

# Nye målinger af overfladespecifik fordampning

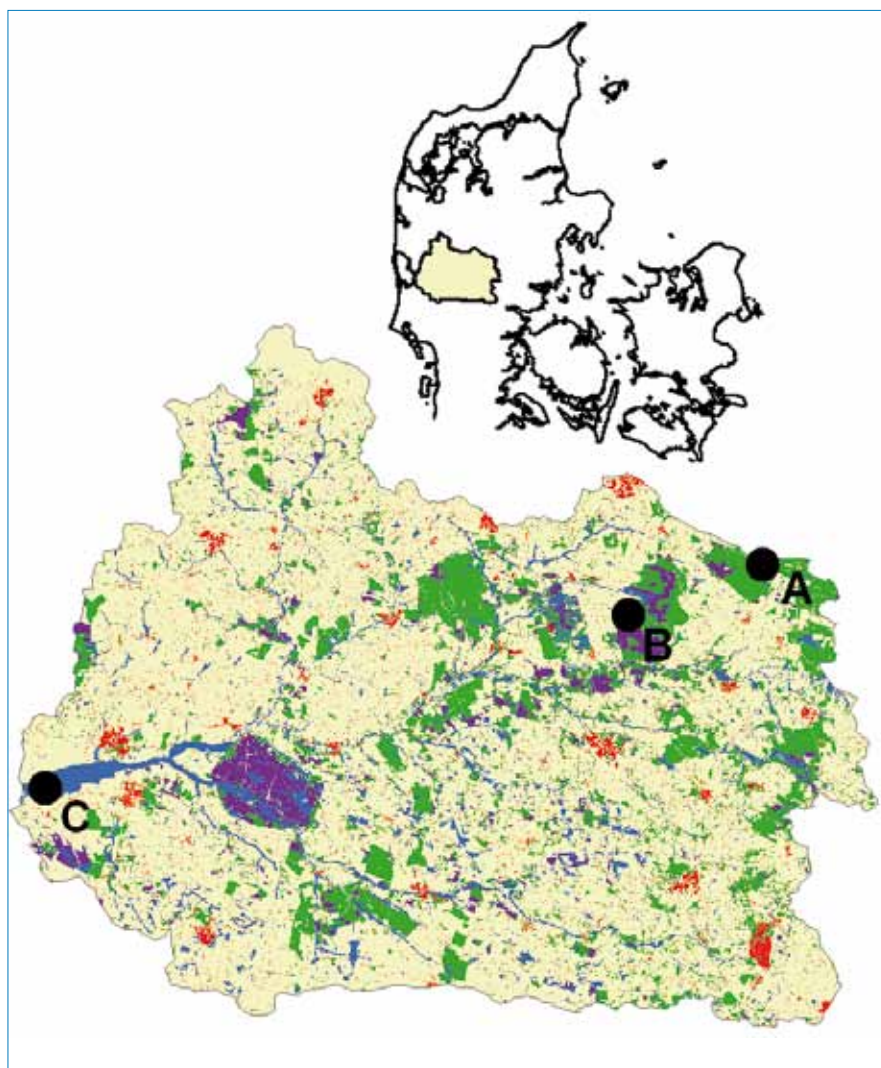
En overflades beskaffenhed kan have stor betydning for den årlige fordampningssum. Her præsenteres nye langtidsmålinger af aktuel fordampning over landbrug, skov og våde enge i Skjern Å's opland i Vestjylland. Målingerne giver en unik mulighed for at se på forskellene i fordampningsraterne, og for at kaste et kritisk blik på den udbredte brug af Makkink's formel til beregning af fordampning i Danmark.

