

Fra boringsdatabasen "JUPITER" til DK-grund



Hans Jørgen Henriksen

Danmarks forsyningssituation med ferskvand er enestående, den er baseret på grundvand med hele 99%. Vi har i Danmark en decentral forsyningsstruktur, med ca. 3000 vandværker og knap 100.000 enkeltboringer. Det grundlæggende princip er, at vandet skal kunne pumpes ud til forbrugerne uden nogen videre form for avanceret rensning. Den samlede vandindvinding udgør i dag ca. 0.7 km³/år eller omtrent 700 milliarder liter ferskvand (16 mm/år hvis vi fordeler det jævnt ud over hele landet). Heraf går godt 1/3 til husholdninger; industri og institutioner forbruger knap 1/3 og markvanding den sidste 1/3; sidstnævnte dog med stor variation fra år til år, afhængigt af den aktuelle nedbør.

Det regner tit i Danmark. I Sydvestjylland ca. 1000 mm pr. år, på øerne ca. 600 mm pr. år, altså svarende til en meget større vandmængde, end vi henter op til drikkevandsformål fra undergrunden. Det kan ud fra disse tal umiddelbart være svært at forstå, at vi ikke skulle have rigeligt med vand, til at

dække vore egne og vore børnebørns behov for rent drikkevand. Ikke desto mindre har vi allerede i dag problemer med "vand nok" i en række områder. Vi har blot endnu ikke erkendt, at det forholder sig sådan. Grunden til at vi er havnet i denne ressource knaphed, vil blive illustreret med en metafor: "en 3-trins løfteraket".

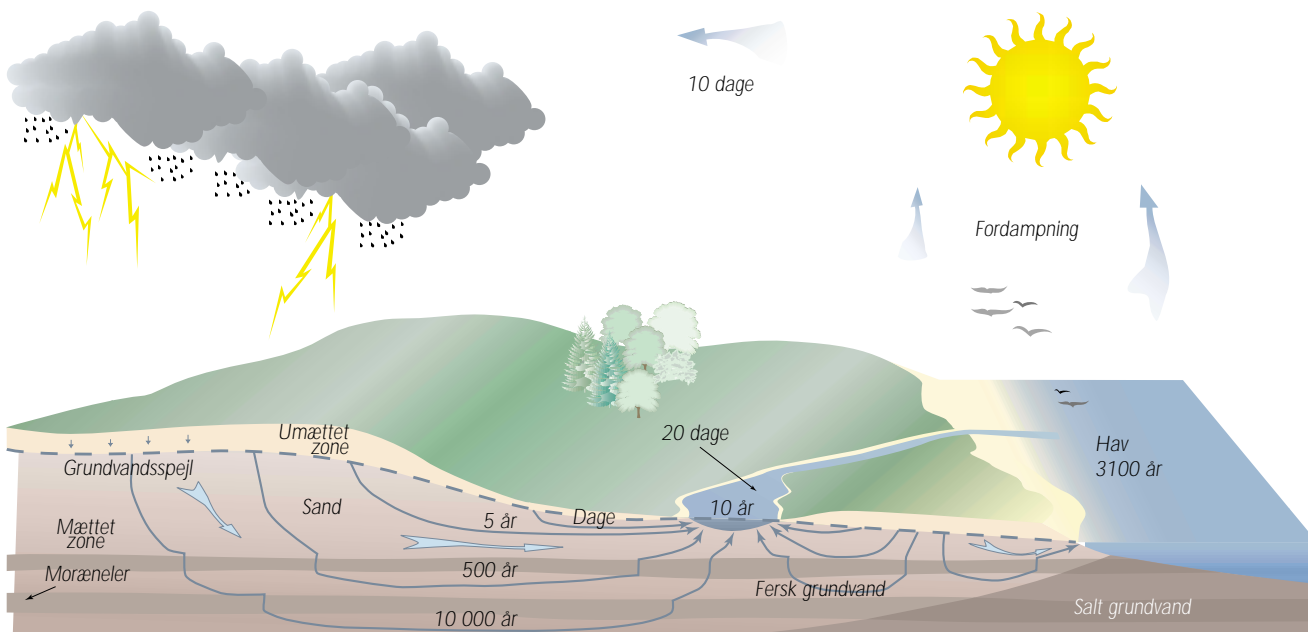
1. trin i løfteraketten og tab af ressource skydes af i forbindelse med at en væsentlig del af nedbøren "forsvinder op i den blå luft", som fordampning fra vegetation og overflader. Data fra pejlestationer tyder tilmed på, at fordampningen som følge af vandmiljøplanen og vinterafgrøder, kan være stigende. I hvert fald falder grundvandsspejlet fortsat selvom nedbøren er stigende. Den restmængde, der herefter er til rådighed, når fordampningen er trukket fra nedbøren, kalder hydrologerne for "nettonedbør". I Sydvestjylland bliver 1000 mm nedbør derved reduceret til 400-500 mm nettonedbør, og på Øerne bliver 600 mm nedbør reduceret til ca. 200-300 mm nettonedbør.

