

## Vann i jord, fordamping, transpirasjon, vannhusholdning

Notat til forelesning 14.09.99, O. H. Baadshaug

### Sentrale uttrykk og begreper

Potensiell evapotranspirasjon, summen av fordamping (evaporasjon) fra jorda og fra planter (transpirasjon). Betegnelser:

$ET_0$  (bl.a. i Loomis & Connor, nedenfor ref.: LC)

EP (i grasmodellen fra sommerøvelsene)

- Vanlig definert som evapotranspirasjonen fra en tett grasbestand som dekker jorda fullstendig eller (i US) tett, kort 8-10 cm høgt, bestand av lusern med fullt dekke av blad (Bladarealindeks  $\geq 3$ ) som er optimalt forsynt med vann. Karakteristisk for slike bestand er låg (minimal) aerodynamisk ruhet, som er stabil gjennom veksttida. måles i s.k. evapotranspirometer, dvs. veibart lysimeter, der postene i vannbudsjettet kan måles og kontrolleres med korte mellomrom. Potensiell evapotranspirasjon kan beregnes på forskjellige måter, de best kjente metodene er:
  - Penman (1948), som er mest vanlig i bruk, krever målte døgnverdier for lufttemperatur, nettostråling, vind og (relativ) luftfuktighet (jfr. Sommer-øvelsene).
  - Monteith (1964) er mindre anvendelig siden den krever fastsetting av fordampingsmotstanden nede i plantebestanden,  $r_c$ , og mellom plantebestand og lufta over,  $r_a$ . Metoden brukes derfor mest til forskning.
  - Priestley & Taylor (1972) er den enkleste i bruk, bygger bare på stråling, og krever således ikke måling av vind og luftfuktighet.

Det ble tidligere antatt at evapotranspirasjonen bare var avhengig av bladarealet, slik at en potensiell evapotranspirasjon kunne referere til et hvilket som helst vekstslag. Det er imidlertid klart at transpirasjonen kan variere betydelig mellom ulike grøder, også om bladarealet er likt, pga. variasjon i bl.a. farge, plantehøgde, aerodynamisk ruhet av bestands-overflata og fordampingsmotstanden i bestanden. Potensiell evapotranspirasjon fra det enkelte vekstslag ( $ET^*$ ) kan skrives som en enkel funksjon av referanse-verdien:

$$ET^* = cET_0$$

der  $c$  er en faktor som kan variere i betydelig grad, både mellom ulike arter og gjennom sesongen hos den enkelte arten. Figur 9.3<sup>1)</sup> (LC) viser variasjonen i evapotranspirasjonen gjennom sesongen og i maksimal-nivå for ulike arter med forskjellig utvikling og bestands-struktur.

Aktuell evapotranspirasjon, betegnet  $ET_a$  eller  $E_a$ , kan være mer eller mindre redusert i forhold til  $ET^*$ , avhengig av jordas vannpotensial,  $\psi_s$  og rottybden:

$$ET_a = f(ET^*, \psi_s, \text{Rotd.})$$

<sup>1)</sup>Tallene for  $ET_0$  (=813, osv.) for ulike arter i figuren er 'standard' evapotranspirasjon for veksttida til vedkommende vekstslag.

Andre viktige elementer i vannbudsjettet er:

$E_s^*$  = potensiell evaporasjon fra jord

$E_s$  = evaporasjon (aktuell) fra jord

$E_p$  = transpirasjon fra planter

Evaporasjonen fra jorda,  $E_s$ , er avhengig av nettostrålingen over plantebestanden,  $R_n$ , og andelen av denne som når jordoverflata,  $R_{ns}$ . Denne er igjen er bestemt av bladarealet. Ved betraktning av fordamping fra jorda, ser en ofte bort fra vindleddet eller transportleddet,  $E_t$ , i Penmans formel, dvs. tar med bare strålingsleddet,  $E_r$ , som i middel utgjør ca. 0,7 (70 prosent) av total potensiell evapotranspirasjon (Skjelvåg 1981). Etter dette blir:

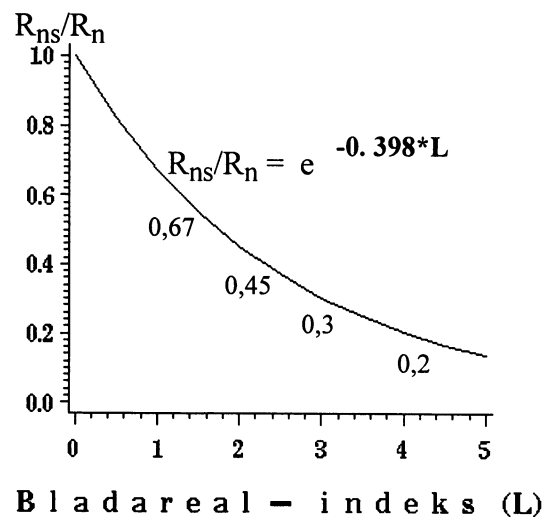
$$E_s = E_r R_{ns}/R_n$$

og:  $R_{ns} = R_n e^{-\omega L}$

Når en setter  $\omega = 0.398$ , blir:

$$E_s = E_r * e^{-0,398L}$$

Nedgangen i  $R_{ns}/R_n$  og dermed i  $E_s$  med stigende bladareal som vist i figuren nedenfor:



Potensiell transpirasjon, fordamping fra plantene,  $E_p$ , vil være «resten» av den potensielle evapotranspirasjonen når fordampinga fra jorda er trukket fra:

$$E_p = ET^* - E_s$$

Potensiell evapotranspirasjon, bestemmes fra Penmans ligning med en lokalt tilpasset vindfunksjon:

$$E_o = ET_o^*$$

Potensiell evaporasjon fra jorda bestemmes i prinsippet som vist i LC, s. 230, men vi benytter, som ovenfor, bare strålingsleddet av  $ET_o^*$ . I sommerøvingene på Vollebekk ble denne ligninga brukt for å estimere potensiell fordamping i sum fra jord og planter :

$$ET_o^* = \frac{\Delta H}{(\Delta + \gamma)} + \gamma f(u)(e_s - e_a)/(\Delta + \gamma) = E_{rad} + E_{adv}$$

eller (LC, s.230, der varmetransporten til eller fra jorda, G, også er regnet med):

$$\begin{aligned} ET_o &= S(R_n + G)/(s + \gamma) + \gamma f(u)(e^* - e_a)/(s + \gamma) \\ &= E_{rad} + E_{adv} \end{aligned}$$

dvs. summen av ett strålingsledd,  $E_{rad}$ , og ett vindledd,  $E_{adv}$ . Den versjonen vi brukte, er altså noe forenklet, siden jordvarmefluksen (G) ikke var regnet med.

Aktuell fordamping fra jord,  $E_s$ .

Fra jordoverflata kan det fordampe bare noen få mm med potensiell intensitet før det øverste sjiktet er så tørt at vanntransporten til overflata, og dermed fordampingen blir redusert. Maksimal total fordamping i denne potensielle fasen, fase 1 av jordfordampinga, U, varierer bl.a. med jordarten. Det samme gjelder parameteren  $\alpha$ , som angir fordampingen, i mm pr. dag i starten av den såkalte fase 2, som inntreffer så snart mengden som kan fordampe i fase 1, dvs U mm, er brukt opp etter siste oppfukning:

Jordart	U, mm totalt	$\alpha$ , mm/dag
sand	6	3,3
siltig sand	7	3,5
sandig lettleire	8	3,7
letteire/sandig mellomleire	9	4,0
mellomleire, siltig mellomleire	10	5,1
siltig lettleire	13	6,0

U er høgt korrelert med leirinnholdet, og kan beregnes:  $U = 8 (0,08 * \text{prosent leire})$ . I Mlingano var leirinnholdet 47 prosent slik at  $U = 8 + 0,08 * 47 / 100 = \underline{11,8 \text{ mm}}$ .