RASMUS RINGGAARD, MATHIAS HERBST  
& THOMAS FRIBORG

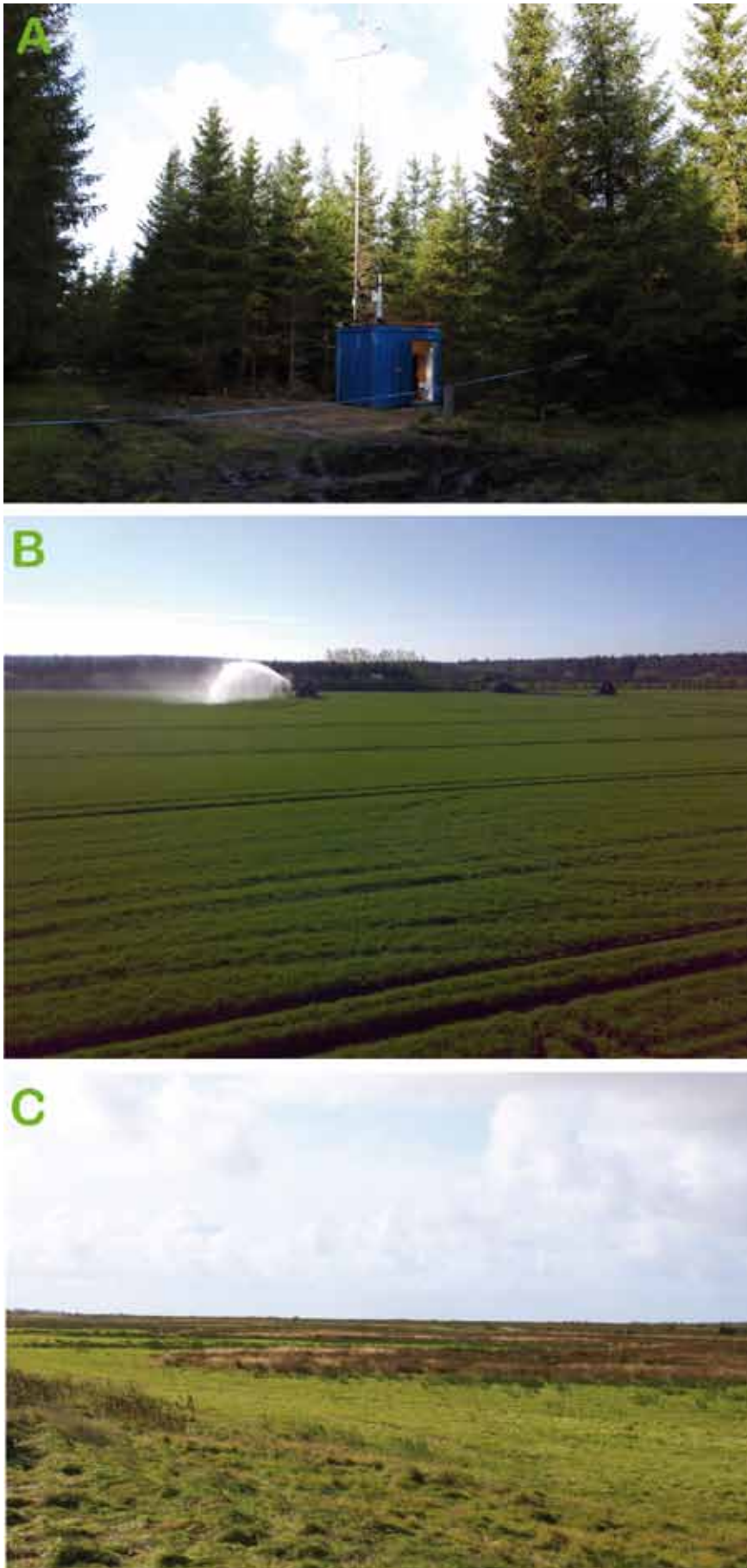
Vandbalancemodeller er et grundlæggende værktøj inden for hydrologien. Moderne computerbaserede modeller som "DK-Modellen" /1/ bruges til så forskellige formål som opgørelse af drikkevandsressourcer, beregning af næringsstofudvaskning og vurdering af oversvømmelsesrisici. Fordampning er sammen med nedbør de to parametre, der er størst usikkerhed omkring i forhold til vandbalanceberegninger og hydrologisk modellering. Dermed er det stadig af afgørende betydning, at få en bedre forståelse for hvordan forskellige overfladetyper regulerer fordampningen. I slutningen af 2008 installeredes i regi af HOBE (www.hobe.dk) mikroklima målestationer på de tre vigtigste overfladetyper i Skjern Å's opland. Den samlede energibalance for årene 2009 til 2011 foreligger nu.