2. trin i 3-trins raketten og tab af ressource skal tilskrives den væsentlige afstrømning fra sekundære magasiner, dræn og vandløb, dvs. vand der nok siver ned fra

rodzonen til det øverste grundvand, men næsten ligeså hurtigt igen afstrømmer til overfladevand, på grund af fysikkens og matematikkens love. Det er kort fortalt for besværligt for vandet at tage den længere vej nedad til fornyelse af de dybere beliggende grundvandsmagasiners vandmængder. Fornyelsen af de primære magasiner i Sydvestjylland udgør således kun ca. 100-200 mm pr. år, mens fornyelsen på Øerne udgør ca. 20-50 mm pr. år. Det vil sige, at fornyelsen og dermed den maksimalt udnyttelige drikkevandsressource, kun er mellem 3 og 20% af nedbøren.

Mange steder på øerne og i Østjylland oppumper vi i dag en vandmængde af samme størrelsesorden som fornyelsen. Allerede efter afskydning af 2. trin i raketten kan vi i en del områder iagttage (fx der hvor København henter sit vand), at vandindvinding allerede i dag giver anledning til en reduktion af vandføringen og dermed kvaliteten i det vandige miljø og de tilknyttede levevilkår. Denne påvirkning er et direkte resultat af den intensive oppumpning og en deraf faldende grundvandsstand (visse steder mere end 10 m), som medfører udtørring af de øverste spidser af vand-