I fase 2 går fordampingen raskt ned med tida. På dag t etter starten kan den beregnes slik:

$$E_s = \alpha t^{1/2} - \alpha(t-1)^{1/2}$$

(Se fig. 9.5 i LC, men bemerk!: nedgangen med tida skal være sterkere enn vist der, fordi det er brukt en annen, og trolig feilaktig, funksjon for  $E_s$ !)

### Utregning av aktuell evapotranspirasjon $ET_a$ ( $E_a$ )

nedenfor bygger på vannbudsjettet for jord/plantebestand, som er vist skjematisk i figur 9.1 fra LC.

Som eksempel er brukt beregnet vassbudsjett for 1987 i Mlingano i Tanzania, 6 °N, 130 m o.h., og mais, som er aktuell for dyrking der, er brukt som modell-grøde<sup>1)</sup>. Veksttida starter med regntida som er en betingelse for nødvendig jordfuktighet for spiring og vekst. Akkumuleringen av vann i jorda, som på denne tida er helt uttørket etter tørketida, er ikke proporsjonal med kumulativ nedbør, først og fremst fordi en del av nedbøren renner av på overflata. Overflateavrenningen kan beregnes ut fra jordart og regnintensiteten, dvs. mm nedbør i hvert regnvær.

Bladarealindeksen bestemmes ut fra fysiologisk alder, men er også avhengig av sort og plantetetthet:

$$LAI = f(\text{fysiol. alder, sort, pl./m}^2)$$

Alderen beregnes ut fra en særskilt varmesum-betraktning bygd på døgnmiddel (t) basistemperatur 10 °C :

$$\text{'fysiologisk dag'} = \sum(t - 10) / 21$$

Utviklingsfarten, dvs. endringen i fenologisk utviklingssteg pr dag, 1/d, som er 'frikoplet' fra bladdanning, er funksjoner av temperaturen (noe forskjellige for ulike faser, se kompendiet 'Ytre faktorer og plantevekst'), slik at heltalls verdier av  $\sum 1/d$ , svarer til lett observerbare stadier:

<u>Stadium</u>	<u><math>\sum(t - 10)</math></u>	<u><math>\sum 1/d</math></u>
Spiring	= 90	
Blomsterinitiering	= 800	1
Avblomstring	= 1090	2
Modning	= 1400	3

Rotdybden (RD) er også en enkel, lineær temperaturfunksjon:

$$\begin{array}{ll} \sum(t - 10): & \leq 230 & RD = 20 \text{ cm} \\ & \leq 1095 & RD = \text{jamt økende} \\ & > 1095 & RD = 70 \text{ cm} \end{array}$$

Framtidig vannkapasitet (FVK) er plantetilgjengelig vann i jorda mellom aktuell og maksimal (70 cm) rotdybde.

Lett tilgjengelig vann, LTV er en funksjon rottybden og av jordas pF-kurve, som igjen bestemmes av mekanisk sammensetning og innhold av organisk materiale:

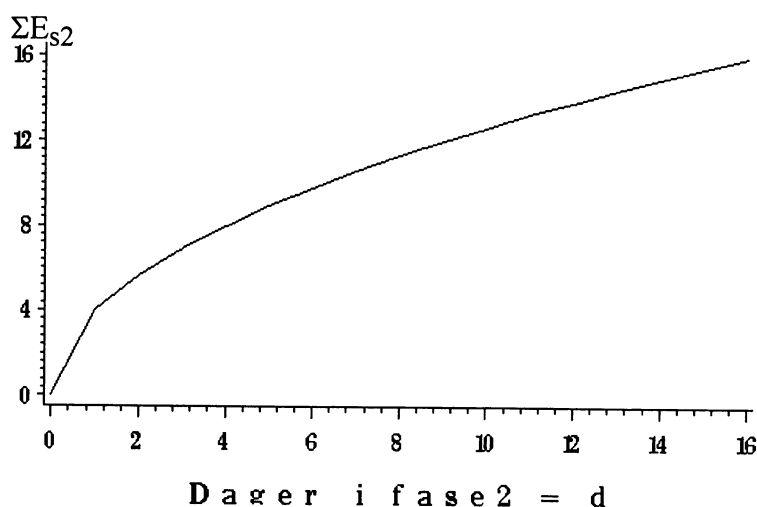
$$LTV = f(\text{mek.sammensetn., org matr., RD}) \quad 2 < pF < 3$$

