

DK-model2009

Sammenfatning af opdateringen 2005 - 2009

Anker L. Højberg, Lars Trolborg, Per Nyegaard,
Maria Ondracek, Simon Stisen &
Britt S. B. Christensen



DK-model2009

Sammenfatning af opdateringen 2005 - 2009

Anker L. Højberg, Lars Trolborg, Per Nyegaard,
Maria Ondracek, Simon Stisen &
Britt S. B. Christensen

Forord

I perioden 2005 – 2009 er der sket en opdatering og videreudvikling af den Nationale Vandressourcemodel (DK-modellen). Opdateringen er finansieret under den nationale overvågning af vand og natur NOVANA og oprindeligt etableret som et samarbejdsprojekt mellem GEUS og de danske amter. Efter strukturreformens nedlukning af amterne er projektet videreført i samarbejde mellem GEUS og de syv statslige miljøcentre. Selve modelopstillingen samt modelkalibrering og -validering er forestået af GEUS, mens miljøcentrenes rolle har været dataleverandører samt ansvarlige for kvalitetssikring, hvor der specielt har været fokus på kvalitetssikring af den geologiske og hydrostratigrafiske opdatering af DK-modellen.

DK-modellen er opdelt i syv delmodeller, hvoraf de seks er indgået i opdateringen, mens delmodellen for Bornholm allerede lå opdateret ved projektets begyndelse. Ved projektets afslutning foreligger der en opdateret numerisk model for hver af de syv delmodeller. Hver model er rapporteret i en selvstændig modelrapport, med undtagelse af modellen for Sjælland og modellen for Lolland, Falster og Møn, der er opstillet samlet og derfor rapporteret samlet. Den geologiske og hydrostratigrafiske opdatering er rapporteret i en selvstændig rapport.

De udarbejdede rapporter samt supplerende informationer om DK-modellen herunder kontaktpersoner og relateret litteratur kan findes på hjemmesiden www.vandmodel.dk.

Indholdsfortegnelse

Forord	3
1. Resume	5
2. Baggrund og formål	8
2.1 Formål	9
2.2 Rapportens indhold	10
3. Beskrivelse af DK-model	11
3.1 Opbygning af DK-model og opdateringer	11
3.1.1 Modelsystem	11
3.1.2 Delmodeller	12
3.1.3 Hydrostratigrafisk model	14
3.1.4 Umættet zone og grundvandsdannelse	17
3.1.5 Overfladevandssystemet	18
3.1.6 Klimainput	19
3.1.7 Indvindinger	20
3.1.8 Parameterisering	21
3.2 Kalibrering og validering	22
3.3 Resultater	25
4. Modelanvendelse	32
4.1 Anvendelse af DK-model2009	33
5. Videns og udviklingsbehov	35
6. Visioner	37
7. Referencer	39

1. Resume

Den første version af den Nationale Vandressourcemodel (DK-model2003) blev etableret i perioden 1996 – 2003 og afsluttet med udgivelsen af temarapporten "Ferskvandets Kredsløb" (Henriksen og Sonnenborg, 2003). I perioden 2005 – 2009 er der sket en opdatering og videreudvikling af modellen til DK-model2009.

Centrale elementer i opdateringen er:

- *Modelsystem.* Der er sket en udskiftning af modulet til beregning af nettonedbøren, hvor det tidligere anvendte "stand-alone" rodzone modul er udskiftet med "two-layer" modulet, der er et integreret vandbalancemodul i MIKE SHE.
- *Geologiske og hydrostratigrafisk model.* Den mest omfattende opgave har været en opdatering af den geologiske og hydrostratigrafiske model. Denne opdatering er sket på basis af gennemgang af mere end 50 eksisterende modeller opstillet af de tidligere amter frem til 2005. Under opdateringen er detaljeringen af de tidligere modeller tilgodeset. For øerne er den geologiske og den hydrostratigrafiske model sammenfaldende. Den geologiske model for Jylland er en hybrid bestående af pixeltolkningen fra DK-model2003 samt lagtolkninger fra amtsmodellerne. Baseret på de tidligere amtsmodeller samt nye øst-vestgående geologiske profiler er der i forbindelse med opdateringen udviklet en sammenhængende hydrostratigrafisk model for hele Jylland.
- *Nettonedbør.* Foruden overgangen til two-layer er der sket en detaljering i beskrivelsen af de jordfysiske parametre for rodzonen samt udviklingen af rodtybden, der er styrende for størrelsen af fordampningen samt dennes rumlige fordeling.
- *Klimainput.* Klimadata er forfinet fra 40 x 40 km klimagrid til 10 x 10 km klimagrid for nedbør og 20 x 20 km for temperatur og potentiel fordampning (dog 40 x 40 km klimagrid frem til 1998).
- *Diskretisering.* Den horisontale diskretisering er reduceret fra 1 x 1 km til 500 x 500 m grids.
- *Indvindinger.* Samtlige indvindinger registreret i Jupiter databasen er medtaget i modellen. Markvindinger er medtaget ved angivelse af placeringen af indtag anvendt til markvanding, mens den oppumpede mængde er behovsstyret, ud fra vandunderskuddet i den umættede zone. For øvrige anlæg er den indberettede indvindingsmængde benyttet, ligeligt fordelt ud på anlæggets aktive indtag.
- *Kalibrering.* Der er foretaget en invers kalibrering på basis af en dynamisk version af modellen. Kalibreringen er foretaget med optimeringsprogrammet PEST.

Herudover er der udviklet adskillige hjælpeprogrammer, primært i forbindelse med håndtering og processering af de store datamængder, der er anvendt under opstilling og kalibrering af modellen. Disse programmer er udviklet for at sikre en stringent procedure for dataprocesseringen samt dokumentation heraf, ligesom de medfører en betydelig ressourcebesparelse ved en fremtidig opdatering. De udviklede programmer er open-source og kan frit anvendes.

Ved kalibrering og validering af de enkelte delmodeller har det generelt været muligt at opfylde de opstillede nøjagtighedskriterier til middelfejlen og kvadratafgivelsessummen (RMS) for potentialerne. For vandføringerne var det ligeledes generelt muligt at opnå til-

fredsstillende resultater for den samlede vandbalancefejl, mens det kun var muligt at opfylde kriterierne for vandløbsdynamikken (R^2) for en enkel delmodel. Det er vurderet, at en meget betydende faktor for den manglende performance skyldes det anvendte klimainput. Dette er begrundet i de ændringer der, som del af opdateringen, er foretaget i forbindelse med beregning og fordeling af nettonedbøren. Vurderingen understøttes endvidere af foreløbige resultater opnået under forskningsprojektet HOBE (www.hobecenter.dk), hvor en delmodel er kalibreret med alternative nedbørs- og fordampningsbeskrivelser. Udover klimainputtet vurderes der endvidere at være behov for en revurdering af det anvendte modelkoncept, herunder de medtagne processer og deres formuleringer, ligesom det vil være nødvendigt med en detaljering af parameteriseringen, hvor der eksempelvis anvendes en zonerings af de hydrauliske parametre, hvorved lokal heterogenitet kan tilgodeses.

På trods af at det ikke har været muligt at opnå de opstillede nøjagtighedskriterier, er der samlet set sket en markant forbedring af DK-modellen. Med indbygning af det omfattende datamateriale som modellerne fra de tidligere amterne udgjorde, detaljeringen af modelopstillingen og input data samt udskiftning af modelmoduler, er der i realiteten tale om en helt ny model frem for en mindre opdatering af den eksisterende model. Epokegørende i DK-model2009 er, at der nu eksisterer en samlet hydrostratigrafisk model for hhv. Sjælland, Sydhavsøerne, Fyn og Jylland. Disse er opbygget, så de tilgodeser tolkningerne i de tidligere amtsmodeller. Derved er der opnået en samlet tolkning baseret på lokal viden, som er konsistent på tværs af tidligere modelgrænser samt administrative skel. De hydrostratigrafiske modeller udgør endvidere en overordnet ramme, hvori det er muligt at indarbejde ny geologisk viden/modeller udviklet under fremtidige detailstudier.