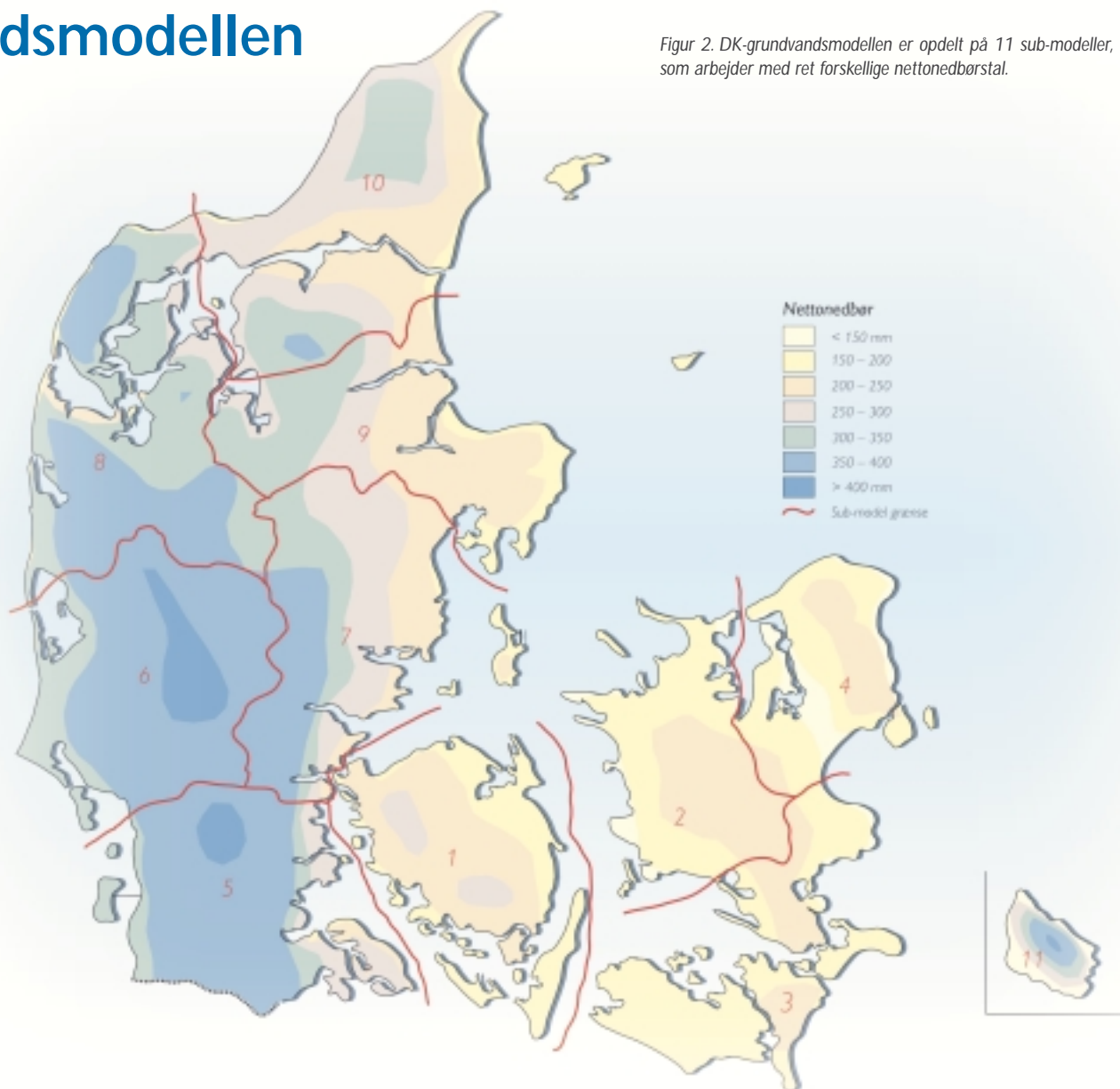
G E O L O G I NYT FRA GEUS 3/01



Figur 1. Det vand vi i dag henter op, er måske til dels infiltreret i jorden i stenalderen, middelalderen, renæssancen og i oplysningstiden.

vandsmodellen

Figur 2. DK-grundvandsmodellen er opdelt på 11 sub-modeller, som arbejder med ret forskellige nettonedbørstal.



løbene, og en generel reduktion af grundvandsstrømningen til vandløb.

3. trin i løfteraketten, som medfører endnu et ressourcetab, er den konstaterede forurening af grundvandsressourcen med nitrat, pesticider og andre miljøfremmede stoffer, som vi endnu knap har set eller forstået den fulde konsekvens af. Vi kan jo ikke indregne den del af "fornyelsen", som er forurenede på et niveau over de fastsatte grænseværdier. I dag bliver Danmarks grundvandsressource primært hentet op fra dybere magasiner med en meget betydelig opholdstid. Det vand vi i dag henter op, er måske til dels infiltreret i jorden i stenalderen, middelalderen, renæssancen og i oplysningstiden. Kun en brøkdel af det dybe grundvand, er dannet i perioden efter 2. verdenskrig og kun denne lille del bærer derfor

spor af moderne aktiviteter og belastninger, fra punkt- og fladekilder.

Det øverste grundvand er allerede i dag forurenede med nitrat, pesticider og andre miljøfremmede stoffer. Måske kan helt op til 40 % af det øverste grundvand ikke umiddelbart anvendes, fordi det overskrider grænseværdierne for det tilladte indhold af miljøfremmede stoffer.

