E_P). Der er tillige indtegnet en normalfordeling med samme standardafvigelse og middelværdi som dataene, hhv. 0.215 mm og 0.0 mm. Data fra Højbakkegård 1967-86 for månederne f.o.m. april t.o.m. november.

Tabel 5.2: Gennemsnitlige månedstotaler for E_P og E_{pA} med forskellige inddata for vindhastighed. Vindhastigheden er målt 2 eller 12 m over jordoverfladen. Hastighedsmålinger fra 12 m er transformeret til 2 m ved (2.12). Resultaterne er i mm og stammer fra Højbakkegård 1975-79.

Periode	Penman 2 m	Mod. Penman 2 m	Mod. Penman 12 m, $z_0=0.01$ m	Mod. Penman 12 m, $z_0=0.02$ m
	E_P (2.8)	E_{pA} (2.9)	E_{pA} (2.9)	E_{pA} (2.9)
Januar	5.1	5.8	6.1	5.9
Februar	5.3	6.3	6.5	6.3
Marts	24.5	25.1	25.6	25.1
April	56.4	56.7	57.9	57.1
Maj	104.2	107.5	107.6	106.3
Juni	113.5	114.0	114.9	113.8
Juli	104.9	104.3	106.7	105.7
August	94.2	96.2	97.7	96.6
September	51.1	53.0	54.3	53.4
Oktober	24.4	23.5	23.7	23.2
November	7.7	9.3	9.8	9.5
December	5.1	5.8	6.0	5.7
Apr.-sep.	524.3	531.7	539.1	532.9
Året	596.4	607.5	616.9	608.7

Ved Højbakkegård er vindhastigheden målt i 2 m's og - i perioden 1975-79 - 12 m's højde over jordoverfladen. Ved de ovenfor viste beregninger af E_P og E_{pA} med hhv. (2.8) og (2.9) er dataene fra 2 m reference-niveauet anvendt. Ved det landsdækkende net af automatiske klimastationer måles vindhastigheden ikke i 2 m's højde, men i 10 m. Det er derfor af interesse at få belyst, hvorvidt E_{pA} kan beregnes pålideligt med brug af vinddata fra en højde væsentligt forskellig fra reference-niveauet. I tabel 5.2 er givet en sammenligning af normal E_P med E_{pA} beregnet på vinddata fra både 2 m og 12 m. Dataene fra 12 m's højde er transformeret til 2 m ved hjælp af (2.12) med $z = 12$. Tabellen giver månedsmiddeltal for den relativt korte periode 1975-79 ved brug af hhv. $z_0 = 0.01$ m og $z_0 = 0.02$ m. Man ser, at sidstnævnte ruhedslængde giver en næsten perfekt overensstemmelse med E_{pA} beregnet på grundlag af målt 2 m vindhastighed. $z_0 = 0.01$ m antages dog at være en passende gennemsnitsværdi for de lokaliteter, hvor de automatiske klimastationer findes.

Korsgaard et al. (1991) har udviklet en model for bestemmelse af nettostrålingen som funktion af globalstråling, vindhastighed, lufttemperatur og damptryk. Ved anvendelse af denne models resultater kan man ved sædvanlig Penman beregning efter (2.8) få et fordampningsestimater E_{pB} . I figur 5.4 ses E_{pB} afbildet mod E_P . Figuren, som er blevet til på grundlag af et mindre datamateriale end det, der ligger til grund for figur 5.1 og 5.2,



Figur 5.4: Differensen mellem Penman fordampning beregnet på nettostråling efter Korsgaard et al. (1991) og original Penman fordampning ($E_{pB} - E_P$) plottet mod E_P . Længderne af de lodrette linjer angiver standardafvigelsen i $E_{pB} - E_P$. Beregningen er sket på daglig basis, og de anførte tal i figuren angiver antallet af analyserede dage. Identitetslinjen $E_{pB} - E_P = 0$ er indtegnet. Data fra Højbakkegård 1977-80.

viser, at metoden er et muligt alternativ ved estimering af potentiel fordampning. Med E_P som reference giver E_{pB} tilsyneladende lidt bedre estimater end E_{pA} ved meget høje og lave fordampninger, men ringere ved moderate fordampninger.

I figur 5.5 er vist resultaterne for E_M , E_{pA} og E_{pB} , når disse integreres månedsvist og plottes mod Penman-referencen. Overensstemmelsen er god for E_{pA} - og E_{pB} -estimaterne, men det bemærkes samtidig, at datamaterialet vedrørende E_{pB} er ret beskedent. For E_M er spredningen større.

Ved Højbakkegård er der gennem en årrække foretaget målinger af potentiel fordampning fra vejebare lysimetre. Data fra disse forsøg er i figur 5.6 afbildet mod E_P , E_M , E_{pA} og E_{pB} . Det konstateres, i lighed med Kristenssens (1979) og Hansen et al.'s (1981) resultater, at E_P normalt overstiger E_l . Noget lignende ses at gælde, når E_l sammenlignes med E_M , E_{pA} og E_{pB} . Spredningen (hvorved her forstås standardafvigelsen på differencen) mellem E_l og de tre sidstnævnte estimater er af samme størrelsesorden som spredningen mellem E_P og E_l , for $E_{pA} - E_l$ endog lidt mindre, men datagrundlaget m.h.t. E_{pB} er ret spinkelt. Det skal i forbindelse med denne figur understreges, at en konklusion af Hansen et al.'s (1981) arbejde må være, at lysimeterfordampningen ikke til enhver tid giver et præcist mål for den fordampede vandmængde over større flader. En del af spredningen i figur 5.6 kan derfor stamme fra "støj" ved lysimetermålingen.

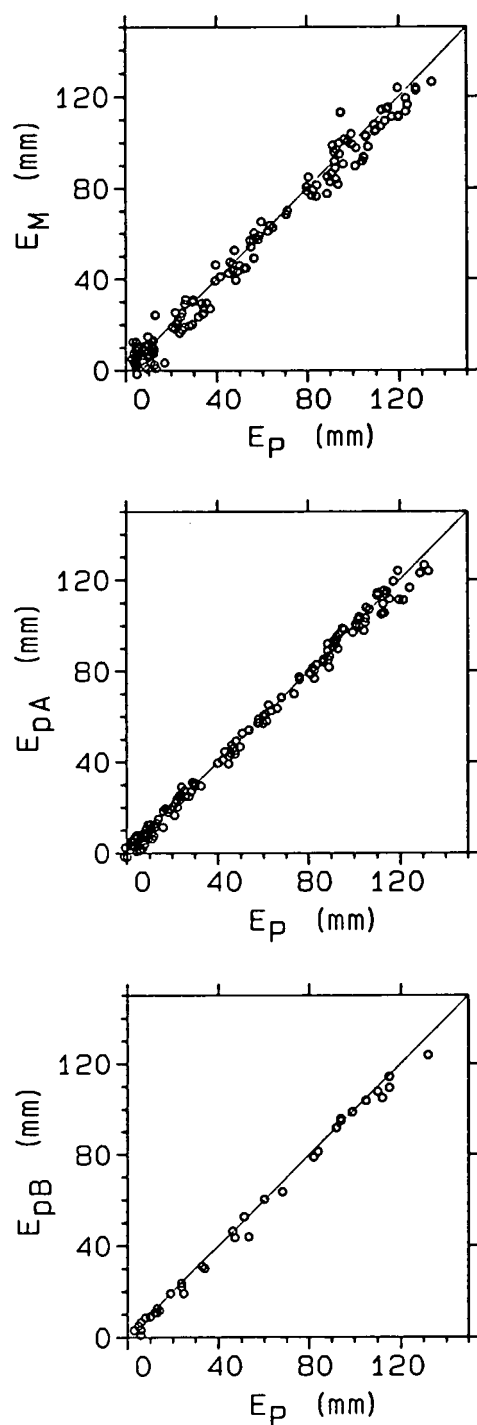
Korrigerede målinger af vandfordampningen fra HL315-panden (E_H) med standard afdækningsnet er i figur 5.7 sammenlignet med E_P , E_M , E_{pA} og E_{pB} . De fire estimater giver meget nær samme resultat, når der plottes mod E_H . Regressionslinjerne er henholdsvis:

$$E_H = 8.8 + 0.823E_P, \quad R^2 = 0.96$$

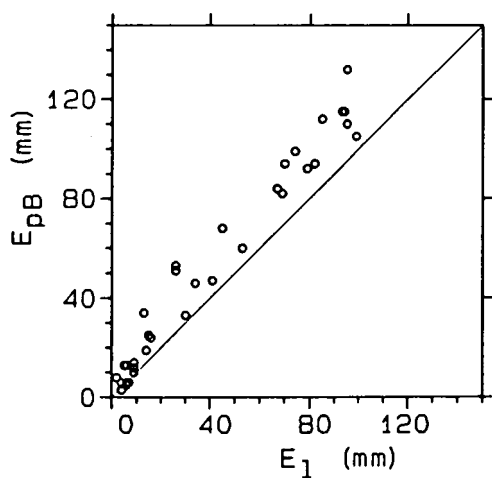
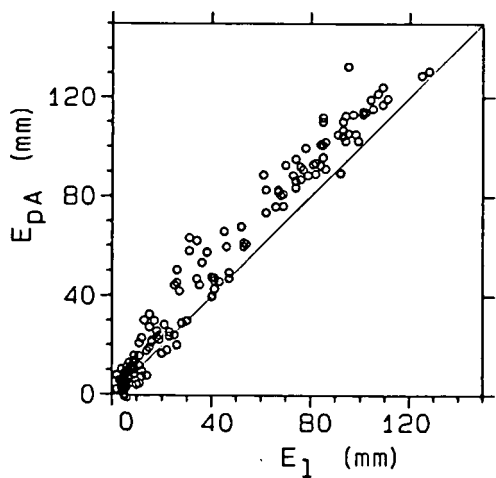
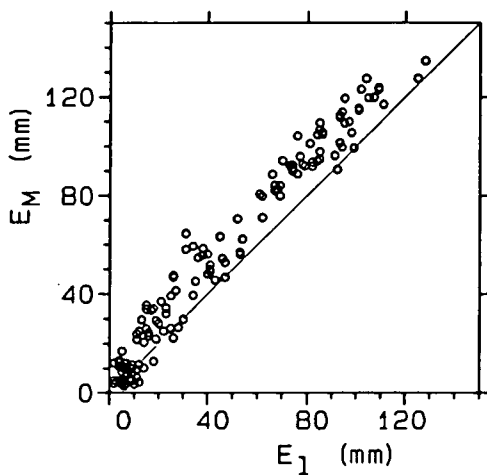
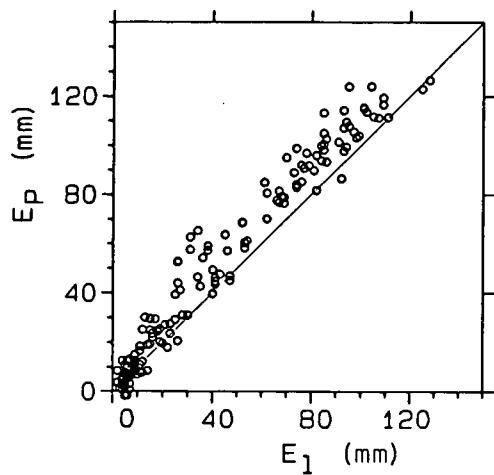
$$E_H = 8.9 + 0.799E_M, \quad R^2 = 0.96$$

$$E_H = 9.1 + 0.809E_{pA}, \quad R^2 = 0.97$$

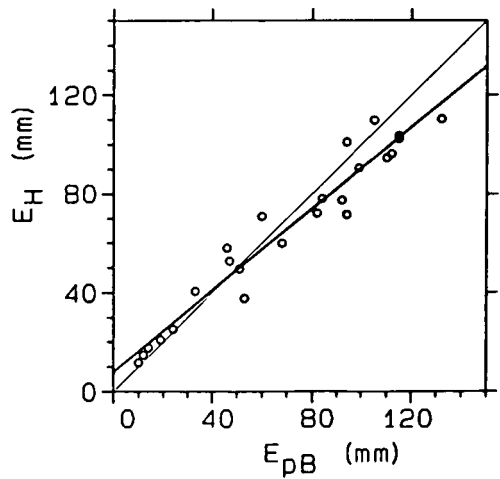
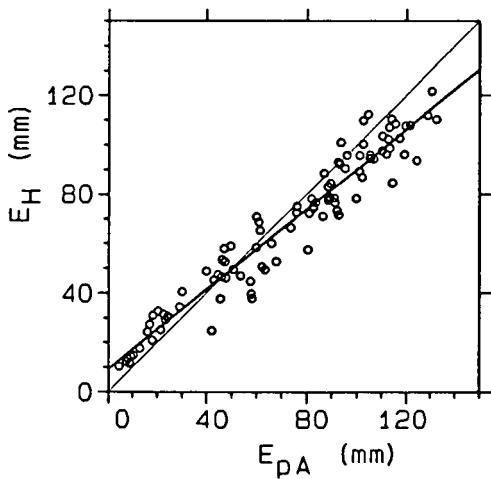
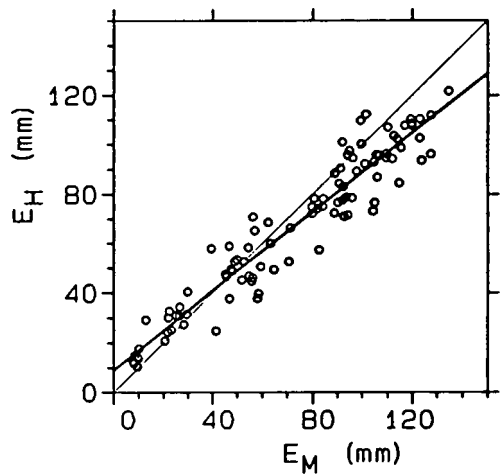
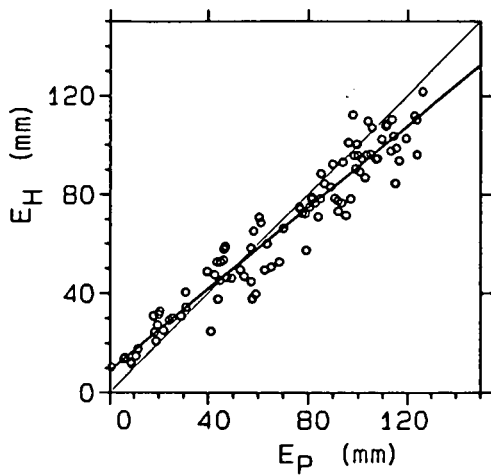
$$E_H = 7.9 + 0.825E_{pB}, \quad R^2 = 0.97$$



Figur 5.5: Månedssummer for E_M , E_{pA} og E_{pB} optegnet mod E_P . Identitetslinjen er indtegnet. Data fra Højbakkegård 1967-86 (E_{pA}) og 1977-80 (E_{pB}).