## Energibalance og fordampning

For at forstå hvorfor forskellige overflader fordamper med forskellige rater, er det nødvendigt at se på energibalancen /Boks 1/. Energibalanceligningen foreskriver, at den totale mængde strålingsenergi der er tilgængelig på en overflade, skal være lig med summen af den energi der bruges til fordampning, og den energi der bruges til at varme henholdsvis luften og jorden op. Energibalancen beskriver altså hvor meget energi der i alt er



Figur 1. Placeringen af de tre målestationer i Skjern Å's opland. [A] Gludsted Plantage, [B] Voulundgård, [C] Skjern Enge.



Figur 2. De tre overfadede typer. [A] Gludsted Plantage. [B] Voulundgård. [C] Skjern Enge.

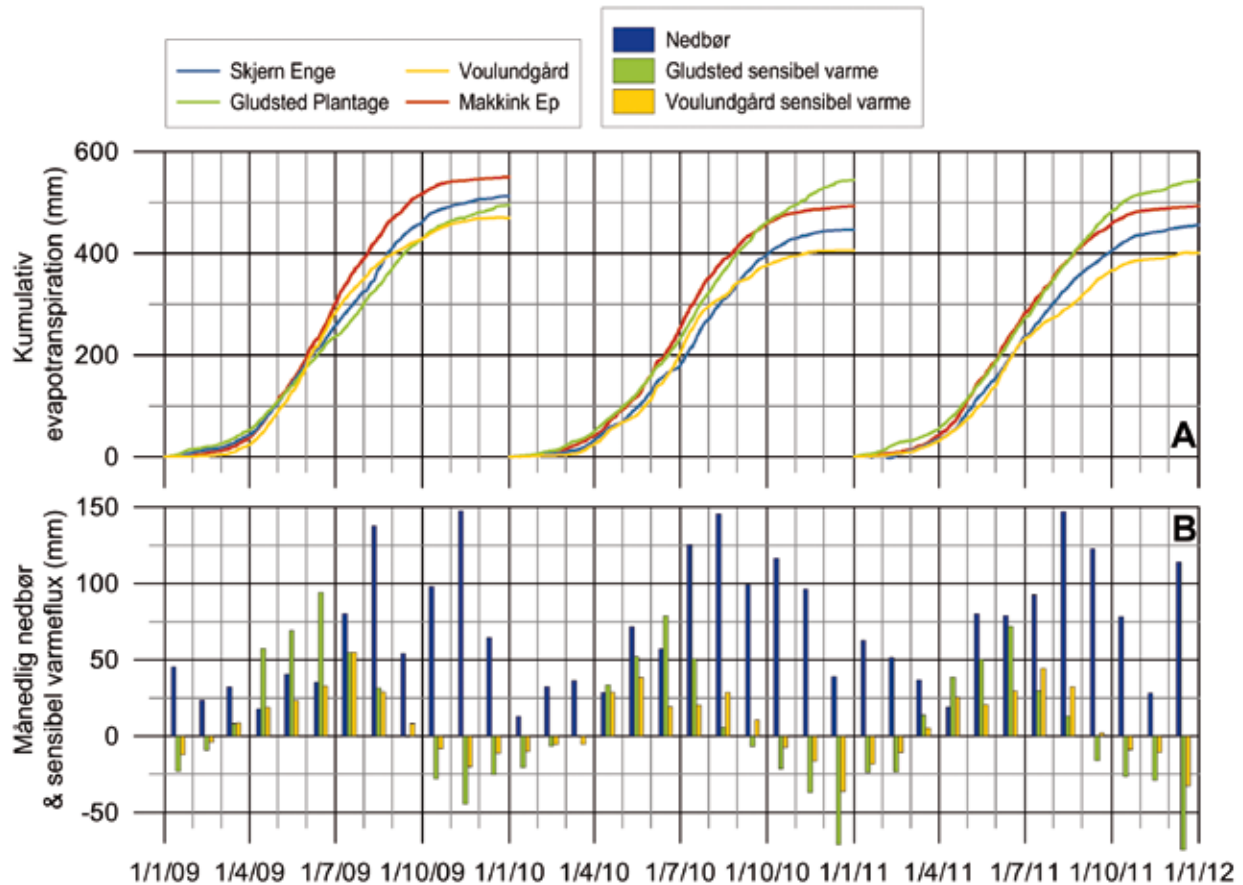
til rådighed, og sætter dermed også en øvre grænse for den maksimale mængde vand der kan fordampe. Denne fordampningsrate kaldes den potentielle fordampning eller referencefordampningen. Fordampningen over en overflade vil som udgangspunkt følge den indkomne strålingsenergi, men hvor stor en del af energien der går til fordampning versus til opvarmning af jord og luft, vil variere afhængig af overfladetype og vandtilgængeligheden /Boks 2/. Den i Danmark så ofte benyttede Makkink formel følger da også det princip, at lade fordampningen være begrænset af den tilgængelige energi fra stråling /2,3/.