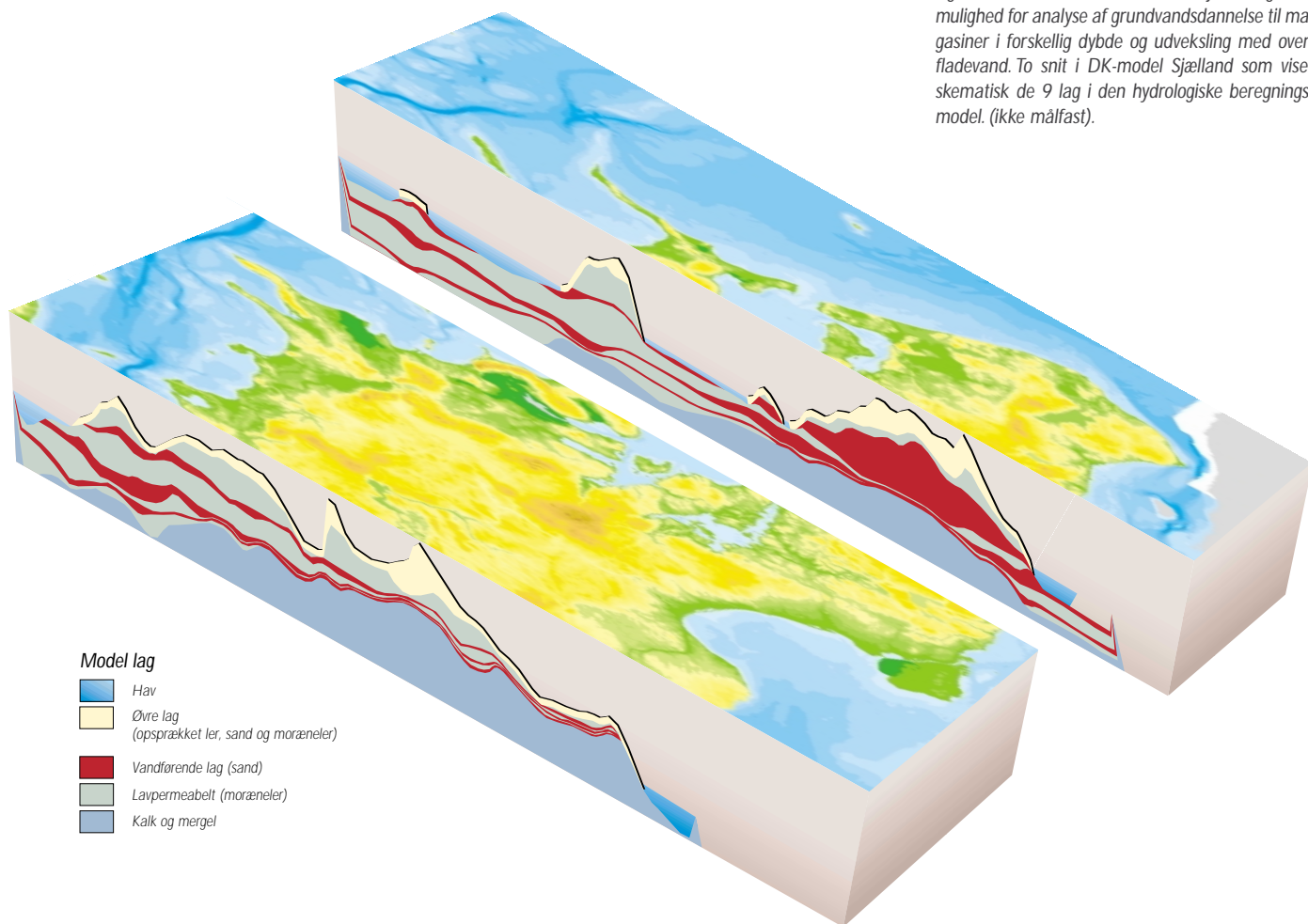
Betydningen af denne forurening af de øvre grundvandsmagasiner og på længere sigt af de dybere magasiner, som vi i fremtiden skal indvinde fra, er en særdeles relevant problemstilling, som fortjener vores fulde opmærksomhed.

Kombinationen af det voksende behov for vand til afgrøder, fordampning, voksende krav til minimums vandføring i vandløbene og den fortsatte forringelse af grund-

vandskvaliteten, har medført et behov for at offentlige myndigheder får en bedre indsigt i den nuværende tilstand og nærmere forståelse for den fremtidige udvikling af grundvandsressorens størrelse. Den tidligere opgørelse foretaget af Vandrådet i 1992, er ikke længere tilstrækkelig, i den nuværende situation.

Genbrug af data og baggrund for et modelsystem

De forsimplede beregninger som Vandrådet foretog indeholdt ikke nogen særlig information om usikkerheden på de skønnede tal og udnyttede ikke direkte de eksisterende landsdækkende databaser, med systematisk registrering af geologiske og hydrologiske borningsdata, indsamlet gennem de seneste 100 år.



Figur 3. Vandressourcemodellen for Sjælland giver mulighed for analyse af grundvandsdannelse til magasiner i forskellig dybde og udveksling med overfladevand. To snit i DK-model Sjælland som viser skematisk de 9 lag i den hydrologiske beregningsmodel. (ikke målfast).

På nuværende tidspunkt rummer borigsdatabase på GEUS informationer om mindst 270.000 borer, af hvilke over 200.000 er arkiveret i den geologiske JUPITER database. Hertil kommer oplysninger om oppumpninger lagret i andre GEUS databaser. Endelig findes forskellige GIS temaer med topografi, vandløb, oplande, jordarts- og arealanvendelseskort i GEUS' databaser.

Alle disse data bliver genbrugt i forbindelse med opstilling af en national vandressourcemodel for hele landet, "DK-modellen". Modellen skal give mulighed for en bedre og mere tidssvarende opgørelse af den udnyttelige grundvandsressource, ved fuld inddragelse af alle tilgængelige geologiske og hydrologiske data, herunder data fra GEUS' pejlestationsnet samt data fra målinger af vandføring i vandløb fra hele landet.

Arbejdet med DK-modellen er finansieret af Miljø- og Energiministeriet over en 5-årig periode (1996-2001) og udført af GEUS i samarbejde med DHI, Institut for Vand og Miljø og Danmarks Miljøundersøgelser.

Formålet med projektet er, at forbedre vores forståelse af de processer der styrer grundvandsdannelsen, at udvikle retningslinier for fastlæggelse af parameterværdier, kalibrering og validering af modellen, og opgøre størrelsen af grundvandsdannelsen for hele landet, inklusive regionale variationer gennem tiden.