Figur 5.6: Månedssummer for E_P , E_M , E_{pA} og E_{pB} afbildet mod E_I . Identitetslinjen er indtegnet. Data fra Højbakkegård 1967-79 (E_P , E_M og E_{pA}) og 1977-79 (E_{pB}).



Figur 5.7: HL315 fordampningsværdier (E_H) er afbildet mod månedssummer for E_P , E_M , E_{pA} og E_{pB} . Den fede linje er regressionslinjen, den tynde linje er identitetslinjen. Data fra Højbakkegård 1967-86 (E_P , E_M og E_{pA}) og 1977-80 (E_{pB}).

5.2 Foulum

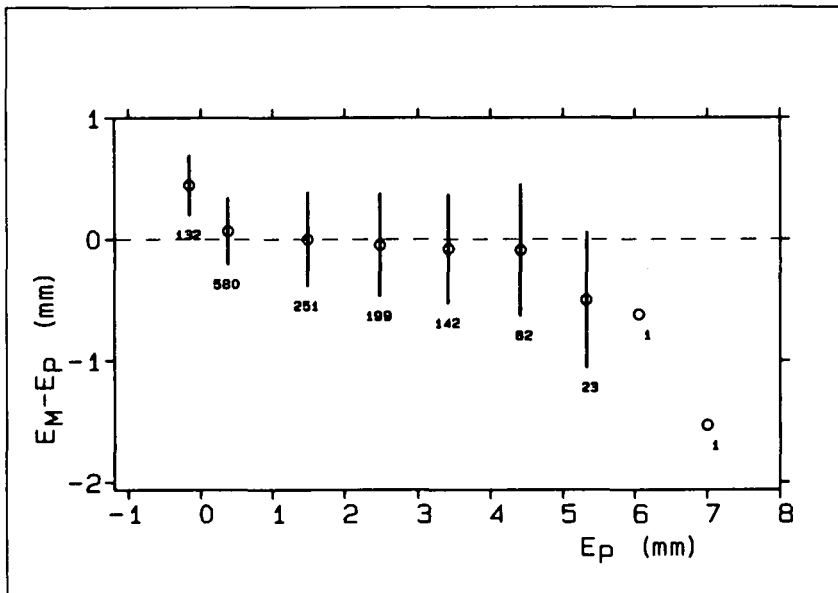
På det mindre datamateriale fra Foulum er gennemført en analyse parallel med den ovenfor viste. I tabel 5.3 er vist en statistik for summerede fordampningsværdier for årene 1987-90. Der forekommer væsentligt større afvigelser end ved Højbakkegård, et forhold, som i høj grad må tilskrives den betydeligt kortere tidsserie. Det ses således, at hypotesen $\overline{E_{pA}} - \overline{E_P} = 0$ her accepteres i alle måneder.

Tabel 5.3: Gennemsnit af månedstotaler for forskellige estimater af potentiel fordampning (mm) ved Foulum 1987-90. I de to kolonner længst til højre findes hhv. middel og standardafvigelse for differensen $E_P - E_{pA}$. Med * angives, at hypotesen $\overline{E_{pA}} - \overline{E_P} = 0$ accepteres på 1 % signifikansniveau. Med ** angives, at samme hypotese accepteres på 5 % signifikansniveau.

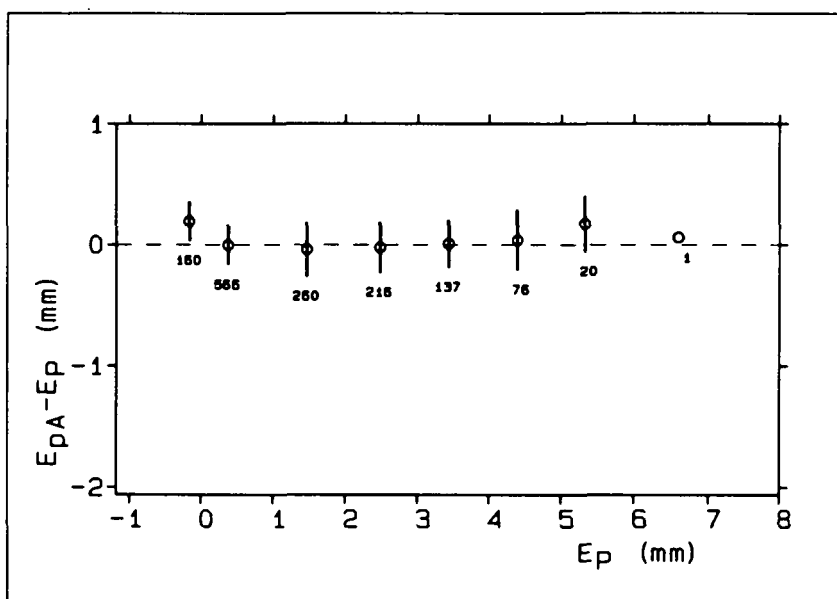
Periode	Penman	Makkink	Mod. Penman	Middel af	Std. afv. på
	E_P (2.8)	E_M (2.14)	E_{pA} (2.9)	$E_{pA} - E_P$	$E_{pA} - E_P$
Januar	2.8	5.5	3.2	** 0.4	0.7
Februar	10.9	12.9	10.3	** -0.6	1.0
Marts	25.5	28.4	24.7	** -0.8	1.5
April	54.7	56.5	54.1	** -0.6	2.3
Maj	96.7	101.0	99.6	** 2.9	1.2
Juni	98.7	107.3	97.6	** -1.1	2.5
Juli	100.8	100.6	102.0	** 1.2	2.8
August	75.8	76.4	77.5	** 1.7	3.0
September	42.4	48.5	42.1	** -0.3	2.0
Oktober	17.7	22.8	18.0	** 0.3	2.6
November	0.9	10.5	3.5	** 2.6	1.7
December	3.3	4.7	4.8	** 1.5	2.0

Figurerne 5.8, 5.9 og 5.10 er sammenlignelige med figurerne 5.1, 5.2 og 5.4. Figur 5.11 kan sammenlignes med figur 5.5, og figur 5.12 med figur 5.7. De resultater, som fremkommer på de to lokaliteter, viser de samme tendenser, idet der ved begge lokaliteter er en tydelig gevinst ved anvendelsen af E_{pA} i stedet for E_M . E_{pB} giver ved Foulum et lidt ringere resultat end E_{pA} .