#### Måleområde

De tre måleområder ligger alle inden for Skjern Å's nedbørsopland /Figur 1/. Skovlokaliteten er placeret i Gludsted Plantage i oplandets østlige del /Figur 2a/. Plantagen der med en udstrækning på ca. 3500 ha er et af Danmarks største sammenhængende skovarealer, består hovedsagligt af rødgran af varierende alder. Jorden er grovsandet med nogle større sten. Landbrugslokaliteten "Voulundgård" ligger også i oplandets østlige del /Figur 2b/. Det er en stor bedrift med svinehold, og markerne omkring målemasten var alle tilsåede med vinter- og vårbyg til foderbrug i måleperioden. Jorden er grovsandet med en typisk organisk beriget horisont øverst. Vådengelokaliteten "Skjern Enge" ligger nær Skjern Å's udløb i Ringkøbing fjord, og er en del af det genoprettede vådområde i Skjern Ådal /4/ /Figur 2c/. Den tætte geografiske placering af de tre målestationer betyder, at parametre som nedbør, solstråling og temperatur kun varierer lidt mellem lokaliteterne og, at dataserierne derfor er meget velegnede til at analysere den lokale overflades betydning for energibalance og fordampning.

#### Måleteknik

Fordampningsraterne på alle tre lokaliteter er målt med den såkaldte eddy-kovarians teknik. Metoden fungerer ved at man med høj frekvens samtidig måler luftens vertikale bevægelse og vanddampsindhold. Således får man en direkte og uafhængig måling af den samlede fordampning over en overflade. I Gludsted Plantage er der i tillæg målt på de enkelte fordampningskomponenter. Transpiration er målt ved hjælp af prober der måler saftstigningen i træstammerne, jordfordampning fra skovbunden er målt ved hjælp af bakker med mos hvor vægttabet er registreret, og nettonedbør under træerne (og dermed interceptionstab) er målt med



**Figur 3 [A]** Den kumulerede målte årlige fordampningsrate for Gludsted Plantage, Voulundgård og Skjern Enge samt den potentielle fordampningsrate estimeret ved hjælp af Makkink's formel. **[B]** Månedlig nedbørssum målt ved Gludsted Plantage samt den månedlige sum af sensible varmeflux omregnet til mm vandækvivalent over Gludsted Plantage og Voulundgård. Positive værdier af varmeflux betyder at tab af varme fra overfladen til atmosfæren, mens negative værdier betyder en tilførsel af varme til overfladen.

tagrender der er forbundet med automatiske nedbørsmålere.