Formål som måske lyder lidt flotte, men som ikke desto mindre dækker over den simple kendsgerning, at man ikke kan "måle" grundvandsdannelsen direkte på større skala med kendte teknikker, men i stedet må basere sin opfattelse af grundvandsdan-

nelsens størrelse på en hydrologisk model. Nøjagtigheden af denne model kan man kun bedømme, på baggrund af pejlinger og afstrømningsmålinger, samt evt. aldersbestemmelse og andre "fingeraftryk". Lidt populært kan man måske omskrive Søren Kierkegaards berømte ord:

"Livet skal leves forlæns, men må forstås baglæns", til:

"Grundvandsdannelsen skal vurderes ved hjælp af en hydrologisk model, hvis pålidelighed kun kan forstås ved at vurdere nøjagtigheden af de matematiske simuleringer af modellen på baggrund af sammenligning med målinger af trykniveau, afstrømning og grundvandets alder, som foreligger i bl.a. GEUS' databaser".

Arbejdet med en hydrologisk model er i denne sammenhæng en cyklisk proces som gennemløber faserne: hydrogeologisk tolk-

ningsmodel; modelopstilling; kalibrering, validering og simulering. Endelig er det meget vigtigt hele tiden at gå tilbage i processen, og arbejde videre med den geologiske model, selvom man måske befinder sig på et langt senere trin i processen.

Fra geologisk model til hydrologisk model

I DK-model sammenhæng er Danmark opdelt på 11 delmodeller (se figur 1) og fremgangsmåden, når man går fra den geologiske model til den hydrologiske model kan illustreres for Sjælland. Sjælland er dækket af delmodel 2, 3 og 4 og har et areal på 7330 km². Den overfladenære geologi består af kvartære aflejringer beliggende ovenpå tertiære kalk- og mergelaflejringer. De kvartære aflejringer består af sedimenter med en tykkelse fra få meter til 150 m. De prækvartære aflejringer består overvejende af

Danien kalk i den østlige og nordlige del og Paleocænt mergel og ler i den vestlige del af Sjælland. De geologiske forhold er komplekse, ikke mindst på grund af tektoniske forstyrrelse forårsaget bl.a. af gletscheris, og der er derfor lagt megen vægt på opstilling af en pålidelig geologisk model i 3 dimensioner med udgangspunkt i GEUS' databaser.

De hydrogeologiske enheder og deres rumlige fordeling er fastlagt ud fra oplysninger på cirkeldiagramkort, lagenes vandtransportevne samt filterintervaller bestemt ud fra boringsdatabasen JUPITER samt al relevant litteratur der findes. Geologisk kompleksitet, er indbygget i form af sand- og tektoniklinser i lerlagene. Den geologiske model for Sjælland består af 11 lag, af vekslende sand, moræneler og kalk aflejringer. De øverste 3 geologiske lag bestående af opsprækket ler, lokale sand- og morænelerslag er slået sammen til et øvre beregningslag (se figur 3).

Med beregningselementer i modellen på 1x1 km (se figur 4), kan der opnås beregningstider på 4-6 timer for simulering af en 10-årig periode. I beregningen findes løsninger af ligningssystemerne med simulering af daglig nettonedbør og vandføring for vandløbssystemerne og månedlig grundvandsstand og grundvandsdannelse til magasiner i forskellig dybde, for grundvandssystemet. Det er nødvendigt at forenkle en række fysiske forhold af stor betydning for grundvandsdannelse og afstrømning, bl.a. topografi, og geologisk forskellighed, dræn- og vandløbssystemer. På trods af denne forenkling, giver DK-modellen mulighed for beskrivelse af de væsentligste processer i vandkredsløbet. (se figur 1).

Som computer program til projektet blev MIKE SHE systemet valgt. MIKE SHE er en videreudvikling af SHE (Système Hydrologique Européen), et sofistikeret hydro-