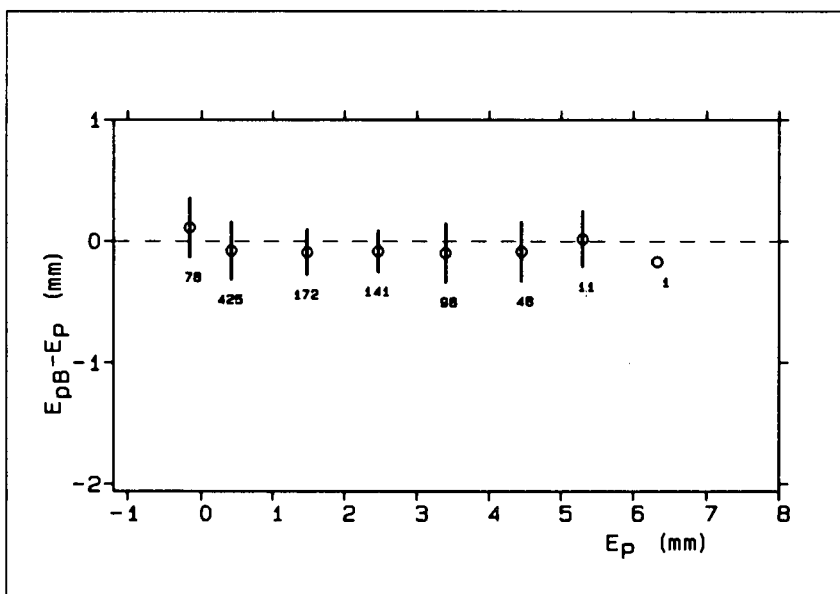
Det må fremhæves, at der ikke på baggrund af det relativt sparsomme materiale fra Foulum kan drages vidtrækkende konklusioner. Endvidere har der i perioder været problemer med måling af jordvarmeffluksen, som indgår i beregningen af E_P . Denne størrelse er i beregningerne sat lig $0.1R_n$, jf. Korsgaard et al. (1991).



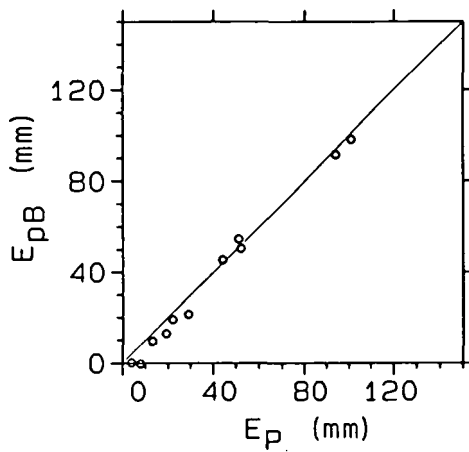
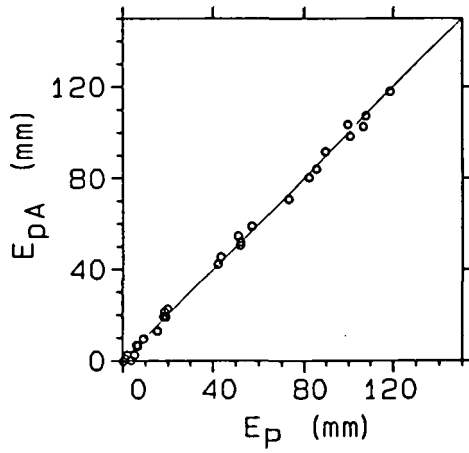
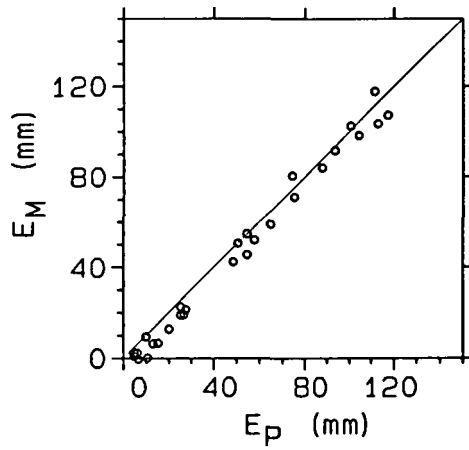
Figur 5.8: Differensen mellem Makkink og Penman potentiel fordampning ($E_M - E_P$) plottet mod E_P . Længderne af de lodrette linjer angiver standardafvigelsen i $E_M - E_P$. Beregningen er sket på daglig basis, og de anførte tal i figuren angiver antallet af analyserede dage. Identitetslinjen $E_M - E_P = 0$ er indtegnet. Data fra Foulum 1987-90.



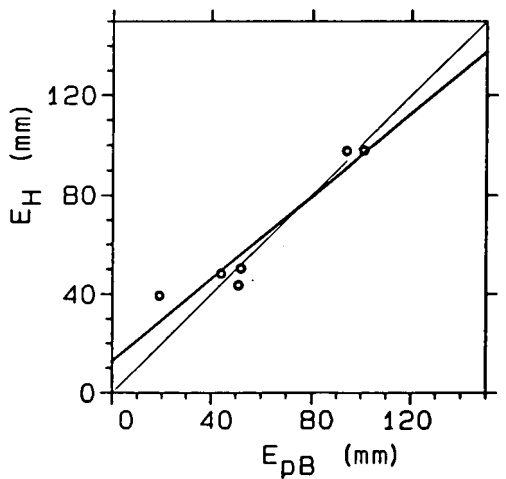
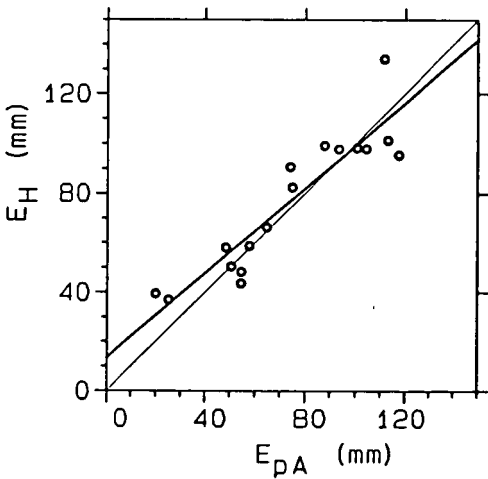
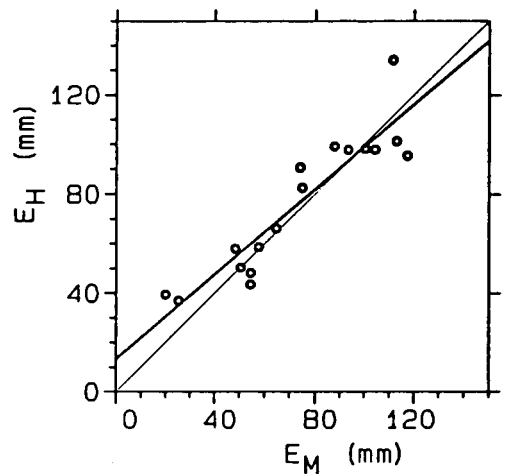
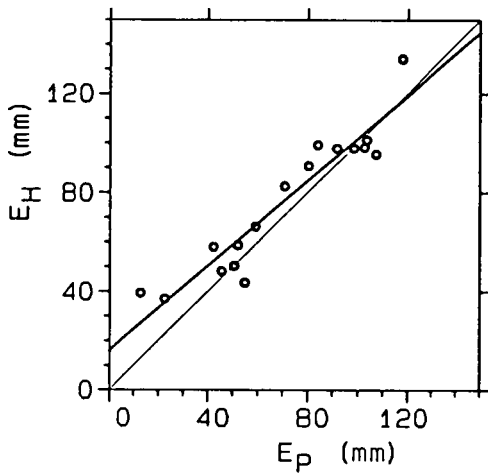
Figur 5.9: Differensen mellem modificeret Penman og original Penman fordampning ($E_{pA} - E_P$) plottet mod E_P . Længderne af de lodrette linjer angiver standardafvigelsen i $E_{pA} - E_P$. Beregningen er sket på daglig basis, og de anførte tal i figuren angiver antallet af analyserede dage. Identitetslinjen $E_{pA} - E_P = 0$ er indtegnet. Data fra Foulum 1987-90.