Visionen for DK-modellen er, at den ikke alene betragtes som en hydrologisk computermodel, men i langt bredere omfang vil indgå i administrationen af det danske ferskvand. Visionerne for DK-modellen er, at modellen på sigt vil:

- optræde som en samlende platform for den danske forvaltning, overvågning og kortlægning af ferskvandsressourcen
- danne referenceramme for den overordnede vandbalance og dermed sikre konsistens i vandforvaltningen på tværs af myndighedsskel og skala
- anvendes indenfor hydrologiske problemstillinger generelt og ikke alene til beregning af vandstrømninger
- gennemgå periodisk opdatering og derigennem integrere den nyeste geologiske og hydrologiske viden
- udvikles løbende så modellens anvendelsesområde gradvist kan udvides
- danne grundlag for opstilling af nye detailmodeller, både mht. den geologiske/hydrostratigrafiske opbygning samt hydrologiske randbetingelser

Et kardinalpunkt for modellen er den geologiske og hydrostratigrafiske tolkning. Med de mange kortlægningsprojekter der igangsættes i disse år, vil der være behov for en regelmæssig opdatering, så DK-modellen i videst mulig omfang integrerer den nyeste viden på dette felt. Med ønsket om en bredere anvendelse af modellen, så denne i endnu højere grad kan anvendes i forvaltningsøjemed (Madsen et al., 2009) er der endvidere behov for en yderligere detaljering samt udvikling af modellen. For at sikre, at DK-modellen udgør et stærkt og up-to-date værktøj, der kan anvendes på tværs af de forskellige opgavetyper indenfor overvågning og forvaltning af det danske ferskvand, er der således behov for en regelmæssig opdatering med den nyeste viden opnået gennem detailstudier, samt en lø-

bende videreudvikling af modelkonceptet og detaljering i takt med at formålene og kravene til modellen ændres.

Den mest betydende forudsætning for en succesfuld videreførelse og opdatering af DK-modellen er, at den bliver anvendt aktivt. Dette kan ske gennem konkrete anvendelser i projekter, men i lige så høj grad ved, at den i videst mulig omfang tænkes ind i ethvert kommende modelprojekt. Her kan den tjene som udgangspunkt for nye modelopstilling samt som ramme for en efterfølgende indarbejdelse af den opnåede detailviden. Netop indarbejdelse af opdateret geologisk og hydraulisk viden bør som minimum sikres, så vandforvaltningen udført af de forskellige myndigheder på forskellige skalaer anvender den samme opdaterede viden i forvaltningen. I forbindelse med den netop overståede opdatering, er der indhentet betydelig erfaring mht. anvendelse af detailmodeller som grundlag for opdatering af DK-modellen. Der er dog stadig et væsentligt behov for optimering af metoder og procedurer for en regelmæssig opdatering, både hvad angår det anvendte koncept samt de tekniske løsninger. En sådan optimering kan imidlertid alene ske på basis af erfaring opnået gennem konkret anvendelse, hvor de forskellige problemstillinger og udfordringer erkendes.

2. Baggrund og formål

Den første version af den Nationale Vandressourcemodel (DK-model) blev etableret i perioden 1996 – 2003 og afsluttet med udgivelsen af temarapporten ”Ferskvandets Kredsløb” (Henriksen og Sonnenborg, 2003). Etableringen af DK-modellen blev igangsat som del af en projektkontrakt mellem Miljø- og Energiministeriet og Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS). Formålet var at udvikle og etablere en landsdækkende vandressourcemodel som grundlag for at bestemme Danmarks samlede tilgængelige drikkevandsressource, herunder dennes tidsmæssige og regionale variation. Etablering af den nationale vandressource model skulle dermed undersøge, om det var muligt at anvende en hydrologisk model til at opnå et bud på den udnyttelig grundvandsressource, der var mere detaljeret og inddrog flere fysisk betingede aspekter end det tidligere estimat fra Vandrådet i 1992 (Vandrådet, 1992).

DK-modellen var første forsøg på etablering af en national model og var banebrydende indenfor storskala modellering, ikke blot nationalt men også internationalt, med udviklingen af nye metoder og principper for storskala modelleringen. Som del af etableringen af DK-modellen blev der foretaget et internationalt review af modellen. Reviewet gav anledning til forbedringer af konceptet men konkluderede generelt, at den anvendte tilgang ud fra et videnskabeligt synspunkt var baseret på sunde principper for storskala modellering. At det var muligt at foretage meningsfuld modellering på den anvendte skala blev ligeledes bekræftet gennem modellens performance. Med modellen var det således muligt at opnå en acceptabel simulering af grundvandstanden samt vandføringen for større oplande, ligesom analyser af modelresultaterne viste, at modellen i tilfredsstillende grad simulerede processerne styrende for den overordnede vandbalance på stor skala.

Opgørelserne med DK-modellen viste, at den udnyttelige drikkevandsressource i Danmark var væsentlig lavere end tidligere antaget, hvor størrelsen på ca. 1,8 mia. m³/år som estimeret af Vandrådet (Vandrådet, 1992) blev næsten halveret til kun 1 mia. m³/år. Opgørelsen viste samtidigt, at der er store regionale forskelle i ressorens størrelse, hvor der specielt sker en overudnyttelse i de tætbefolkede områder omkring de større byer samt den sydvestlige del af Jylland, hvor der forekommer en intensiv markvanding. En væsentlig årsag til denne drastiske reduktion i den udnyttelige ressource skyldtes, at det med den hydrologiske model var muligt at vurdere forskellige fysisk baserede kriterier for en acceptabel udnyttelse. Dette inkluderede en hensyntagen til:

- en generel dårlig kvalitet af det øvre grundvand der gør det uegnet som drikkevandsressource nu og i mange år fremover
- en maksimal udnyttelsesprocent af det vand det infiltrerer til de dybereliggende magasiner for at undgå for store grundvandssænkninger samt accelereret infiltration af det øvre forurenede grundvand til de dybere magasiner
- påvirkningen af vandløbsafstrømningen forårsaget af grundvandsindvinding.

Specielt sidstnævnte udgjorde i opgørelsen fra 2003 en meget væsentlig begrænsning af den udnyttelige ressource, idet den kritiske faktor flere steder var reduktionen af minimumsvandføringen som følge af grundvandsindvinding i forhold til de fastlagte recipientmålsætninger.

Et meget vigtigt resultat af anvendelsen af DK-model2003 var, at den synliggjorde et vandbalanceproblem på national skala. Dette blev erkendt gennem en systematisk overestimering af den simulerede vandløbsafstrømning, som alene kunne omgås ved reduktion af nettonedbøren. Denne erkendelse initierede udarbejdelsen af konsensusnotatet "Vandbalance på mark- og oplands skala" (Plauborg et al., 2002) med anbefalinger til beregning af nedbør og fordampning på nationalt niveau.

Efter færdiggørelsen af DK-modellen i 2003 blev det i NOVANA programmet 2004 – 2009 indskrevet, at der skal etableres en hydrologisk modellering af vandbalancen og grundvandsdannelsen på overordnet oplandsniveau (vandområdedistrikt) og national skala. Til løsning af denne opgave blev der i 2005 etableret et samarbejdsprojekt *NOVANA modellering* mellem GEUS og de danske amter (nu de syv miljøcentre), hvori den eksisterende DK-model fra 2003 (herefter DK-model2003) opdateres (herefter DK-model2009).

2.1 Formål

Det overordnede formål for opdatering af DK-modellen er:

- At tilvejebringe en hydrologisk model på nationalt niveau, hvis opbygning og detaljering er konsistent på tværs af tidligere modeller og administrative skel og som inkluderer de geologiske tolkninger indeholdt i de tidligere lokalmodeller udviklet af amterne.
- At gennemføre en detaljering af modelopstilling og inputdata.

Under opdateringen af DK-modellen har der været anvendt et ensartet koncept og detaljeringniveau for hele landet, med følgende specifikke krav til opdateringen

- *Geologisk og hydrostratigrafisk opdatering.* Indarbejdelse af geologiske tolkninger fra eksisterende lokalmodeller opstillet af amterne frem til deres nedlukning i 2006.
- *Detaljering af beregningsmodel.* Reduktion af beregningsgriddet fra 1 x 1 km til 500 x 500 m gridceller. Opdatering og detaljering af vandløbsbeskrivelsen mht. medtagne vandløb og udledninger hertil. Udskiftning af modulet til beregning af nettonedbøren fra stand-alone modulet "rodzonemodulet" til en koblet løsning i MIKE SHE.
- *Detaljering af input data.* Specificere indvindinger på indtagsniveau i modsætning til den tidligere repræsentation på anlægsniveau. Forfinet klimagrid fra 40 x 40 km klimagrid til 10 x 10 km klimagrid for nedbør samt 20 x 20 km klimagrid for potentiel fordampning og temperatur. Udvidelse af pejledatagrundlaget for kalibrering.