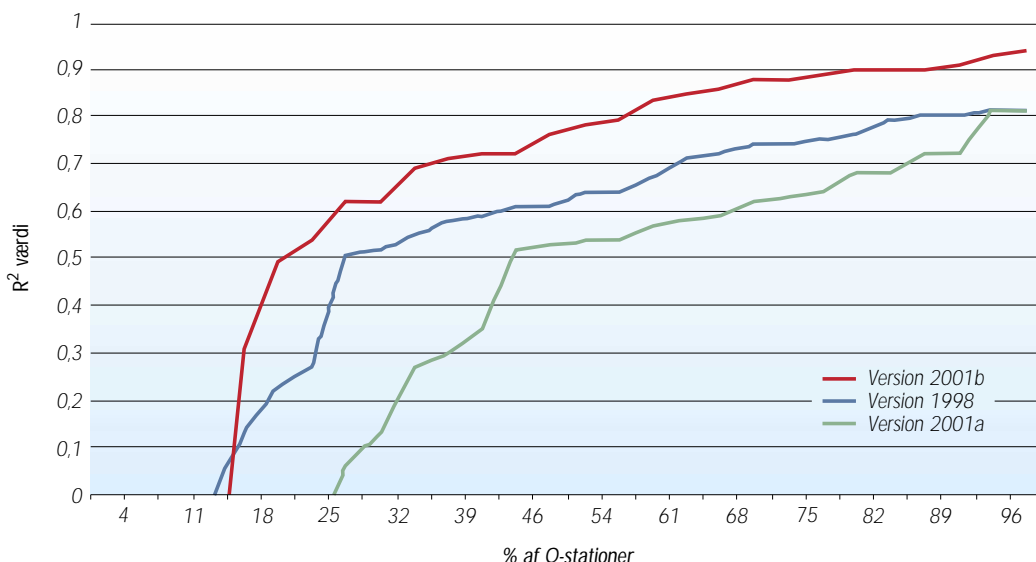


Figur 4. Billede syd for Vig fra Nordvestsjælland med indsat kvadrat.
Foto: Peter Moors (GEUS).

| Performance Indikator | Fremragende (5 point) | Særdeles god (4 point) | God (3 point) | Dårlig (2 point) | Meget dårlig (1 point) |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------|------------------|------------------------|
| RMS | < 4 | 4-6 | 6-8 | 8-10 | > 10 |
| R ² | > 0.90 | 0.80-0.90 | 0.60-0.80 | 0.20-0.60 | < 0.20 |
| F _{Bal} | < 5% | 5-10% | 10-20% | 20-40% | > 40% |
| Totalsum: | > 4.5 | 3.5-4.5 | 2.5-3.5 | 1.5-2.5 | < 1.5 |
| Pålidelighed | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★ | ★★ | ★ |

Tabel 1. System til karakterisering af pålidelighed ud fra RMS, R² og F_{Bal}.

Figur 5. Resultat af valideringstest for 28 vandforsyningsstationer (R²). Version 2001b har for en fjerdedel af Q-stationerne en R² værdi under 0.6, mens ca. en fjerdedel af stationerne har R² værdi > 0.88.



logisk modelsystem som blev udviklet i et Fransk-Dansk-Britisk samarbejde over en 20-årig periode. DHI, Institut for Vand og Miljø, forestår videreudviklingen af MIKE SHE softwaren og har i forbindelse med DK-model projektet udarbejdet dels flere nye moduler (bl.a. en GeoEditor), ligesom funktionalitet og beregningsmetodik, er forbedret på en række punkter. Tre sammenligninger af forskellige kendte hydrologiske modelsystemer har placeret MIKE SHE på en førsteplads, når det gælder modellering af det hydrologiske kredsløb og problemstillinger, hvor det er nødvendigt at foretage detaljerede dynamiske beregninger, for både grundvand og overfladevand.

Betydning af en god geologiske model

I en hydrologisk model kan de hydrauliske parametre, som er fysiske størrelser, der forudsættes at være konstante i tid, fx hydraulisk ledningsevne eller magasintal, opdeles på en af 3 hovedkategorier i vandkredsløbet:

- fordeling i rodzonen af nedbøren mellem fordampning, grundvandsdannelse og afstrømning bl.a. fra befæstede arealer,
- strømning, drænastrømning og udveksling mellem grundvand og vandløb, samt
- overfladenær afstrømning og afstrømning gennem vandløbssystemet.

Det er på basis af feltstudier vurderet, at den hydrauliske ledningsevne for de øverste 1-5 meter moræneler under terrænoverfladen, har en højere ledningsevne, som følge af opsprækning, end det dybere beliggende moræneler.

Hovedprincippet for fastlæggelse af parameterværdier i en hydrologiske modelopstilling, består i at vælge så få frie parametre som muligt og at anvende et gennemskueligt og objektivt princip med konstante (uniforme) værdier i alle geologiske lag bortset fra kalken. At visse parametre er "frie" betyder blot, at man i løbet af kalibreringen kan justere værdien af de frie parametre, indtil der opnås en tilstrækkelig god over-

ensstemmelse med målinger, hvorimod de øvrige parametre tillægges faste værdier ud fra målinger eller litteratur.