Figur 5.10: Differensen mellem Penman beregnet på nettostråling efter Korsgaard et al. (1991) og original Penman fordampning ($E_{pB} - E_P$) plottet mod E_P . Længderne af de lodrette linjer angiver standardafvigelsen i $E_{pB} - E_P$. Beregningen er sket på daglig basis, og de anførte tal i figuren angiver antallet af analyserede dage. Identitetslinjen $E_{pB} - E_P = 0$ er indtegnet. Data fra Foulum 1987-89.



Figur 5.11: Månedssummer for E_{pA} , E_M og E_{pB} optegnet mod E_P . Identitetslinjen er indtegnet. Data fra Foulum 1987-90.



Figur 5.12: HL315 fordampningsværdier (E_H) er afbildet mod månedssummer for E_P , E_M , E_{pA} og E_{pB} . Den fede linje er regressionslinjen, den tynde linje er identitetslinjen. Data fra Foulum 1987-90.

5.3 Statens forsøgsstationer

Ved statens forsøgsstationer har HL315-fordampningsmålerne de fleste steder været anbragt på gode målesteder. Datakvaliteten vil derfor i mange tilfælde være over gennemsnittet, ikke mindst fordi pasningen også generelt har været god. For de seks forsøgsstationer, som har de længste tidsserier for solskinstimer, er der foretaget en sammenligning mellem E_M og E_H . Stationerne beliggenhed er vist i figur 3.2.

Tabel 5.4: E_M og E_H ved Tylstrup 1961-90. Værdier i mm.

Periode	E_M	E_H	E_M/E_H
Januar	4.6	-	-
Februar	10.9	-	-
Marts	28.0	-	-
April	53.3	42.4	1.26
Maj	86.8	69.6	1.25
Juni	103.5	85.2	1.21
Juli	102.2	95.5	1.07
August	84.1	72.4	1.16
September	48.6	42.6	1.14
Oktober	22.8	21.1	1.08
November	8.7	9.3	0.93
December	4.0	-	-
Apr.-sep.	478.4	407.7	1.17
Året	557.0	-	-

Der er inddraget tidsserier fra perioden 1961-90 i analysen. Globalstrålingen er bestemt fra solskinstimer efter en metode beskrevet af Olesen (1990), idet globalstrålingen dog er målt direkte i 1987-90. Da HL315-målenettet ikke fungerer i vinterperioden, omfatter sammenligningen udelukkende månederne april til november. I tabellerne 5.4 til 5.9 er stationsvis givet de summerede værdier for hver måned for E_M og E_H .

Det ses af tabel 5.4 til 5.9, at E_M udviser væsentligt mindre geografisk variation end E_H . Som det fremgår af afsnit 5.1, stemmer Makkink beregnet fordampningen godt med Penman, når der integreres over lange tidsrum. Der er følgelig grund til at antage, at de variationer, som ses mellem E_M og E_H overvejende skyldes påvirkninger af HL315 målerne, som er betinget af lokale forhold i målerens nærmeste omgivelser. Det skal yderligere fremhæves, at der sker en tidsmæssig forskydning mellem de to fordampningsestimater. Som også bemærket af Kristensen (1979) gælder det, at E_H er relativt størst i afkølingsperioder (eftersommer-efterår), mens E_H underestimerer den potentielle fordampning i april-juni. Dette er illustreret i figur 5.13. Forholdet tilskrives forskellige termiske egenskaber for jorden udenfor og vandmassen i fordampningskarret.

Tabel 5.5: E_M og E_H ved Ødum 1961-90. Værdier i mm.

Periode	E_M	E_H	E_M/E_H
Januar	5.0	-	-
Februar	11.1	-	-
Marts	27.6	-	-
April	53.7	46.8	1.15
Maj	87.1	76.1	1.14
Juni	101.5	91.5	1.11
Juli	98.3	103.8	0.95
August	85.5	85.1	1.00
September	49.3	50.9	0.97
Oktober	23.8	27.0	0.88
November	9.2	12.0	0.77
December	4.2	-	-
Apr.-sep.	475.3	454.1	1.05
Året	556.3	-	-

Tabel 5.6: E_M og E_H ved Askov 1961-90. Værdier i mm.

Periode	E_M	E_H	E_M/E_H
Januar	5.3	-	-
Februar	11.5	-	-
Marts	27.1	-	-
April	52.9	41.8	1.27
Maj	86.7	64.8	1.34
Juni	98.4	75.8	1.30
Juli	94.7	84.8	1.12
August	83.3	72.4	1.15
September	48.3	45.5	1.06
Oktober	23.9	26.1	0.92
November	9.2	13.6	0.67
December	4.5	-	-
Apr.-sep.	464.3	385.0	1.21
Året	545.9	-	-

Tabel 5.7: E_M og E_H ved Jyndevad 1961-90. Værdier i mm.

Periode	E_M	E_H	E_M/E_H
Januar	5.8	-	-
Februar	12.1	-	-
Marts	28.4	-	-
April	53.4	44.5	1.20
Maj	87.3	75.7	1.15
Juni	98.1	87.3	1.12
Juli	95.6	91.7	1.04
August	84.0	76.1	1.10
September	49.0	44.1	1.11
Oktober	24.8	24.1	1.03
November	9.4	11.6	0.81
December	4.8	-	-
Apr.-sep.	467.4	419.3	1.11
Året	552.6	-	-