Formålene for DK-model2009 er uændret i forhold til DK-model2003 og er således:

- At modellen skal kunne anvendes til vurdering af vandbalancen og grundvandsdannelse på overordnet oplandsniveau/grundvandsforekomst samt kunne belyse grundvandsressourcens størrelse og udnyttelsesgrad under hensyntagen til arealanvendelse, klimavariationer og indvindingsstrategi.

Vigtige hensigter for DK-model2009 er, at den kan anvendes som referencemodel på stor skala, og vil kunne danne udgangspunkt for nye modelopstillinger gennem udtræk af eksempelvis geologiske og hydrologiske randbetingelser eller processeret model inputdata. Endvidere er det ønsket, at modellen kan udgøre en ramme, hvori det er muligt at indarbej-

de ny viden opnået gennem fremtidige kortlægnings- og detailmodel projekter. For at modellen i praksis vil kunne anvendes til disse formål, er der under opdateringsprojektet lagt stor vægt på, at modellen bliver opbygget så simpel og gennemskuelig som muligt. Endvidere har der været fokus på at opnå konsensus mellem de involverede parter omkring det overordnede koncept for modeopstillingen, herunder den geologiske og hydrostratigrafiske tolkning, samt data anvendt under opdateringen. Ligeledes har der været fokus på at opnå konsensus om data anvendt som input for den hydrologiske model.

2.2 Rapportens indhold

Nærværende rapport har til formål at sammenfatte opdateringen af DK-modellen samt præsentere de generelle resultater opnået ved kalibrering og validering af de enkelte delmodeller. Rapporten giver således et overordnet indblik i modelopbygningen, detaljeringsgraden samt modellens styrker og svagheder. Rapporten indeholder ikke tekniske detaljer eller detaljeret gennemgang af de enkelte delmodeller og kan således ikke erstatte de tekniske modelrapporter, der er udarbejdet for de enkelte delmodeller, og som kan downloades fra www.vandmodel.dk.

I kapitel 3 gennemgås kort den generelle modelopstillingen med fokus på den opdatering, der er gennemført samt betydningen heraf. Modellens styrker og svagheder påpeges, hvilket kan danne grundlag for vurdering af modellens anvendelighed til løsning af konkrete opgaver, samt for prioritering af fremtidige opdateringer. I rapportens kapitel 4 beskrives modellens generelle anvendelighed indenfor udvalgte emner, samt anvendeligheden af den nuværende version af DK-modellen set i relation til modelkonceptet samt de opnåede resultater. Kapitel 5 opsummerer væsentlige videns- og opdateringsbehov, mens visioner for anvendelsen af DK-modellen er beskrevet i kapitel 6.

3. Beskrivelse af DK-model

3.1 Opbygning af DK-model og opdateringer

Vigtige hensigter med opbygningen og opdateringen af DK-modellen har været, at modellen:

- er opbygget efter et ensartet koncept og detaljeringsniveau for hele landet
- skal kunne anvendes som udgangspunkt for opstilling af detailmodeller
- skal kunne integrere ny viden fra detailmodeller ved fremtidige opdateringer

Disse betingelser har betydet, at modellen er søgt opstillet så gennemskuelig som muligt, samtidigt med at det anvendte koncept er tilstrækkeligt fleksibelt, så detaljeringen i nye detailmodeller kan tilgodeses. Betingelsen om gennemskuelighed har betydet, at det er valgt at anvende så få modelparametre som muligt, hvilket bl.a. er opnået ved ikke at anvende zoner til beskrivelse af forskellige hydrauliske egenskaber indenfor én geologiske enhed (sand eller ler). Den enkle parameterisering betyder, at modellen er holdt så gennemskuelig og dokumenterbar som mulig, ligesom en over-parameterisering af modellen er undgået. Til gengæld er regional og lokal heterogenitet i de hydrauliske egenskaber ikke tilgodeset, hvorfor modellen ikke kan fange regionale/lokale variationer i eksempelvis grundvandspotentialet som følge af heterogenitet på denne skala. Modellens gennemskuelighed er således prioriteret højere end en tilpasning til lokale forhold.

Modsat parameteriseringen er det valgt at indbygge input data med størst mulig detaljering. Input data er således i flere tilfælde beskrevet mere detaljeret end nødvendigt for modellens formål, hvilket giver større mulighed for at anvende dele af modellen i forbindelse med detaljerede modelstudier. Dette gør sig blandt andet gældende for den hydrostratigrafiske model, der ligger i en 100 x 100 m opløsning, mens den numeriske model har en horisontal opløsning på 500 x 500 m. Ligeledes er der sket en detaljering mht. klimainput samt beskrivelse af vandløb og indvindinger.

De enkelte delmodeller er i videst mulig udstrækning opbygget efter samme koncept mht. de medtagne hydrauliske processer samt rumlig distribuering (rumlig fordeling) af parametrene. Hovedparten af de anvendte model datafiler er endvidere opstillet samlet for hele Danmark. Der er således opnået en "sømløs" modelopstilling, hvor det er muligt at "skære" et vilkårligt område ud.

3.1.1 Modelsystem

Modellen er opstillet i modelsystemet MIKE SHE / MIKE 11, der er del af software-suiten MIKE ZERO. Modelsystemet udgør et deterministisk fuldt distribueret og fysisk baseret modelsystem til simulering af ferskvandskredsløbet. I modellen er følgende moduler inkluderet:

- Overfladisk afstrømning (OL), en todimensionel beskrivelse af vandstrømningen på jordoverfladen, som er styret af den topografiske hældning.
- Umættet zone (UZ), er beskrevet ved vandbalancemodulet "two-layer", der holder styr på vandbalancen i den umættede zone (herunder rodzonen).

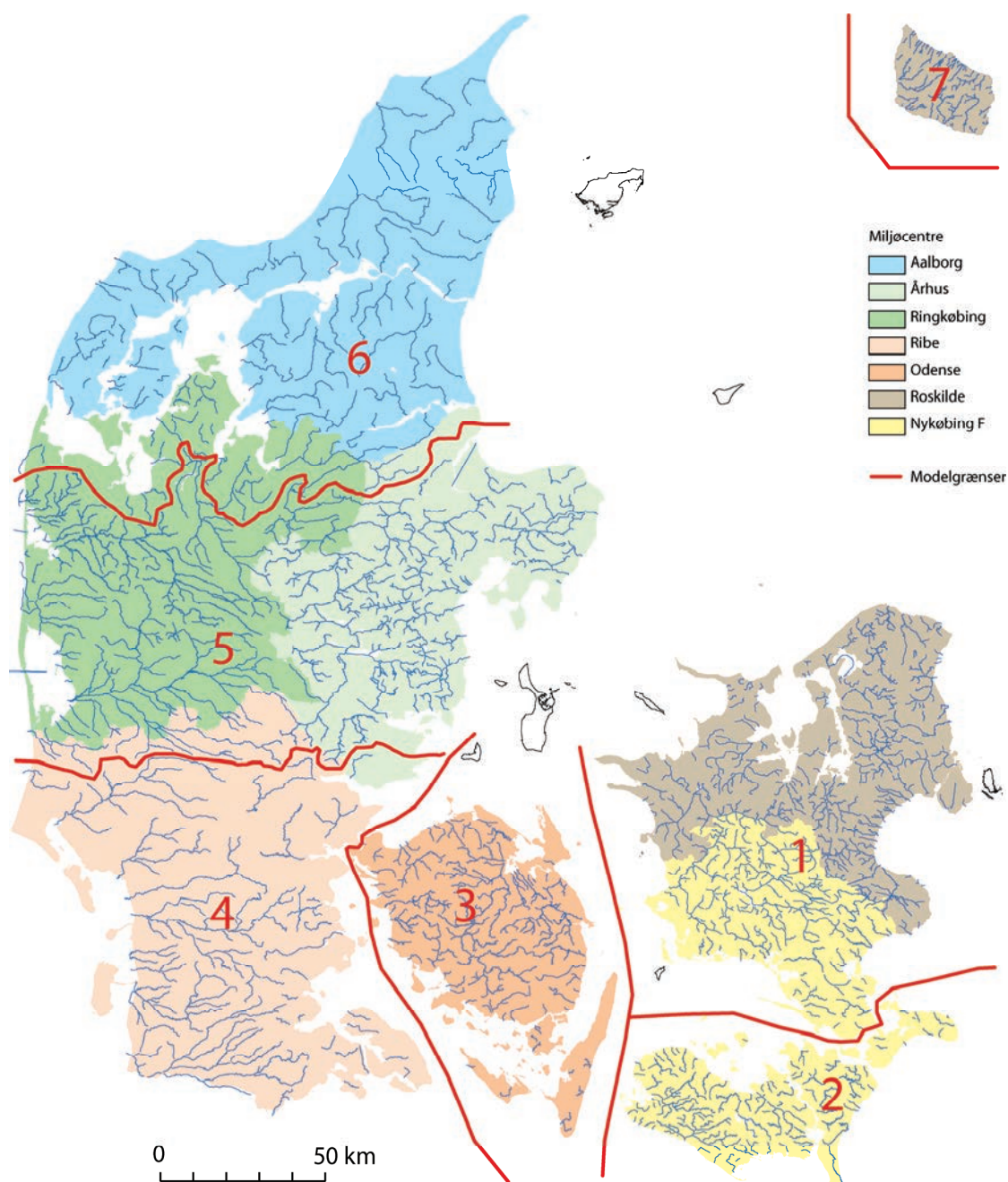
- Den mættede grundvandszone (SZ), herunder drænastrømning. Vandstrømningen i den mættede grundvandszone beskrives ved en fuld tredimensionel strømningsbeskrivelse. Drænastrømningen bliver løst ved en lineær reservoir beskrivelse, hvor vandet dirigeres til nærmeste vandløb eller til havet (modelranden).
- Vandstrømning i vandløbene (MIKE 11), der giver en endimensionel beskrivelse af vandstrømningen.