En indledende følsomhedsanalyse viste, at de mest følsomme parametre for modellens simulering af trykniveau og afstrømning, var: gennemstrømningen i kalk; vandret ledningsevne for sand; lodret ledningsevne for moræneler; frie magasintal, drænkonstant og vandløbslækage koefficient.

Valget af konstante parameterverdier for moræneler og sand i alle lag, så vandføringsevnen kun afhænger af tykkelserne af lagene i den geologiske model, giver mulighed for at justere et begrænset antal parametre under kalibreringen, hvilket har vist sig at være en fordel, hvis man skal bibeholde en god nøjagtighed (performance), når man efterfølgende tester modellen under valideringen, mod data som endnu ikke har været benyttet til kalibreringen.

Brugen af automatisk kalibrering (invers

modellering) giver en række muligheder for at få feed-back på om der skal justeres på randbetingelser, geologisk model eller principperne for fordeling af modellens parametre, forud for den ofte tidskrævende og omfattende kalibrering og validering af modellen.

Fra kalibrering til validering af model

Kalibreringsproceduren omfatter både en stationær kalibrering baseret på gennemsnitsverdier af nettonedbør, oppumpning, trykniveau og afstrømning og en efterfølgende dynamisk kalibrering, med inddragelse af tidsrækker af nettonedbør, oppumpning, afstrømning og grundvandsstand, hvorved bl.a. hydrauliske ledningsevner og magasintal justeres. Også parametre for lokale sand- og tektoniklinser, samt vandløbslækage koefficienter og dræntidskonstanter justeres i dette forløb. For kalken blev målte gennemstrømnings værdier fra Jupiter databasen på

forhånd anvendt til interpolering af den rumlige variation, men forskellige antagelser vedr. hydrauliske ledningsevne for kalken blev også undersøgt.

Til kalibrering og validering af DK-modellen er anvendt såvel "split-sample" tests som proxy-basin tests. Split-sample tests er en klassisk test, hvor den tilgængelige mængde deles i to, hvorefter der kalibreres på den ene og efterfølgende valideres på den anden. I tilfældet med DK-modellen for Sjælland er der kalibreret på perioden 1988-90 og valideret på perioden 1991-96. Proxy-bassin test er en anden valideringstest, hvor kalibrerede parameterverdier for de kvartære aflejringer, for fx Vestsjælland og Sydsjælland, overføres til modellen for Nordøstsjælland, hvorved det testes hvorvidt resultaterne fortsat er pålidelige.

Undervejs i forløbet anvendes en række forudsætninger eller indikatorer for hvor pålidelig modellen er: R^2 , RMS , og F_{bal} .

**Kalibrerede parameterverdier
Styrende parameter for grundvandsstrømning**

| Geologisk lag | Horizontal hydraulisk ledningsevne [m/s] | | Vertikal hydraulisk ledningsevne [m/s] | | Frit magasintal | | Artesisk magasintal |
|----------------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|---------------------------|-------|---------------------|
| | 1998 | 2001b | 1998 | 2001b | 1998 | 2001b | |
| | Lag 1 (Opsprækket ler) | 1×10^{-5} m/s | 1.45×10^{-5} m/s | 1×10^{-7} m/s | 1.45×10^{-7} m/s | 0.25 | |
| Lag 2, 4, 6, 8 og 10 (Moræneler) | 1×10^{-7} m/s | 1.9×10^{-8} m/s | 1×10^{-9} m/s | 1.9×10^{-9} m/s | 0.25 | 0.06 | 0.0001 |
| Lag 3, 5, 7, og 9 (Sand) | 1×10^{-4} m/s | 1.35×10^{-4} m/s | 1×10^{-5} m/s | 1.35×10^{-5} m/s | 0.25 | 0.26 | 0.0001 |
| Lag 11 (Kalk) | Distribueret | Distribueret | Distribueret | Distribueret | 0.25 | 0.25 | 0.0001 |

Styrende parameter for overfladevandsafstrømning

| | 1998 | 2001b |
|--|--|--|
| Overflade Manning (M) ruhed | 2 | 2 |
| Overflade magasinering | 0.02 | 0.01 |
| Dræntidskonstant | 8×10^{-7} | 7×10^{-8} |
| Vandløbs Manning (M) koefficient | 20 | 20 |
| Vandløbs lækage koefficient (distribueret) | 1×10^{-7} and 5×10^{-10} | 1×10^{-7} and 5×10^{-10} |

Tabel 2. Kalibrerede parameterverdier for modelversion 1998 og 2001b.