## Resultater

### Årsummer

Den årlige fordampningsrate ligger i størrelsesorden 400-550mm for alle overflader / Figur 3a/. Det stemmer pænt overens med tidligere målinger i Vestjylland, og er også samme størrelsesorden som man får med den simple Makkink fordampningsformel. Sammenlignes de tre år er der imidlertid store forskelle. I 2009 fordampede engene og landbruget mere end i 2010 og 2011, mens det modsatte var tilfældet for skoven. Dette er et direkte resultat af overfladens betydning for fordampningsprocesserne. 2009 var et relativt tørt og solrigt år og havde dermed megen strålingsenergi, mens 2010 og 2011 var normale år målt på nedbørsmængder og strålingsenergi. I skoven giver interceptionsfordampning (/Boks 2/) høje fordampningsrater i normale år. For de kunstvandede landbrugsarealer og de våde enge er transpiration mere afgørende og giver høj fordampning i det tørre år, hvor der er basis for større fotosyntese. Den store betydning af

### Boks 1

Energibalancen bygger på den fundamentale fysiske lovmæssighed at den samlede mængde af energi er konstant. En overflades netto strålingsenergi [ $R_n$ ] (positiv eller negativ) må modsvares af de tre komponenter (positive eller negative) opvarmning/nedkøling af luften over overfladen [ $H$ ], fordampning/kondensation af vand [ $E$ ], opvarmning/ nedkøling af jorden under overfladen [ $G$ ] og  $\Delta S$  er magasinændringer som på årsbasis er små, men kan have betydning for døgnvariationen i skove.

$$R_n = H + E + G + \Delta S$$

Således vil en stor nettostråling fx på en skyfri sommerdag skulle modsvares af en stor sum af luftopvarmning, jordopvarmning og fordampning. Hvordan energien fordeler sig mellem disse tre komponenter afhænger af overfladens beskaffenhed. Typisk vil der en varm sommerdag være relativt køligt over en grøn mark, hvor meget energi går til fordampning og lidt til luftopvarmning, mens der vil være relativt varmt i byen hvor kun lidt energi går til fordampning fra de tørre gader og hustage og meget energi derfor må gå til luftopvarmning. Når en overflade er våd (fx en trækrone i regnvej), kan fordampningen blive så stor at omgivelserne nedkøles (negativ  $H$  eller horisontal varmetilstrømning) og  $E$  kan dermed blive endda større end  $R_n$ .

**Tabel 1.** Fordampningens komponenter som blev direkte målt i Gludsted Plantage. Interceptionsfordampningen udgjorde lidt over 50% af den totale fordampning i både 2010 og 2011. Til sammenligning udgjorde transpirationen kun godt 35%. Den forblivende procentdel tilskrives jordfordampning. /5,6/

	Total evapotranspiration (mm)	Interception (mm)	Transpiration (mm)
2010	537	281 (52%)	189 (35%)
2011	531	281 (53%)	-