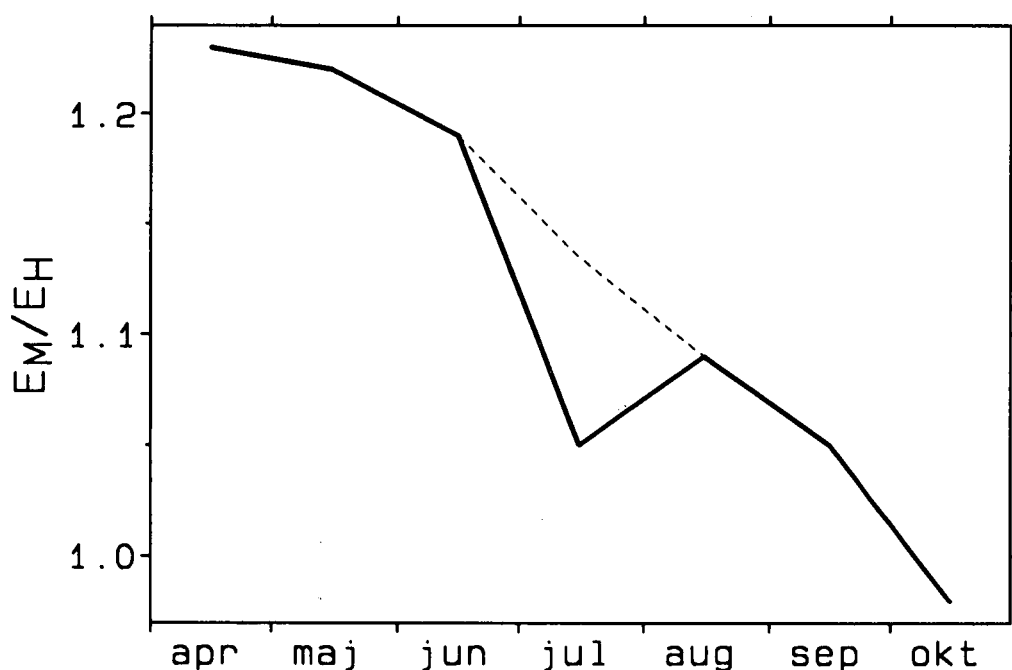
Tabel 5.8: E_M og E_H ved Årslev 1961-90. Værdier i mm.

Periode	E_M	E_H	E_M/E_H
Januar	5.4	-	-
Februar	11.4	-	-
Marts	27.8	-	-
April	54.3	38.4	1.42
Maj	89.4	65.8	1.36
Juni	102.0	78.0	1.31
Juli	99.5	84.2	1.18
August	86.5	73.1	1.18
September	50.9	44.4	1.15
Oktober	25.4	23.1	1.10
November	9.8	13.0	0.75
December	4.7	-	-
Apr.-sep.	482.6	383.8	1.26
Året	567.1	-	-

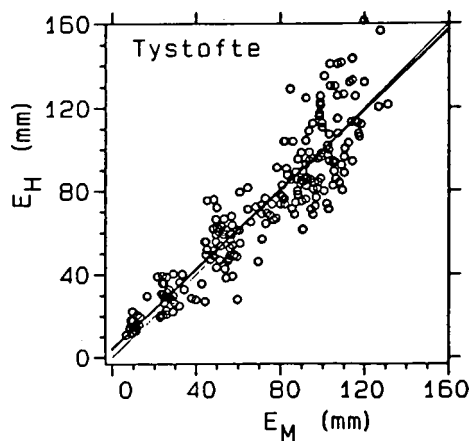
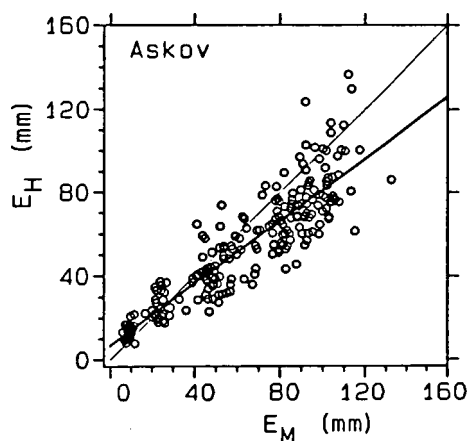
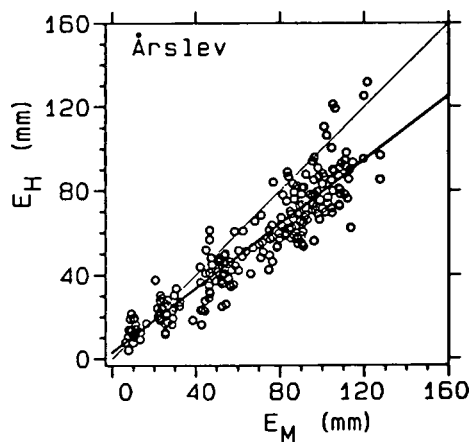
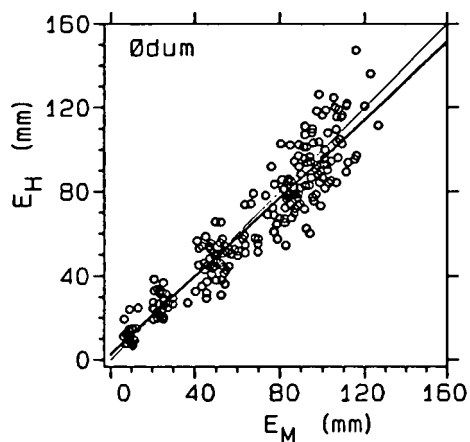
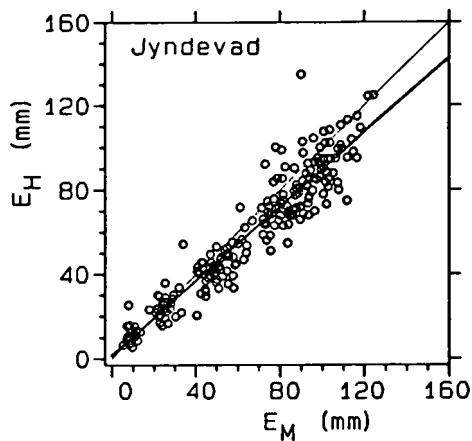
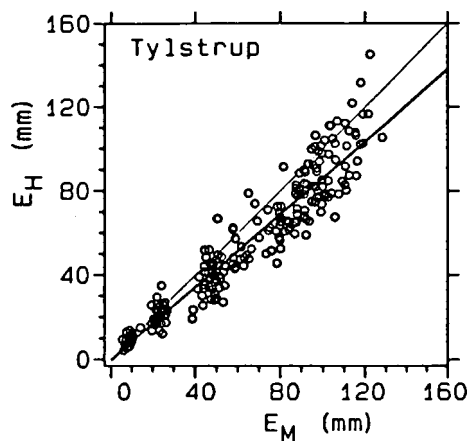
Tabel 5.9: E_M og E_H ved Tystofte 1961-90. Værdier i mm.

Periode	E_M	E_H	E_M/E_H
Januar	5.7	-	-
Februar	12.0	-	-
Marts	28.4	-	-
April	55.4	51.6	1.07
Maj	92.0	86.0	1.07
Juni	104.7	97.4	1.08
Juli	103.4	110.4	0.94
August	89.6	95.5	0.94
September	52.8	59.5	0.89
Oktober	26.4	30.2	0.87
November	10.1	15.3	0.66
December	5.2	-	-
Apr.-sep.	497.8	500.4	0.99
Året	585.5	-	-

I figur 5.14 ses månedsværdierne for de seks stationer plottet mod hinanden. Ved de fleste stationer ses der at være en tendens til, at E_H er større end E_M ved store fordampningsværdier. Dette kan skyldes udtørring omkring målerne under sådanne forhold og deraf følgende oase-effekt. Denne antagelse støttes også af, at ved Jyndevad, hvor der gennem en del af perioden har været vandet regelmæssigt omkring fordampningsmåleren, overestimerer E_H potentiel fordampning langt mindre end ved de øvrige lokaliteter.