| | | RMS | R ² | F _{Bal} |
|-----------------|-------|------|----------------|------------------|
| Vestsjælland | 1998 | ★★ | ★★★★ | – |
| | 2001a | ★★ | ★★ | ★★ |
| | 2001b | ★★ | ★★★★★ | ★★★★★ |
| Nordøstsjælland | 1998 | ★★★★ | ★★ | – |
| | 2001a | ★★★★ | ★★ | ★ |
| | 2001b | ★★★★ | ★★★ | ★★★ |
| Sydsjælland | 1998 | ★★★ | ★★★ | – |
| | 2001a | ★★★ | ★★ | ★★ |
| | 2001b | ★★★ | ★★★ | ★★ |
| Hele Sjælland | 1998 | ★★★ | ★★★ | – |
| | 2001a | ★★★ | ★★ | ★★ |
| | 2001b | ★★★ | ★★★★ | ★★★ |

Tabel 3. Resultat af valideringstest for modelversion 1998, 2001a og 2001b.

RMS kriteriet giver mulighed for at bedømme den samlede afvigelse mellem simuleret og målt trykniveau ud fra udvalgte pejledata fra Jupiter basen, og observationsdata for de 9 beregningslag. Slutmodellen skal have så lille en RMS værdi som muligt.

R² kriteriet kan afgøre, hvor godt modellen simulerer vandløbsafstrømningen, ved sammenligning med målinger fra 28 stationer. En pålidelig slutmodel skal helst have R² værdien > 0.65.

F_{Bal}, er en særlig vandbalance indikator, som bruges til at vurdere, hvor god overensstemmelsen der er mellem simuleret og målt "vandbalance", bedømt ud fra den samlede gennemsnitlige afstrømning ved en vandføringsmålestation.

Der er opstillet et pointscore system, som vist i tabel 1, som tildeler modellen en score for performance (1-5 "stjerner") for hvert af de 9 beregningslag (RMS) og for hver af de 28 målestationer (R², F_{Bal}), hvorefter en samlet pointsum eller karakter kan udregnes for hver model.

Eksempelvis skal her vises resultaterne for 3 versioner af Sjællandsmodellen:

1. Den originale kalibrerede model fra 1998 baseret på Danmarks JordbrugsForskning (DJF) klimadata (*model 1998*)
2. En opdateret model fra 2001 baseret på DMI klimadata og yderligere invers kalibrering (*model 2001a*)
3. En opdateret model fra 2001 baseret på DMI klimadata og yderligere invers kalibrering, men hvor nettonedbøren er multipliceret med 0.77 for at få vandbalancen til at gå op (*model 2001b*)

Kalibrerede parameterverdier for 1998 og 2001b versionen er vist i tabel 2 og resultater af beregnede R² værdier for 28 vandføringsstationer er vist i figur 5, med rangordnede R² værdier. Resultater af valideringstest for de 3 modelversioner er vist i tabel 3. Det fremgår at version 2001b giver den klart bedste "performance", og tilmed opfylder det på forhånd specificerede "performance" kriterier, som svarer til at modellen for Sjælland generelt kan opnå mindst 3 stjerner for samtlige indikatorer (RMS, R² og F_{Bal}). Derudover kræves det, at de kalibrerede parameterverdier ligger indenfor

de realistiske variationsrammer som på forhånd er fastlagt.

Disse krav er opfyldte for version 2001b, og denne version er derfor anvendelig til simuleringer af grundvandsdannelsen, som grundlag for vurdering af den udnyttelige resources størrelse. Korrektionen af nettonedbøren med en faktor 0.77 har antydnet et betydeligt videnshul, om især fordampningens størrelse i Danmark, som der er behov for at få undersøgt (trin 1 i vores metafor / tre-trinsraket). En ny landsdækkende opgørelse forventes at være klar ved udgangen af 2002, og til den tid, kan der ikke forventes meget mere viden om fordampningens størrelse, vi må derfor benytte den lidt grove metodik med korrektion af nettonedbøren, når vi vurderer Danmarks udnyttelige drikkevandsressource, og der vil uden tvivl også kunne påpeges andre usikkerhedsfaktorer, i de øvrige trin (2 og 3) i metaforen, som kan være med til at påpege behov for yderligere undersøgelse og forskning i de kommende år.

Allervigtigst er det måske, at se DK-modellen som en snebold, der efter hvert gen-

nemløb af endnu en modelcyklus via geologisk model, opstilling, kalibrering, validering, og simulering gradvist bliver mere og mere

pålidelig og dermed en bedre referenceramme for beslutninger om behovet for yderligere beskyttelse af grundvandsressourcen og

planlægning af en mere bæredygtig udnyttelse af vort dyrebare drikkevand.



Billede fra Farum Sø. Foto: Peter Moors (GEUS).