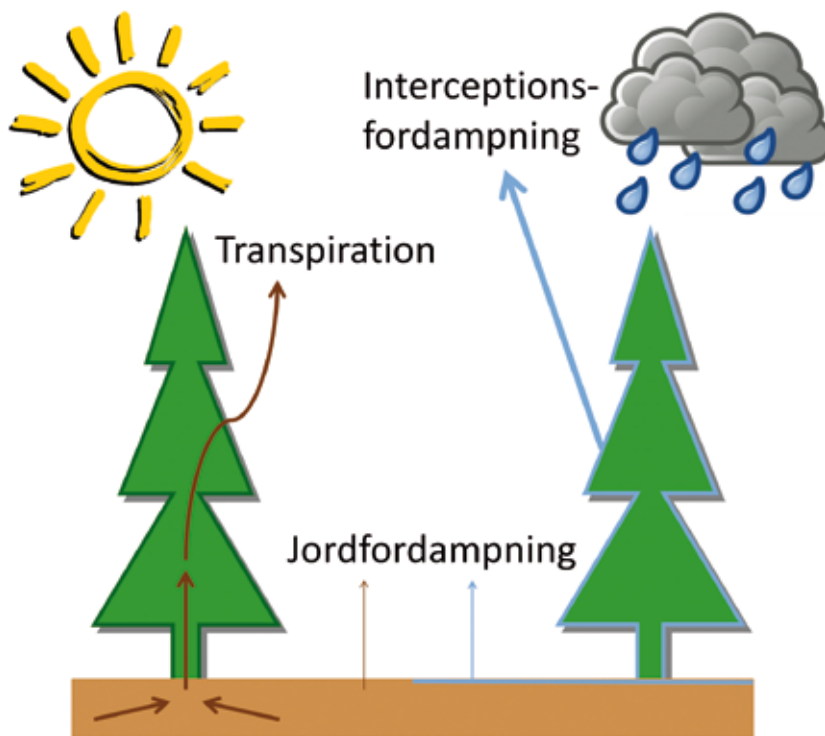
interceptionsfordampning i nåleskoven understreges også af målingerne af de individuelle fordampningsparametre /tabel 1/. I skoven udgør interceptionsfordampning mere end halvdelen af den totale årsfordampning i normale år, men transpiration kun udgør omkring en tredjedel.

#### Sommerfordampning

I tørre perioder om sommeren fordamper landbruget og de våde enge med en højere rate end skoven, hvilket især var tydeligt i det tørre og varme 2009. Forskellen kan til dels tilskrives at engene og landbruget har næsten ubegrænset vandtilførsel (naturlig og kunstvand) mens skoven kan tørre ud. Men lige så vigtig er en plantefysiologisk forskel mellem græs og landbrugsafgrøder og de høje nåletræer. Hvor landbrugsafgrøder typisk vil fordampe fuldt ud og udnytte hele den potentielle fordampningsrate på en varm sommerdag, vil grantræerne begynde at lukke stomata og begrænse fordampningen hvis luften bliver for tør, blandt andet for at undgå lokal udtørring i grene og nåle. Det er en effekt der især er tydelig i maj-juni-juli 2009, hvor fordampningen fra skoven er stærkt begrænset grundet usædvanlig varm og tør luft og ringe nedbør. Denne effekt er helt uafhængig af hvor meget vand der er i jordvandsmagasinet. Til gengæld er interceptionsfordampning i skoven ikke berørt af denne begrænsning og kan blive større end transpirationen i en våd sommer (tabel 1). Den samlede skovfordampning om sommeren kan derfor alligevel nå helt op til den potentielle rate når trækroneerne er våde af regn eller dug.

#### Vinterfordampning

Engene og landbruget har meget lave vinterfordampningsrater, hvilket stemmer godt overens med den tilgængelige energi jævnfør



**Figur 4.** De tre fordampningsprocesser der tilsammen udgør evapotranspirationen.

Makkink. Skoven derimod har relativt høje fordampningsrater om vinteren, ofte flere gange den tilgængelige strålingsenergi. Forklaringen på dette umiddelbart paradoksale resultat kan ses i /Figur 3b/. I månederne oktober til februar ses en kraftig nedadrettet (negativ) sensibel varmeflux for Gludsted Plantage. Skoven får altså varme tilført fra luften, som i praksis fjerner den energibegrænsning på fordampning som den lave strålingsenergi giver. Alle tre lokaliteter viser negativ varmeflux i vintermånederne. Det er et resultat af en stor-skala varmeadvektion fra det relativt varme Vesterhav til den relativt kolde jordoverflade. Det er en effekt der også er observeret i andre kystnære egne /7/ og som sådan kan opfattes som en generel egenskab ved maritime klimaer. Fordi skoven grundet trækroneernes store overfladeareal har en betydeligt større nedbørsinterception end landbruget og engene, bliver også en større del af den tilgængelige varmeenergi brugt til at fordampe regn og sne direkte fra vegetationens overflade.