I forhold til DK-model2003 er det overordnet set det samme modelsystem der anvendes. Eneste undtagelser herfra er beskrivelsen af den umættede zone (afsnit 3.1.4) samt vandløbsbeskrivelsen, hvor der er sket en konvertering af vandløbene for øerne til MIKE 11 (afsnit 3.1.5). Mht. det anvendte software er der sket en løbende opdatering af softwarepakken, ikke mindst den grafiske brugerflade som er blevet gennemgribende opdateret og forbedret. DK-modellen er opstillet i MIKE ZERO version 2009 servicepack 3.

3.1.2 Delmodeller

I forhold til den første version af DK-modellen (Henriksen og Sonnenborg, 2003) har det, pga. øget maskinkraft, været muligt at opstille DK-modellen med større og dermed færre delmodeller på trods af den finere horisontale opløsning på 500 x 500 m. Eksempelvis har det været muligt at opstille en samlet model for Sjælland, ligesom det har været tilstrækkeligt at opdele Jylland i tre delmodeller. I forbindelse med den første version af DK-modellen blev det fundet, at den jyske højderyg ikke definerede en velegnet randbetingelse, idet der var væsentlige grundvandsstrømninger på tværs af det topografiske hovedvandskel, som det var problematisk at repræsentere med veldefinerede randbetingelser. I DK-model2009 er det derfor valgt at lade delmodellerne for Jylland udspænde hele Jylland i øst-vest gående retning.

DK-model2009 er opbygget af 7 delmodeller som vist på Figur 1. Under opdateringen 2005 – 2009 er der ikke foretaget en opdatering af modelområde 7 (Bornholm). Denne er til gengæld opdateret i et selvstændigt projekt (Troldborg et al., 2009) og foreligger i samme detaljering som de øvrige delmodeller og udgør således en naturlig del af den samlede DK-model. De enkelte delmodellers areal samt antallet af grids i det horisontale plan er angivet i Tabel 1.



Figur 1. Afgrænsning af de syv delmodeller indeholdt i den opdaterede DK-model samt grænser for de syv miljøcentre. Arealer uden fyldfarve er ikke medtaget i modellen.

Tabel 1. Areal af de syv delmodeller samt antal grids i det horisontale plan.

Delmodel	Samlede landareal (km ²)	Antal aktive horisontale grids inklusiv hav/fjord
Område 1 – Sjælland	7163	37569
Område 2 – Sydhavsøerne	2042	13885
Område 3 – Fyn	3473	24009
Område 4 – Sønderjylland	7897	35869
Område 5 – Midtjylland	11578	49993
Område 6 – Nordjylland	9934	47649
Område 7 – Bornholm	590	9432

Vurdering

Med en horisontal grid opløsning på 500 x 500 m er det muligt at opnå en betydelig bedre beskrivelse af de rumlige variable i modellen, såsom distribuering af de hydrauliske parametre og repræsentation af topografi og vandløbsnetværket. I forbindelse med en vurdering af de overordnede vandbalanceforhold vurderes den rumlige diskretisering tilstrækkelig. Ved detailvurderinger af grundvands- overfladevandsinteraktionen vil de topografiske variationer, især tæt ved vandløbene, være betydelige. I denne forbindelse bør det vurderes, om den anvendte gridstørrelse på 500 x 500 m vil resultere i en opløsning i de topografiske forhold, der er for grov.

Ved opstilling af en hydrologisk model skal der langs modellens periferi specificeres randbetingelser, der beskriver modellens interaktion med det omkringliggende miljø. De anvendte randbetingelser vil lokalt influere modelsimuleringerne, og det er derfor vigtigt at randen så vidt muligt placeres sammenfaldende med naturlige hydrauliske betingelser, såsom vandskel eller hav. Anvendelsen af større delmodeller har betydet, at der indgår færre landbaserede rande, hvor det generelt er problematisk at opstille troværdige randbetingelser. I den opdaterede version er der således kun landbaserede rande i Jylland.