Figur 5.13: Forholdet mellem Makkink og HL315 fordampning (E_M/E_H). Gennemsnit af data fra seks forsøgsstationer 1961-90. Den tynde, stiplede linje viser (E_M/E_H), hvis man anvender $k = 1.3$ for juli måned ligesom for maj, juni og august. Standard-værdien for k er 1.4 i juli måned (jf. tabel 2.1).



Figur 5.14: Potentiel fordampning E_M og E_H afbildet mod hinanden som månedsværdier. Identitetslinjen er indtegnet. Data fra seks forsøgsstationer 1961-90.

6 Konklusion

Følgende metoder til bestemmelse af potentiel fordampning er sammenlignet og vurderet i afsnit 4 og 5:

- Fordampning bestemt efter Penman.
- Fordampning bestemt efter Penman, men med globalstråling som energivariabel.
- Fordampning bestemt efter Penman, men med modelberegnet nettostråling og jordvarmeffluks.
- Fordampning bestemt efter Makkink.
- Fordampning målt med fordampningsmåler HL315.
- Fordampning fra vejebart lysimeter med kort græs.

Resultater fra perioden 1961-1990 for danske fordampningsmålinger med HL315 er blevet analyseret og sammenlignet indbyrdes. Det konstateres, at der forekommer betydelig variation mellem stationer, som geografisk er placeret i nærheden af hinanden. Variationerne skyldes en række faktorer, hvoraf de vigtigste er målerens eksponering for vind og sol-indstråling samt målerens pasningsgrad især m.h.t. vanding omkring måleren og vedligeholdelsen af afdækningsnettet. Det må konkluderes, at HL315 måleren er følsom over for effekter af denne art, og at fordampningen bestemt fra HL315 derfor i højere grad er udtryk for helt lokale variationer end for det regionale fordampningsklima.

Ved anvendelse af dataserien fra Højbakkegård er der udviklet en alternativ metode til operationel beregning af potentiel fordampning. Endvidere er potentiel fordampning beregnet efter Penmans metode under anvendelse af Korsgaard et al.'s (1991) model. Begge metoder giver tilfredsstillende estimater, såvel for daglige beregninger som for summerede data, når de sammenlignes med en referencefordampning beregnet efter Penmans kombinationsmetode. De to metoder er afprøvet på data fra Foulum og synes også her at fungere tilfredsstillende. Tidsserien fra denne lokalitet er dog for kort til, at vidtrækkende konklusioner kan drages.

Det er af største vigtighed, at den metode til bestemmelse af potentiel fordampning, som anvendes i Danmark, er udtryk for regionalt fordampningsklima snarere end lokalt. Metoden skal endvidere give realistiske estimater for potentiel fordampning på døgnbasis.

Det anbefales derfor fremover at benytte den modificerede Penman ligning (2.9-2.10) til beregning af potentiel fordampning i Danmark. Hvor det er muligt, kan Penman-ligningen

(2.8) dog anvendes direkte, evt. med modelberegnet nettostråling og jordvarmeffluks efter Korsgaard et al. (1991). Makkink-ligningen bør ikke anvendes til beregning af potentiel fordampning, hvor der foreligger data for vindhastighed og luftfugtighed, men kan anvendes, hvor sådanne data ikke kan fremskaffes. Data fra målenettet med HL315 bør så vidt muligt ikke anvendes, og målenettet bør nedlægges, dog bør enkelte målesteder på forsøgsstationerne fortsat opretholdes som sammenligningsgrundlag.

Erkendtlighed

Data fra IHD stationerne og fra Højbakkegård er velvilligt stillet til rådighed af Sektion for Kulturteknik og Planteernæring, Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole.

Referencer

- Andersen, B. (1989). Vandingsvejledning. Landskontoret for Planteavl. Århus.
- Aslyng, H.C. (1965). Evaporation, evapotranspiration and water balance investigations at Copenhagen 1955-64. *Acta Agric. Scand.* 15, 284-300.
- Aslyng, H.C. (1976). Klima, jord og planter. 5. udgave. DSR Forlag. Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole. 368 pp.
- Aslyng, H.C. & Hansen, L. (1960). Vandfordampning og vindhastighed ved statens forsøgsstationer. *Tidsskr. Planteavl* 64, 185-212.
- Aslyng, H.C. & Hansen, S. (1982). Water balance and crop production simulation. Hydrotechnical Laboratory. The Royal Veterinary and Agricultural University. Copenhagen. 200 pp.
- Aslyng, H.C. & 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.
- Aslyng, H.C. & Stendal, M.M. (1965). Vindhastighed og vandbalance ved statens forsøgsstationer og Højbakkegård 1960-1963. *Tidsskr. Planteavl* 68, 805-835.
- Bruin, H.A.R. de (1987). From Penman to Makkink. I J.C. Hoogart (ed.): Evaporation and weather: Technical Meeting 44, Ede, The Netherlands, 25 March 1987. Proceedings and Information, TNO Committee on Hydrological Research no. 39. pp. 5-31.
- Feddes, R.A. (1987). Crop factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration. I J.C. Hoogart (ed.): Evaporation and weather: Technical Meeting 44, Ede, The Netherlands, 25 March 1987. Proceedings and Information, TNO Committee on Hydrological Research no. 39. pp. 33-45.
- Gregersen, A. (1972-86). Nedbør, fordampning og vandbalance 1972-85. Meddelelser fra Statens Planteavlsforsøg nr. 1070, 1122, 1172, 1249, 1314, 1387, 1467, 1524, 1586, 1647, 1699, 1761, 1806, 1850.
- Gregersen, A. & Knudsen, H. (1980). Vindhastighed, vandbalance og vandingsbehov 1957-78. *Tidsskr. Planteavl* 84, 111-161.

- Hansen, S., Jensen, S.E. & Aslyng, H.C. (1981). Jordbrugsmeteorologiske observationer, statistisk analyse og vurdering 1955-1979. Hydroteknisk Laboratorium. Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole. København. 414 pp.
- Jensen, S.E. & Aslyng, H.C. (1966). Net radiation and net longwave radiation at Copenhagen 1962-1964. Arch. Met. Geophys. Biokl. B 15, 127-140.
- Korsgaard, I., Mikkelsen, H.E. & Olesen, J.E. (1991). Beregning af nettostråling og jordvarmeffluks for kortklippet græs fra meteorologiske data. AJMET Arbejdsnotat 25.
- Kristensen, K.J. (1971). Potentiel vandfordampning bestemt ved forskellige metoder. Vannet i Norden 4, 11-28.
- Kristensen, K.J. (1979). A comparison of some methods for estimation of potential evapotranspiration. Nordic Hydrology 10, 239-250.
- Makkink, G.F. (1957). Ekzameno de la formulo de Penman. Repr. Neth. J. Agric. Sci. 5, 290-305.
- Mogensen, V.O. (1970). The calibration of heat flux meters in relation to thermal conductivity of the surrounding medium. Agric. Meteorol. 7, 401-410.
- Mogensen, V.O. & Hansen, B.S. (1979). Drought periods in Denmark 1956-1976. Calculations for field irrigation. Kgl. Vet.- og Landbohøjsk. Årsskr. 1979, 25-42.
- Monteith, J.L. (1963). Gas exchange in plant communities. I L.T. Evans (ed.): Environmental control of plant growth. pp. 95-112.
- Monteith, J.L. (1964). Evaporation and environment. The state and movement of water in living organisms. I: 19th Symp. Soc. Exp. Biol. pp. 205-234.
- Olesen, J.E. (1987). Mikrometeorologi. Ugeskrift for Jordbrug nr. 34, 1041-1046.
- Olesen, J.E. (1988). Jordbrugsmeteorologisk årsoversigt 1987. Tidsskr. Planteavl's Specialserie S1924.
- Olesen, J.E. (1989). Jordbrugsmeteorologisk årsoversigt 1988. Tidsskr. Planteavl's Specialserie S2002.
- Olesen, J.E. (1990). Jordbrugsmeteorologisk årsoversigt 1989. Tidsskr. Planteavl's Specialserie S2055.