liksom tungt tilgjengelig vann, (TTV):

$$TTV = f(\text{mek.sammensetn., org matr., RD}) \quad 3 < pF < 4.2$$

<sup>1)</sup> Resultatet av beregningene er vist i vedlagte figurer.

Total samlet fordamping utover i fase 2,  $\Sigma E_{s2}$ , vil derfor øke med avtakende hastighet etter en logaritmisk kurve, når antall dager etter starten av fasen er abscisse, som vist i figuren nedenfor:

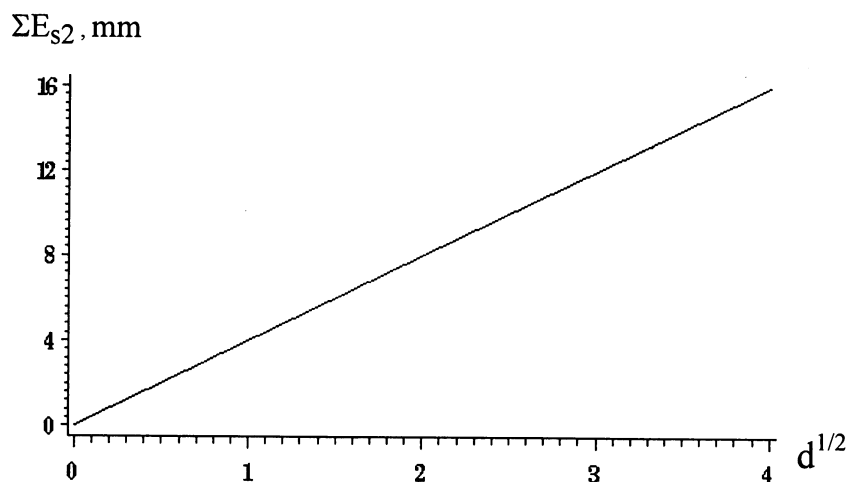


Bruker en istedet roten av antall dager i fase 2,  $d^{1/2}$ , som abscisse får en ei rett linje (se figur nedenfor), siden den funksjonelle sammenhengen er slik at beregnet dagnr,  $d$ , i fase 2 er:

$$d = (\Sigma E_{s2}/\alpha)^2$$

som gir:

$$\Sigma E_{s2} = \alpha d^{1/2}$$

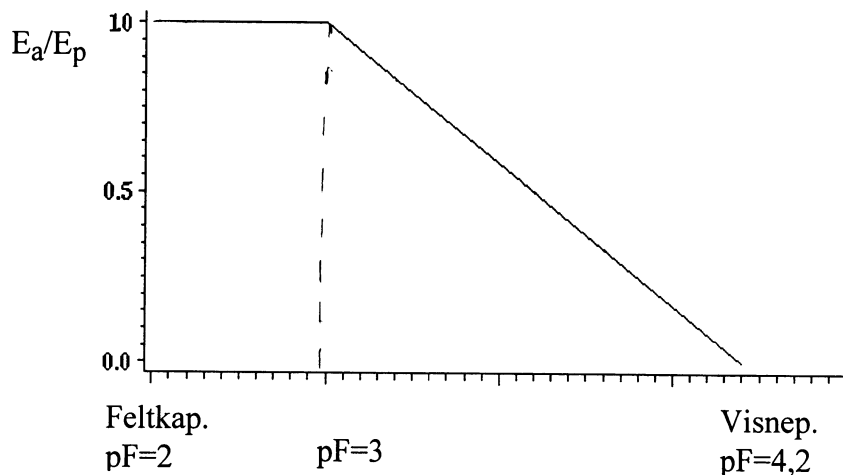


Potensiell evapotranspirasjon fra planter,  $E_p$  ( $E_{pp}$  i øvingsmodellen) regnes ut som differensen mellom potensiell evapotranspirasjon (e. Penmans ligning) og potensiell evaporasjon fra jorda:

$$E_p(E_{pp}) = ET_o^* - E_s^*$$

og er gitt ved området mellom de to nederste kurvene i Mlingano-figuren. Jfr. også figur 9.14 i LC. Av den siste figuren går det fram at transpirasjonen fra bestand av bomull og sorghum i tidlig utvikling øker med bladarealet og når potensielt nivå ved en bladareal-indeks på ca. 3. Dette grense-nivået er funnet også i andre vekstslag, og en videre økning av bladarealet synes ikke å føre til vesentlig økt transpirasjon.

Aktuell fordamping fra planter beregnes med utgangspunkt i figuren nedenfor for forholdet mellom aktuell og potensiell fordamping,  $E_a/E_p$ , og vannpotensialet i jorda gitt ved pF:



Vi tar altså ikke hensyn til at  $E_a/E_p$  varierer med hvor høg den potensielle fordampinga er, slik det er illustrert i figur 9.7 i LC. Dessuten lar vi den aktuelle fordampinga bli redusert i forhold til potensielt nivå ved et høgere vannpotensial, dvs. ved mindre uttørking av jorda, enn det som går fram av figur 9.8. (LC, s. 235). Ifølge denne holder evapotranspirasjonen (både hos hvete og soyabønner) seg oppe til om lag 75 prosent av plantetilgjengelig vann i jorda er brukt opp, mens den etter figuren ovenfor vil begynne å avta allerede etter at ca. 30 prosent er oppbrukt.

### $E_a/E_p$ og planteproduksjon.

Effektiviteten i plantenes utnyttelse av vannet i produksjonen uttrykkes til vanlig ved den såkalte transpirasjonskoeffisienten, eller på engelsk 'water use efficiency', WUE, og måles i kg vann som er gått med til evapotranspirasjon pr. kg produsert tørrstoff.

Figur 9.19a viser forholdet mellom tørrstoffproduksjonen i plantebestanden og total transpirasjon under perioden fra starten av knollutvikling hos potet. På dette stadiet er potetriset fullt utviklet, slik at det meste av evapotranspirasjonen går via bladverket og mengden vann som forsvinner direkte fra jorda er minimal. Produksjonen er tilnærmet proporsjonal (dvs. stiger rettlinjet) med transpirasjonen fra 0-nivå ved startpunktet. Stigningen på kurvene, dvs. transpirasjonskoeffisienten eller 'Water use efficiency' varierer noe fra år til år. Av kurven for 1976 kan en lese en endelig tørrstoffproduksjon på ca. 17 tonn pr ha. Til dette er gått med en mengde transpirasjonsvann tilsvarende 350 mm, dvs.  $0,35 \text{ m} \times 10000 \text{ m}^2 = 3500 \text{ m}^3$  eller 3500 tonn pr. ha. Dette gir en transpirasjonskoeffisient eller WUE på  $3500/17 \approx 200 = (E_{\text{rad}} + E_{\text{adv}}) \text{ kg vann/ kg produsert tørrstoff}$ .

Figur 9.20 gir et tilsvarende bilde for solvendel, men her fra starten av vekstsesongen, slik at den første delen uten eller med bare delvis utviklet bladverk også er med. Kurvene skjærer da en del av x-aksen, som (i noen grad) er et uttrykk for mengden vann som fordampes direkte fra jorda. Denne delen av den totale evapotranspirasjonen er størst ved hyppig vatning (kurve 1,2,3), fordi jorda da relativt ofte er fuktet til overflata, noe som fører til fordamping med potensiell intensitet, dvs. i fase 1 (se ovenfor). Tilsvarende betraktning som for potet ovenfor for vannet solvendel (1,2,3)

gir 11 tonn tørrstoff ved 650 mm total evapotranspirasjon, eller en transpirasjonskoeffisient på ca. 600 kg vann/kg tørrstoff.