3.1.3 Hydrostratigrafisk model

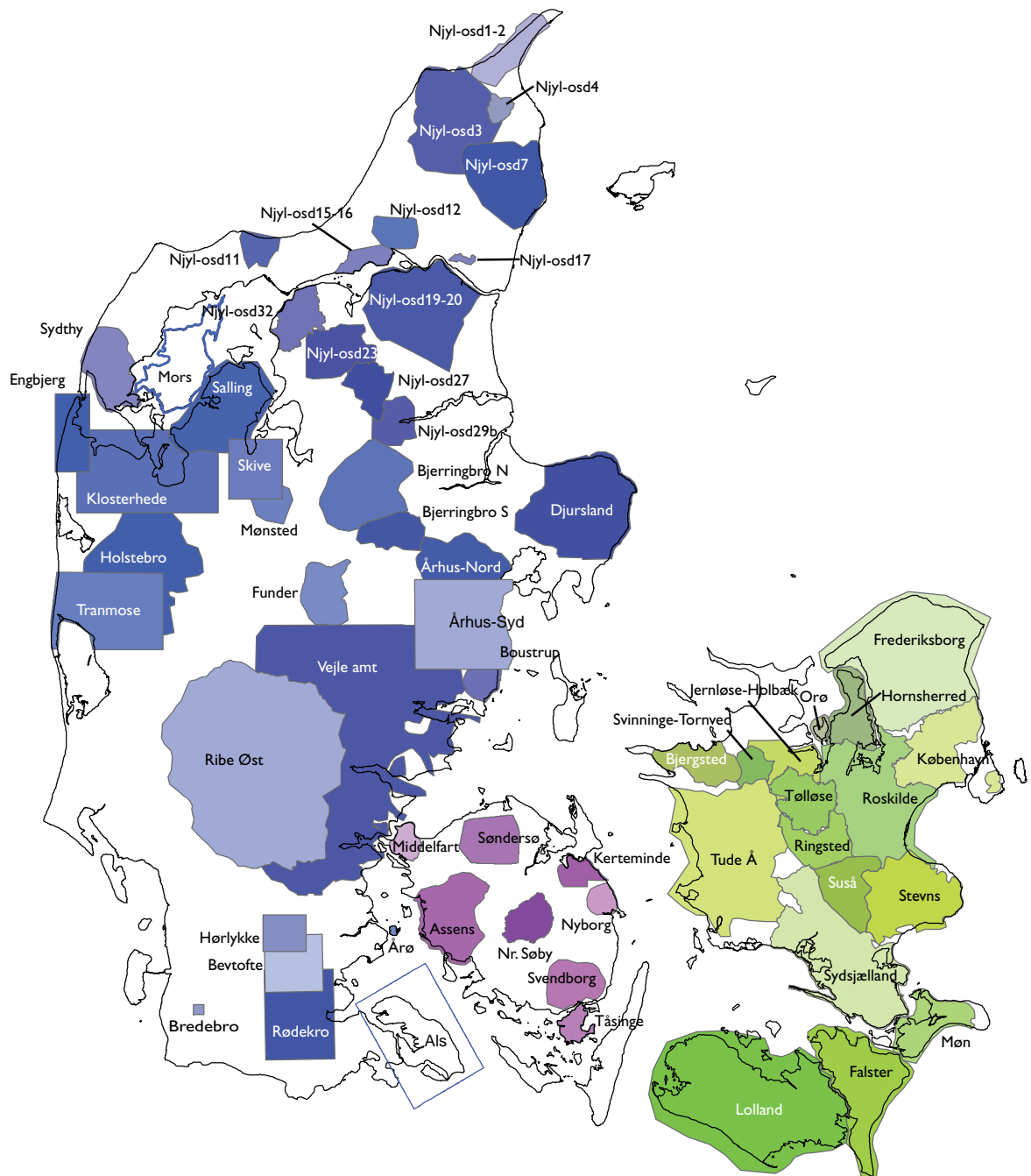
Den mest omfattende opgave i forbindelse med opdateringen har været en opdatering af den geologiske og hydrostratigrafiske model. Denne opdatering er baseret på en gennemgang af de geologiske og/eller hydrostratigrafiske modeller (herefter amtsmodeller), der var opstillet i amterne frem til 2005. Opdateringen er foregået ved afholdelse af seminarer med deltagelse af personer fra GEUS samt de tidligere amter, hvori de enkelte amtsmodeller blev gennemgået og vurderet, og hvor det blev besluttet hvilke dele af amtsmodellerne, der skulle medtages i opdateringen. I denne forbindelse er der gennemgået mere end 50 tidligere amtsmodeller, Figur 2. I det følgende beskrives summarisk formålene samt indholdet af opdateringen af den hydrostratigrafiske model. For en detaljeret beskrivelse af principperne, procedureerne samt resultaterne af opdateringen henvises til (Nyegaard et al., 2010).

Formålet med opdateringen af den geologiske og hydrostratigrafiske model har været at tilvejebringe en geologisk og hydrostratigrafisk model på nationalt niveau, der er konsistent på tværs af tidligere modeller og administrative skel og tilgodeser tolkningerne i de tidligere lokalmodeller udviklet af amterne på en skala, der i videst mulig omfang tilgodeser opløsningen i de tidligere lokalmodeller.

Vigtige hensigter for den fremtidige anvendelse af den geologiske og hydrostratigrafiske model er, at de kan anvendes som udgangspunkt i forbindelse med nye detailkortlægninger og -modeller, at de kan udgøre en ramme hvori ny viden opnået under fremtidige kortlægninger og modeller kan indarbejdes og endelig at de kan indgå som redskab i sagsbehandlingen generelt indenfor administrationen af det danske grundvand af relevante myndigheder.

Målene for opdateringen af den geologiske og hydrostratigrafiske model har således ikke alene været at opnå en mere detaljeret og korrekt beskrivelse af vandets kredsløb. Som det fremgår af ovenstående har et vigtigt mål ligeledes været at opnå en samlet og opdate-

ret beskrivelse af geologien/hydrostratigrafien, der kan anvendes af relevante myndigheder. Modellen kan i denne forbindelse opfattes som en 3D geo-relateret database, på basis af hvilken det er muligt at give en tredimensionel repræsentation af hydrostratigrafiske enheder, for eksempel grundvandsforekomster. I kombination med de indlagte hydrologiske og hydrauliske data sætter modellen således data i relation til den konceptuelle forståelse af det hydrologiske system på nationalt niveau. Gennem kalibrering og validering af den hydrologiske model er det endvidere muligt at foretage en kvalitetssikring af den hydrostratigrafiske opbygning, og derigennem påpege behov for fremtidige opdateringer.



Figur 2. Oversigt over hvilke amtsmodeller gennemgået i forbindelse med opdateringen af DK-modellen.

Opdateringen af den geologiske og hydrostratigrafiske model kan sammenfattes ved:

- Der er kun foretaget en geologisk opdatering i de områder, hvor der forelå eksisterende amtsmodeller. I de øvrige områder er der generelt ikke udført en opdatering af geologien, dog er der sket en mindre opdatering af den geologiske model for Jylland baseret på nye dybe boringer.
- Hvilke dele af de tidligere amtsmodeller (områder og/eller flader), der skulle medtages i opdateringen er besluttet i samråd mellem de tidligere amter og GEUS. I enkelte tilfælde er der kun medtaget en meget begrænset mængde data fra de tidligere modeller.
- Den geologiske opdatering er sket ved en udskiftning af DK-modellens geologi samt sammentolkning med amtsmodellerne. Der er ikke sket en gentolkning af de eksisterende amtsmodeller.
- For øerne har der været anvendt en lagtolkning i såvel DK-model2003 som de tidligere amtsmodeller. Her er indarbejdelsen af lokalmodellernes geologi foretaget ved udskiftning af de punkter, der er indgået til interpolation af de geologiske flader. Konkret betyder det, at punkter fra DK-model2003 er slettet og erstattet med punkter fra amtsmodellerne, før interpolationen er udført. For Jylland er den geologiske tolkning i DK-model2003 udført som en pixeltolkning, bestående af 10 m tykke pixler med en horisontal udbredelse på 1 x 1 km. Den geologiske opdatering for Jylland er udført ved at anvende pixeltolkningen som "baggrundsgeologi", der efterfølgende er overskrevet med de geologiske lag fra lokalmodellerne. For en nærmere beskrivelse heraf henvises til Nyegaard et al. (2010).
- Der er kun medtaget modeller, der forelå som en tredimensional geologisk tolkning/model på digital form. Dvs., tolkningen skulle give en fuldstændig tredimensional beskrivelse af geologien, hvor geologiske enheder/formationer/legemers rummelige udstrækning samt deres indbyrdes placering var beskrevet.
- Det er tilstræbt at skelne mellem geologiske tolkningsdata og hydrostratigrafiske/beregningslag, som anbefalet i Jørgensen et al. (2008). For de fleste amtsmodeller har der imidlertid ikke været en klar opdeling mellem disse datatyper, ligesom det ofte ikke har været muligt at fremskaffe de geologiske tolkningspunkter. Det har derfor ikke været muligt at opnå en stringent opdeling mellem en rumlig geologisk model og en hydrostratigrafisk model.
- For øerne er den geologiske og hydrostratigrafiske model sammenfaldende. I Jylland er der tolket en ny sammenhængende hydrostratigrafisk model dækkende hele Jylland. I denne forbindelse er der i områder uden eksisterende amtsmodeller konstrueret nye profillinjer primært orienteret i øst-vest gående retning med en indbyrdes afstand på 5 km.
- Et væsentligt element for opdateringen har været valg af skala. Kravene til den valgte skala har været, at den i videst muligt omfang skulle kunne tilgodese opløsningen i de tidligere amtsmodeller. Detaljeringen i de tidligere modeller er søgt beholdt ved at medtage de oprindelige tolkningsdata, hvor disse forelå. I øvrige tilfælde er der medtaget griddata, som er konverteret til punkter (ét for hvert grid). Enkelte modeller var dog opbygget i en meget fin opløsning med eksempelvis 25 m gridceller. Konvertering af samtlige gridceller resulterede i meget store datafiler, som var praktisk uhåndterbare. I disse tilfælde er de oprindelige grid konverteret til konturlinjer, som er medtaget i interpolationen af de endelige flader. Konverteringen

til konturlinjer er kun foretaget for grid der lå på en opløsning mindre end 100 x 100 m.