#### Diskussion

##### Betydning for brug af Makkink's fordampningsformel

Makkink's formel bruger den tilgængelige strålingsenergi sammen med temperaturen til at drive fordampningen. Det fungerer ifølge denne undersøgelse godt for landbrugsafgrø-

der og for naturlige græsoverflader. Men for nåleskoven er situationen anderledes. Om sommeren følger fordampningen ikke indstrålingen grundet nåletræernes vandbesparelsesreaktion på varme dage med stort fordampningspotentiale. Om vinteren overstiger fordampningen langt energien fra indstrålingen, hvilket muliggøres af tilførsel af varmeenergi fra luften. Ingen af de to situationer fanges med Makkink's formel, og brug af Makkink for skove i vandbalancemodeller /3/ er i bedste fald problematisk.

##### Bedre modeller

Hvis fordampning fra nåleskove skal modelleres bedre er det nødvendigt, at inkludere en plantefysiologisk beskrivelse der kan simulere vandsparereaktionen om sommeren. Dette kan være med til at sænke de modellerede fordampninger fra nåleskove, og måske være med til at ændre vores opfattelse af skoves betydning for den lokale vandbalance. Over skove er det også nødvendigt at løfte energibegrænsningen, og at modellere interceptionsfordampningen på en måde så den kan overstige den tilgængelige strålingsenergi. Dermed kan man måske også løse et tilbagevendende problem i flere af de store vandbalancemodeller, nemlig at modellerne indeholder for meget vand i vintermånederne.

##### Skovrejsning og grundvandsdannelse

**Boks 2.**

Den samlede fordampning fra en overflade kan opdeles i tre delprocesser – jordfordampning, interceptionsfordampning og transpiration / figur 4/. Jordfordampning er fordampning af vand direkte fra jordoverfladen og det øverste jordlag. Interceptionsfordampning er fordampning af regnvand fra de våde blade og grene på vegetationen. Transpiration er fordampning gennem de mikroskopiske spalteåbninger – stomata – på bladene på den grønne vegetation. Planter åbner stomata for at kunne optage CO<sub>2</sub> fra atmosfæren der bindes gennem fotosyntesen, men samtidig tabes der vand fra bladets indre til atmosfæren. Den relative størrelse af de tre processer varierer meget fra overflade til overflade og fra årstid til årstid. I skove er interceptionsfordampningen en af de vigtigste processer grundet det meget store overfladeareal træernes kroner udgør, mens transpiration typisk er den vigtigste proces for landbrugsafgrøder der har en relativt stor tilvækst i vækstperioden.

Tidligere studier i Danmark har vist, at i områder i Jylland med relativ høj nedbør og sandede jorde, fordamper nåleskov op til 200mm mere end landbrug per år, og løvskov op til 100mm mere end landbrug per år /8/. På lerede jorde på Sjælland fordamper løvskov omtrent det samme som landbrug /9/. Det har resulteret i en generel konsensus om, at anbefale at rejse løvskov til beskyttelse af vandindvindingsområder, og så vidt muligt undgå nåleskov da det kan føre til en væsentlig reduktion af grundvandsdannelsen.