### Sensitivitetsparameteren $\lambda$ .

Det har vært vanlig å regne med at reduksjonen i plantenes tørrstoffproduksjon ved større eller mindre tørkestress ( $Y$ ) forhold til produksjonen ved optimal vannforsyning ( $Y_0$ ) er den samme som relativ reduksjonen i evapotranspirasjonen:

$$Y/Y_0 = E_p/E_p^*$$

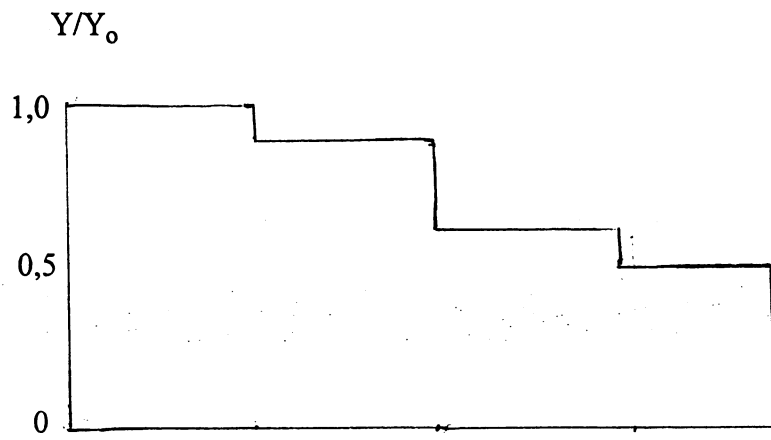
Plantene kan imidlertid ha forskjellige strategier for, i hvert fall i noen grad, til å holde oppe produksjonen også under tørkestress. Dette gjelder rimeligvis i svært begrenset grad bruttoassimilasjonen, som er avhengig av åpne spalteåpninger, men kan gjelde nettoproduksjonen, og ikke minst fordelingen av assimilater til og vekst av overjordiske plantedeler, og herav deler og organer som kan høstes og utnyttes. For slik deler ( $Y$ ) av totalproduksjonen vil derfor gjelde at:

$$Y/Y_0 = (ET_a/ET_p^*)^\lambda$$

der  $\lambda$ , en faktor som uttrykker følsomheten for tørkestress i vedkommende del av produksjonen, kan variere mellom 0 og 1. Ved maksimal følsomhet er  $\lambda = 1$ , dvs. produksjonsreduksjonen lik reduksjonen i evapotranspirasjon. Er  $\lambda = 0$  vil det si at produksjonen er uavhengig av tørkestress. I mange forsøk er det vist at virkningen av tørkestress på størrelsen av sluttproduktet varierer etter hvilken vekstfase stresset inntreffer. Kornartene kan f.eks. være spesielt følsomme for tørke omkring aksskyting (se figur 9.12 LC, s 243). For mais er det fastsatt verdier av  $\lambda$  for 4 ulike faser i utviklingen fra spiring til modning (LC, tabell 14.4, s 385). Virkningen på sluttproduktet beregnes ved kumulativ multiplisering (uttrykt ved  $\Pi$ , som er analogt med tegnet  $\Sigma$  for summering) av effekten av tørkestress i hver av de 4 fasene (fra  $i=1$  til  $i=4$ ):

$$Y/Y_0 = \Pi(ET_a/ET^*)^{\lambda_i}$$

Om en antar at tørkestresset, uttrykt som  $ET_a/ET^*$  er hhv. 1, 0.8, 0.5 og 0.3 i de fire fasene, blir resultatet:



Fase	1	2	3	4
$ET_a/ET^*$	1	0,8	0,5	0,3
$\lambda$	0,25	0,5	0,5	0,21
$(ET_a/ET^*)^\lambda$	1	0,89	0,71	0,77
$Y/Y_0$	1	0,89	0,63	0,49