- En eventuel parameterisering af de hydrauliske egenskaber i de tidligere amtsmodeller, såsom zonerings af den hydrauliske ledningsevne, er ikke medtaget under opdateringen. Dette er dels begrundet i ønsket om gennemskuelighed samt for at undgå en overparameterisering af modellen.

Vurdering

Med den geologiske og hydrostratigrafiske opdatering er der sket en markant forbedring af den rumlige beskrivelse af grundvandssystemet, der er i overensstemmelse med de lokale og mere detaljerede modeller, der indgik i opdateringen. For Jylland er overgangen til en sammenhængende hydrostratigrafisk model af stor praktisk betydning. Ved at relatere nye detailmodeller til det anvendte koncept, er det muligt at relatere de enkelte delmodeller til hinanden. Herved undgås den fragmentering, som tidligere har været fremherskende, hvor detailmodellerne har fremstået som isolerede tolkninger uden stillingtagen til eventuelle sammenhænge mellem modellerne. Den hydrostratigrafisk model udgør endvidere en ramme, hvori det er muligt at integrere geologisk viden, uden at der foreligger en samlet tredimensionel tolkning. Er der eksempelvis foretaget en detaljeret kortlægning af et magasin, vil det være muligt at opdatere modellen lokalt ved udskiftning af data for de lag, der definerer top og bund af magasinet.

Da der til stadighed udføres nye geologiske kortlægninger og detailundersøgelser, vil den geologiske forståelse imidlertid forbedres løbende. For at opnå en model der til stadighed afspejler den aktuelle viden og forståelse af det hydrologiske og hydrogeologiske system, er det vigtigt, at der fremover sker en regelmæssig opdatering af modellen. Nærværende opdateringen skal således ikke ses som et endeligt slutprodukt, men som et skridt på vejen i en model, der løbende opdateres.

3.1.4 Umættet zone og grundvandsdannelse

Til forskel fra DK-model2003 beregnes nettonedbøren i den opdaterede version med modulet "two-layer", der er en integreret del af MIKE SHE. Modulet er en simplificeret beskrivelse af vandindholdet i den umættede zone baseret på en vandbalance betragtning. Modulet beskriver ikke selve strømmingen i den umættede zone, og der ses således bort fra forsinkelsen af vandstrømmingen ned gennem den umættede profil. Modulet giver endvidere ikke mulighed for en detaljeret beskrivelse af den kapillære stigning ligesom makroporestrømninger kun delvist kan repræsenteres ved anvendelse af en by-pass funktion, der tillader strømning ud af den mættede zone ved vandindhold under markkapaciteten. Til trods for den simple beskrivelse er overgangen til two-layer en betydelig forbedring, idet der tages højde for grundvandsstanden, hvor et vandspejl tæt på terræn forårsager en øget fordampning via evapotranspiration.

Til beregning af evapotranspiration skal der estimeres relevante jordfysiske parametre. Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet (DJF) ved Århus universitet har på basis af laboratoriestudier af de jordfysiske parametre for den umættede zone opstillet pedotransferfunktioner der korrelerer overjordens tekstur med jordfysiske parametre (Børgesen & Schaap, 2005). På basis heraf samt en interpolation af overjordens tekstur for hele landet har DJF genereret et 250 x 250 m raster grid over de jordfysiske parametre for hele landet (Greve et al., 2007). I DK-model2009 er dette raster grid aggregeret, så der er beregnet en middelværdi

af de jordfysiske parametre indenfor hver jordbunds type (JB-type). I Olesen & Heidemann (2002) er det vurderet, at udviklingen af rodzonedybden, der er en dominerende faktor ved beregning af den aktuelle evapotranspiration, primært er styret af jordbundsforholdene og i mindre grad af den aktuelle vegetation. Det er derfor valgt at bibeholde beskrivelsen af landbrugsafgrøderne som én gruppe, mens den rumlige variation i rodzone er beskrevet på baggrund af jordbundstyperne.

Vurdering

Med overgangen til two-layer er der opnået en kobling mellem den umættede og den mættede grundvandszone. Endvidere er der sket en detaljering af fordelingen af jordbundsforholdene for specielt rodzonen. Der er således sket en væsentlig detaljering i beskrivelsen af fordampningen og dermed beskrivelsen af ferskvandskredsløbet.

For beskrivelsen af den overordnede vandbalance vurderes den anvendte løsning fuldt tilstrækkelig. I tilfælde hvor transporttiden gennem den umættede zone er vigtig, vil den valgte løsning imidlertid ikke være tilstrækkeligt, idet forsinkelsen ned gennem den umættede zone negligeres i two-layer. Dette vil specielt være problematisk, hvor der findes en dyb umættet zone. Negligering af den kapillære stigning vil specielt være kritisk ved detailvurderinger af ådale og vådområder, hvor grundvandsstanden står højt, mens den manglende beskrivelse af makroporestrømninger primært vil være kritisk ved stoftransportsimuleringer.

3.1.5 Overfladevandssystemet

Modellen er en integreret grundvands-/overfladevandsmodel med en direkte kobling mellem de to systemer. For øerne er beskrivelsen af vandløbene konverteret til modelkoden MIKE11, så der i DK-model2009 anvendes MIKE11 til beskrivelse af overfladesystemet for hele Danmark. Under opdateringen er der endvidere indhentet eksisterende MIKE11 opsætninger samt opmålte vandløbstværsnit fra amterne. Mens der således opnås en detaljeret beskrivelse af vandløbenes fysiske udformning, er der anvendt en simpel beskrivelse af søerne, der er indlagt som brede vandløbstværsnit. Til beskrivelse af vandstrømningen i overfladevandssystemet er det valgt at anvende en simpel løsning, hvor vandet routes (dirigeres) gennem vandløbet ("No discharge transformation"). Denne løsning er begrundet i modeltekniske årsager, hvor en fuld dynamisk beregning af vandløbsstrømningen vil medføre signifikant længere simuleringstider.

Data om udledninger fra renseanlæg og afværgeforanstaltninger er indhentet fra amterne. Samtlige udledninger er indlagt som MIKE11 randbetingelse i modellen.

Vurdering

Den anvendte løsning af vandløbene (routing) vurderes at være tilstrækkelig til estimering af den overordnede vandbalance samt beskrivelsen af grundvandsstrømning i de dybere-liggende grundvandsmagasiner. Den simple løsning betyder dog, at der bl.a. ikke tages hensyn til søernes reservoirvirkning. Beskrivelsen af søerne som brede vandløb betyder samtidigt, at der kun sker en lokal udveksling mellem søerne og grundvandsmagasinet, selv i tilfælde hvor søerne har en stor arealmæssig udbredelse. Endvidere kan der ikke medtages vandløbsbygværker, og det er derfor ikke muligt at medtage eventuelle reguleringer af vandstrømningen, eksempelvis ved udløb fra søer. Hvor der er behov for en detaljeret vurdering af det overfladenære grundvandssystem, udvekslingen mellem grundvand

og overfladevandet, samt i særdeleshed ved studier af vandbalancen for søer, vurderes det nødvendigt at anvende en mere detaljeret og fysisk korrekt beskrivelse af vandløbsstrømningen samt repræsentation af søerne.

Mht. datagrundlaget for udledninger har dette været noget mangelfuldt fra flere amter. I den sidste periode af opdateringen blev det derfor valgt at indhente data om spildevandsudledninger direkte fra databasen "WinSpv", der indeholder data fra alle renseanlæg i Danmark indsamlet under NOVANA og drives af fagdatacentret for punktkilder under By- og landskabsstyrelsen. Fremover vil det være hensigtsmæssigt med en standardisering, så spildevandsudledninger indhentes centralt for hele landet. Det vurderes endvidere, at der er behov for gennemgang og detaljering af data for afværgeforanstaltninger, specielt ved anvendelse af modellen som udgangspunkt for detaljerede modelopstillinger.