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

Penman, H.L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. A 193, 120-145.

Penman, H.L. (1956). Evaporation: an introductory survey. Neth. J. Agric. Sci. 4, 8-29.

Plauborg, F. & Olesen, J.E. (1991). Udvikling og validering af modellen MARKVAND til vandingssstyring i landbruget. Tidsskr. Planteavl Specialserie S2113.

Priestley, C.H.B. & Taylor, R.J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Mon. Weather Rev. 100, 81-92.

Rosenberg, N.J., Blad, B.L. & Verma, S.B. (1983). Microclimate. The biological environment. Second Edition. Wiley-Interscience. 495 pp.

Statens Forsøgsvirksomhed i Plantekultur (1964-71). Nedbør, fordampning og vandbalance 1964-71. Meddelelser fra Statens Forsøgsvirksomhed i Plantekultur nr. 762, 769, 798, 826, 863, 908, 968 og 1020.

Stendal, M.M. (1978a). Karup representative basin, Denmark. Data volume 1965-1977. Danish National Committee for the IHD. 138 pp.

Stendal, M.M. (1978b). Stevns representative basin, Denmark. Data volume 1965-1977. Danish National Committee for the IHD. 119 pp.

Thomsen, P.C. (1987). Nedbør, fordampning og vandbalance 1986. Meddelelse fra Statens Planteavlsforsøg nr. 1893.

A Symbolliste

- α Koefficient
- β Parameterestimat
- γ Psykrometerkonstanten ($66.7 \text{ Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- λ Vands fordampningsvarme (2.465 MJ kg^{-1})
- ρ Luftens massefylde (ca. 1.275 kg m^{-3})
- C Varmeledning til atmosfæren (W m^{-2})
- d Dag i året $d \in \{1 - 365 (366)\}$
- D Tilsat vandmængde til fordampningsmåler (mm)
- e_a Luftens aktuelle vanddamptryk (mb)
- e_s Mættede vanddampes tryk (mb)
- E Fordampning (mm)
- E_a Aktuell fordampning (mm)
- E_l Fordampning fra vejebare lysmetre med kortklippet græs (mm)
- E_{pA} Fordampning beregnet med modificeret Penman-ligning (mm)
- $\overline{E_{pA}}$ Middel for E_{pA}
- E_{pB} Fordampning beregnet efter Penman, men med modelberegnet nettostråling og jordvarmeffluks (mm)
- E_H Fordampning målt med HL315 fordampningsmåler (mm)
- E_M Potentiel fordampning efter Makkink (mm)
- E_P Potentiel fordampning efter Penman (mm)
- $\overline{E_P}$ Middel for E_P
- $f(u)$ Vindhastighedsfunktion
- g_h Ledningsevne for fri varme
- g_w Ledningsevne for vanddamp
- k Korrektionsfaktor
- κ von Karman's konstant (≈ 0.40)
- L_i Langbølget indstråling (W m^{-2})
- L_n Langbølget nettostråling (W m^{-2})

L_u Langbølget udstråling (W m^{-2})
 P Nedbør (mm)
 Q_a Fri varme atmosfæren (W m^{-2})
 Q_E Energi til fordampning (W m^{-2})
 Q_f Energi til fotosyntese eller respiration (W m^{-2})
 Q_i Energi til smeltning af is eller frysning af vand (W m^{-2})
 Q_s Energi til jord, jordvarmeffluks (W m^{-2} , $\text{MJ m}^{-2} \text{ døg}^{-1}$)
 R Afstrømning (mm)
 s Damptrykskurvens hældning ($\text{mb } ^\circ\text{C}^{-1}$)
 ΔS Tilvækst i vandindhold i jord, grundvand m.v. (mm)
 R_n Nettostråling (W m^{-2} , $\text{MJ m}^{-2} \text{ døg}^{-1}$)
 S_i Globalstråling (W m^{-2} , $\text{MJ m}^{-2} \text{ døg}^{-1}$)
 S_n Kortbølget nettostråling (W m^{-2})
 S_u Kortbølget refleksion (W m^{-2})
 T_a Lufttemperatur ($^\circ\text{C}$)
 T_b Bladtemperatur ($^\circ\text{C}$)
 u_z Vindhastighed i højden z (m s^{-1})
 u_2 Vindhastighed i 2 m højde (m s^{-1})
 u_* Friktionshastighed (m s^{-1})
 z Højde over jorden (m)
 z_0 Ruhedslængde (m)

Afdelinger m.v. 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, Postboks 21, 8830 Tjele ..	86 65 25 00
Afdeling for Industriplanter og Frøavl, Ledreborg Allé 100, 4000 Roskilde	42 36 18 11
Afdeling for Sortsafprøvning, Teglværksvej 10, Tystofte, 4230 Skælskør	53 59 61 41
Afdeling for Kulturteknik, Flensborgvej 22, Jydevad, 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, Askov, 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, Amdrupvej 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 Årslev	65 99 17 66
Afdeling for Grønsager, Kirstinebjergvej 6, 5792 Årslev	65 99 17 66
Afdeling for Blomsterdyrkning, Kirstinebjergvej 10, 5792 Årslev	65 99 17 66
Afdeling for Frugt og Bær, Kirstinebjergvej 12, 5792 Årslev	65 99 17 66
Afdeling for Landskabsplanter, Granlidevej 22, Hornum, 9600 Års	98 66 13 33
Laboratoriet for Forædling og Formering, Kirstinebjergvej 10, 5792 Årslev	65 99 17 66
Laboratoriet for Gartneriteknik, Kirstinebjergvej 10, 5792 Årslev	65 99 17 66
Laboratoriet for Levnedsmiddelforskning, Kirstinebjergvej 12, 5792 Årslev	65 99 17 66

Planteværnscentret

Centerledelse, Fagligt Sekretariat, Lottenborgvej 2, 2800 Lyngby	45 87 25 10
Afdeling for Plantepatologi, Lottenborgvej 2, 2800 Lyngby	45 87 25 10
Afdeling for Jordbrugszoologi, Lottenborgvej 2, 2800 Lyngby	45 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	45 87 25 10

Centrallaboratoriet

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