De hidtidige resultater fra Jylland /8/ er delvist baseret på modelberegninger, og de direkte målinger vi har præsenteret i dette studie tegner et mere nuanceret billede. Gennemsnitligt fordamper nåleskoven stadig mere på årsbasis end landbruget, men variationen fra år til år er meget stor. I tørre år fordamper skoven væsentligt mindre end i våde år, og ligner da de andre overfladetyper mht. vandforbruget. Således følger fordampningen i skoven i høj grad nedbørsmængden, hvilket

giver en relativ stabil grundvandsdannelse, og kan være med til at sikre et jævnt afstrømningsmønster i nærliggende vandløb.

**Konklusion**

Fordampningsprocesserne fra nåleskov i Vestjylland er markant forskellig fra fordampningsprocesserne fra landbrug samme sted. Hvor fordampningen fra landbrug primært følger den tilgængelige energi fra strålingsbalancen følger fordampningen fra skoven primært nedbøren, og er ikke begrænset af strålingsenergien. Det anbefales at erstatte de meget benyttede energibegrænsede fordampningsmodeller over skove med fysisk mere realistiske beskrivelser, der tager hensyn til de enkelte hydrologiske processer der styrer skovfordampningen.

**Referencer**

- /1/ Højberg A.L., Trolborg L., Nyegaard P., Ondracek M., Stisen S., Christensen B.S.B, Dk-model2009 – Sammenfatning af opdateringen 2005 – 2009. Geus rapport 2010/81, København. [http://vandmodel.dk/xpdf/dk-model2009\\_sammenfatning.pdf](http://vandmodel.dk/xpdf/dk-model2009_sammenfatning.pdf)
- /2/ Scharling, M. 2001. Klimagrid: Danmark. Sammenligning af potentiel fordampning beregnet ud fra Makink's formel og den modificerede Penman formel. DMI Tech. Rep. 01-19. Danish Meteorol. Inst.
- /3/ Grant, R., Blicher-Mathiesen, G., Andersen, P.M. 2009. Ny lokal beregning af nettonedbør. Vand & Jord, 3. August 2009.
- /4/ Herbst, M., Ringgaard, R., Friborg, T., Søgaard, H. 2009: Forøger vådområder den globale opvarmning?. Vand og Jord, 3. August 2009.
- /5/ Ringgaard, R., Herbst, H., Friborg, T., 2012: Partitioning of forest evapotranspiration: The impact of edge effects and canopy structure. Agric. For. Meteorol. 166-167:86-97.
- /6/ Ringgaard, R., 2012: On variability of Evapotranspiration: The role of surface type and vegetation. PhD afhandling i geografi. Naturvidenskabeligt fakultet, Københavns Universitet.
- /7/ Harding, R.J., Lloyd, C.R. 2008: Evaporation and energy balance of a wet grassland at Tadham Moor on the Somerset Levels. Hydrol. Proc. 22:2346-2357.
- /8/ Gundersen, P. og Bastrup-Birk, A. 2003: Skove ændrer vandkredsløbet. Vand og Jord, 4. December 2003.
- /9/ Ladekarl, U.L., Beier, C., Dellwik, E. 2005: Fordampning fra landbrug og skov. Vand og Jord, 2. Maj 2005.

RASMUS RINGGAARD har en PhD i geografi fra København Universitet, og har forsket og undervist inden for overfladehydrologi og klimatologi. Rasmus arbejder i dag som hydrolog hos Orbicon A/S. [rasr@orbicon.dk](mailto:rasr@orbicon.dk)

MATHIAS HERBST, PhD, er biolog og arbejder med vegetationens vand- og kulstofbalance. Mathias er ansat som seniorforsker ved Universitet Göttingen (Tyskland), afdelingen for bioklimatologi. [mherbst@gwdg.de](mailto:mherbst@gwdg.de)

THOMAS FRIBORG er lektor, PhD, i geografi ved Københavns Universitet. Thomas underviser og forsker indenfor emnerne overflade hydrologi og klimatologi bl.a. i regi af HOBE, Center for Hydrologi. [tfj@geo.ku.dk](mailto:tfj@geo.ku.dk)