3.1.6 Klimainput

Som klimainput er der anvendt døgnværdier for nedbør, potentiel fordampning samt temperatur baseret på DMIs klimagrid. Datagrundlaget er klimadata indkøbt under overvågningsprogrammets fællesaftale om indkøb af klimadata, der er downloaded fra DMI's NOVANA klima-web site (NOVANA.dmi.dk). Der er anvendt de mest detaljerede data, der var uploADED til hjemmesiden på det tidspunkt, modellen blev opstillet. For nedbørsdata er der anvendt 10x10 km klimagrid for hele perioden. For temperatur og potentiel fordampning er der frem til 1. januar 1999 anvendt 40x40 km klimagrid, mens der i den resterende periode er anvendt en opløsning på 20x20 km. Som anbefalet i Plauborg et al. (2002) er nedbørsdata korrigeret på månedsniveau, mens fordampningen er beregnet på basis af Makkink. Med erfaringerne fra DK-model2003, hvor der generelt var for meget vand, er der anvendt værdier for en maksimal fordampning, dvs. der er anvendt maksimale værdier for afgrøde koefficienterne (k_c) til beregning af referencefordampningen.

Vurdering

Med overgangen fra 40 x 40 km til 10 x 10 km og 20 x 20 km klimagrid er der sket en markant forbedring af den rumlige opløsning, der i langt højere grad gør det muligt at opløse regionale/lokale variationer i de klimatiske forhold. Ved udgangen af 2009 blev det under det tværgående indkøb af klimadata under NOVANA besluttet, at aftalen om indkøb af klimadata skulle udvides til også at omfatte data for vindhastighed, temperatur og potentiel fordampning i 20 x 20 km klimagrid tilbage til 1989. Det er således nu muligt at detaljere klimainputtet yderligere for årene før 1990, ligesom det vil være muligt at udføre en dynamisk korrektion af data på gridniveau frem for den anvendte standardkorrektion.

Den anvendte opløsning i klimagriddene vurderes at være tilstrækkelig for en række praktiske modelopgaver. Da klimagriddene endvidere leveres via finansiering af NOVANA programmet, vil klimagriddene på DMIs NOVANA side være standard for fremtidige modelopstillinger foretaget af NOVANA aktørerne. Vurderes der at være behov for en finere opløsning, kan dette ske enten ved anvendelse af stationsdata eller ved rekvirering af finere klimagrid fra DMI, hvilket ikke leveres som standard. I forbindelse med en ressourcevurdering vil de anvendte klimadata have en afgørende betydning. Ved anvendelse af en anden opløsning (både mindre og større skala) anbefales derfor udført en sammenligning med klimadata anvendt i DK-modellen for belysning af eventuelle forskelle samt vurdering af betydning heraf.

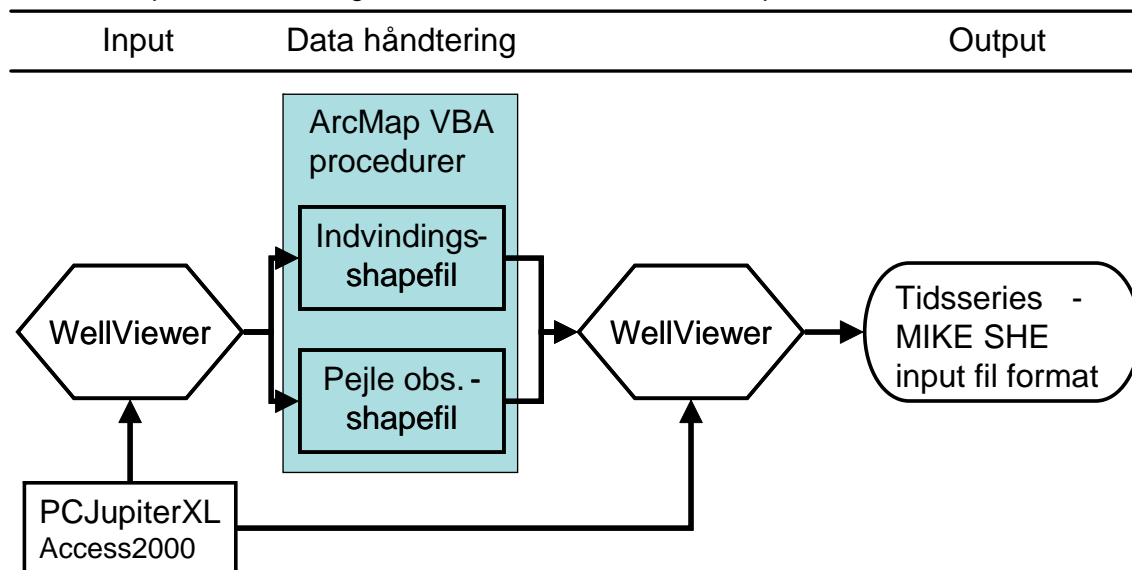
3.1.7 Indvindinger

For at opnå en samlet oversigt over indvindingerne og deres fysiske placeringer, er det valgt at medtage samtlige indvindinger lagret i JUPITER databasen, uden skelen til indvindingerens størrelse og betydning for vurdering af den overordnede vandbalance. Samtlige indvindinger er endvidere fordelt ud på de enkelte indtag indenfor et anlæg. Denne fremgangsmetode er begrundet i ønsket om at opbygge modellen, så den i videst muligt omfang kan anvendes som udgangspunkt for detailmodeller.

Med overgangen til two-layer er det blevet muligt at anvende en behovsstyret markvanding, hvor indvindingen til markvandingen er linket til en specifik indvindingsboring. Dette betyder, at indvindingen til markvanding ikke specificeres på forhånd for de enkelte år, men styres af det aktuelle vandunderskud der opstår i rodzonen i en given gridcelle. Der er to væsentlige fordele ved at kunne håndtere markvandingen på denne måde: 1) det har historisk set været svært at indhente troværdige bud på de faktiske indvundne størrelser anvendt til markvandingen på årsbasis, og 2) det er muligt at anvende modellen til klimascenarier, hvor markvandingsbehovet (størrelse og tidsmæssigt) vil ændres for forskellige klimascenarier, på en måde der ikke på forhånd kan fastlægges. Markvandingen er specificeret på indtagsniveau, dvs. alle indtag registreret aktive til markvanding er indlagt efter deres x, y, og z koordinaterne angivet i Jupiter. Til hver boring er der endvidere angivet et tilhørende landbrugsareal, hvorpå markvandingen sker.

Alle informationer omkring indvindinger er udtrukket fra Jupiter databasen. For at sikre en stringent databehandling er der i forbindelse med modelopdateringen udviklet et program *WellViewer* samt GIS-rutiner. Det overordnede flow i dataprocesseringen er illustreret i Figur 3 og består af følgende trin:

1. PC-JupiterXL udtræk som access database for modelområdet.
2. Konvertering af access database til en ArcMap shape fil vha. *WellViewer*.
3. Dataprocessering vha. udviklede GIS-rutiner.
4. Eksport af indvindingsfiler via *WellViewer*, der kan importeres direkte i MIKE SHE.



Figur 3. Flow i processing af indvindings- og pejledata. ArcMap procedurerne foretages vha. udviklede visual basic (VBA) rutiner.

Med den anvendte procedure registreres eventuelle ændringer detaljeret på indtagsniveau og kan danne grundlag for en efterfølgende kvalitetssikring. Med det udviklede programmel kan indvindingstidsserier endvidere opdateres hurtigt på basis af et nyt PCJupiter udtræk kombineret med GIS-tabellen indeholdende eventuelle korrektioner.

Programmet *WellViewer* er en del af software suiten *MikeSheWrapper*, der indeholder flere hjælperutiner, specielt møntet på anvendelse i forbindelse med MIKE SHE opsætninger/simuleringer. Programpakken er "Open source" og kan downloades fra <http://code.google.com/p/mikeshewrapper/downloads/list>

Vurdering

Repræsentationen af indvindinger er både rumligt og tidsligt indlagt i modellen i samme detaljeringsgrad, som de er lagret i JUPITER. Ved henvendelse til vandværker vil det i nogle tilfælde være muligt at indhente mere detaljerede informationer, specielt vedrørende den tidsvarierende indvinding. For DK-modellens primære formål er den indlagte repræsentation helt tilstrækkelig. Med det udviklede værktøj sikres endvidere en stringent og gennemsigtig datahåndtering, ligesom ressourceforbruget ved opdatering og præprocessering af tidsserierne er betragteligt reduceret.

Under opdateringen blev der i flere tilfælde registreret manglende eller fejlagtige informationer i Jupiter. Informationer herom er videregivet i GIS-tabel, men der vurderes generelt at være et behov for, at dataejer får foretaget de nødvendige opretninger i Jupiter. Fejlagtige informationer i Jupiter vil potentielt kunne have stor betydning ved ressourcenvurderingerne, ikke mindst på regionalt/lokalt niveau.

3.1.8 Parameterisering

Under modelopstillingen er det tilstræbt at anvende så få parametre som muligt. Dette er dels begrundet i et ønske om at holde modellen så gennemskuelig som muligt samt for at undgå en overparameterisering. De vigtigste antagelser gjort i forbindelse med parameteriseringen er:

- De hydrauliske parametre for sammenlignelige aflejringer antages ens. Det betyder, at der kun skelnes mellem følgende hydrauliske enheder: kvartært sand og ler, prækvartært sand og ler samt kalk. Dog er det for den øverste zone antaget, at leret har en højere hydraulisk ledningsevne end det øvrige ler pga. tilstedeværelsen af sprækker. For Sjælland har der endvidere været et forholdsvist omfattende datamateriale for specifik ydelsesdata fra kalkboringer, der har muliggjort en rumlig fordeling af den hydraulisk ledningsevne i kalken på basis af interpolation. Variation i transmissiviteten indenfor de øvrige enheder (sand og ler) er derimod alene distribueret jf. variationen i deres tykkelse.
- Udvekslingen mellem grundvand og vandløb antages beskrevet ved én lækagekoefficient, dvs. der tages ikke højde for eventuelle forskelle i hydrauliske egenskaber for vandløbsbunden. Den samlede vandløbslækage beskrives dog på baggrund af både hydrauliske egenskaber for vandløbsbunden og grundvandsmagasinet og vil derfor effektivt være distribueret.
- Drænstrømningen i modellen repræsenterer såvel kunstig dræning samt naturlig dræning via småkanaler og grøfter, der ikke kan medtages i modellen pga. den anvendte skala. Det er antaget, at drænstrømningen kan beskrives ved én drændybdede og én tidskonstant.

Vurdering

Med kun én parameter til beskrivelse af de hydrauliske egenskaber, er det ikke muligt at tage højde for regionale/lokale variationer i de hydrauliske egenskaber. Ved anvendelse af modellen til overordnede betragtninger på en skala svarende til de enkelte delmodeller vurderes de anvendte simplificeringer at være acceptable og sikre gennemsigthed. Indenfor de enkelte delmodeller er der dog rumlig forskel på, hvor godt modellerne performer. For at opnå en mere homogen performance vil det være nødvendigt at tage højde for heterogeniteten på en mindre skala.

3.2 Kalibrering og validering

Modellen er kalibreret og valideret ved anvendelse af en split-sampling test, hvor data fra 2000 – 2003 er anvendt til kalibreringen, mens data fra 2004 – 2007 har været reserveret til validering. Hver delmodel er kalibreret inverst på basis af en dynamisk version af modellen. Eneste undtagelse herfra er modellen for Lolland, Falster og Møn. For denne model blev der foretaget en proxy-basin test, hvor de optimerede værdier for Sjællandsmodellen blev overført til modellen for sydhavsøerne uden en efterfølgende justering af parametrene.

MIKE ZERO indeholder et modul til invers kalibrering "AutoCal", der er en global optimeringsalgoritme. Globale optimeringsalgoritmer er specielt favorable i tilfælde, hvor det betragtede system er stærkt ikke-lineært. Ulempen ved de globale optimeringsalgoritmer er imidlertid, at de kræver mange modevalueringer (simuleringer), hvor eksempelvis 1000 modelsimuleringer ikke er ualmindeligt. Indenfor integreret hydrologisk modellering er det specielt den umættede zone, der kan resultere i et ikke-lineært system. Med anvendelse af two-layers til beskrivelse af den umættede zone er det anvendte modelkompleks imidlertid ikke stærkt ikke-lineært, og det er muligt at anvende lokale optimeringsalgoritmer, der generelt kræver væsentlig færre modevalueringer. Det er derfor valgt at anvende PEST, ver. 11.8. (PEST) til optimering af modellerne. En ekstra fordel ved anvendelse af PEST er, at det er muligt at definere vilkårlige kalibreringsmål der skal medtages i kalibreringen, og ikke være begrænset af de optioner der tilbydes i GUI'en for AutoCal. En ulempe ved anvendelse af PEST er imidlertid, at denne ikke supporteres i MIKE ZERO. Det har derfor været nødvendigt at foretage kalibreringen "bagom" MIKE ZERO skallen, hvilket bl.a. har gjort det nødvendigt at udvikle nogle hjælpeprogrammer.

Som observationsdata er der anvendt grundvandspotentialer og vandløbsafstrømninger. Potentialer er udtrukket fra Jupiter vha. programmet WellViewer, og der er foretaget datahåndtering i GIS som beskrevet for indvindingerne. Der er medtaget data tilbage fra 1990, hvor pejlinger fra indtag, hvori der kun eksisterer observationer fra før 2000, er medtaget som et middelvejl. Øvrige pejlinger er medtaget som dynamiske tidsserier. Data fra vandføringsstationer anvendt under kalibrering og validering af modellen er modtaget fra DMU. Der er sket en udvælgelse, så der kun er medtaget stationer, der er vurderet ikke at være reguleret. Endvidere er der generelt kun medtaget stationer repræsenterende oplande over 50 km². Hvor den rumlige dækning er vurderet utilstrækkelig, er der suppleret med vandføringsstationer for oplande ned til 30 km².

De anvendte kalibreringsmål er RMS (kvadratafvigelsessummen) og middelfejlen for potentialer, hvor der er beregnet en værdi for hhv. de enkelte tidsserier samt samlet pr. bereg-

ningslag. I Sonnenborg og Henriksen (2003) er der opstillet forskellige kriterier for vurdering af overensstemmelsen mellem de observerede og simulerede potentialer. Et af disse kriterier indeholder en sammenligning mellem RMS og standardafvigelsen på observationerne (s_{obs})

$$\frac{RMS}{s_{obs}} \leq \beta_2$$

hvor standardafvigelsen er en kombination af usikkerheden på observationen samt modellens evne til at reproducere observationerne, der igen afhænger af den naturlige variabilitet i området og diskretiseringen af modellen. Ved opstilling af dette kriterium for modellen for Sjælland blev der beregnet et nøjagtighedskriterium på 4,5 m for RMS, idet der blev valgt et nøjagtighedskriterium svarende til en konservativ akvifer simulering ($\beta_2 = 2$). Det væsentligste bidrag til standardafvigelsen skyldes den manglende opløsning af heterogeniteten i modellen, hvor ovenstående beregning alene er baseret på den estimerede heterogenitet i kalken, dvs. standardafvigelse og korrelationslængde for den hydrauliske ledningsevne i kalken. Miljøcenter Roskilde har parallelt med den nuværende DK-model opstilling kalibreret en variant af DK-modellen benævnt "Sjællandsmodellen" (Kürstein et al., 2009), hvor der er anvendt samme geologiske model, men er foretaget en underopdeling af de hydrauliske ledningsevner vha. zoner. Endvidere er den umættede zone beskrevet ved Richards ligning frem for Two-layer. Kalibreringsresultatet for Sjællandsmodellen var en vægtaget RMS for magasinerne på 5,26 m. Et nøjagtighedskriterium på $RMS \leq 4,5$ m for DK-modellen for Sjælland vurderes derfor at være forholdsvis strengt.

For at kunne estimere standardafvigelsen for potentielle observationerne, er der behov for en vurdering af den rumlige heterogenitet. For Sjælland er dette estimeret på basis af en geostatistisk karakterisering af den hydrauliske ledningsevne i kalken ud fra prøvepumpningsdata og specifik ydelsesdata. Tilsvarende data har ikke i samme grad været tilgængelige for de øvrige delmodeller. Et alternativt kriterium for RMS er relateret til den samlede variation i potentialet for modelområdet (Δh_{max}).

$$\frac{RMS}{\Delta h_{max}} \leq \beta_3$$

Jævnfør Sonnenborg og Henriksen (2003) er et passende kriterium for konservativ akvifer simuleringer, at RMS er 10 % af den samlede variation i potentialet ($\beta_3 = 0,1$). Dette resulterer imidlertid i et meget løst krav, hvor en acceptabel RMS for eksempelvis Sjælland er 9,8 m, altså væsentlig dårligere end resultatet opnået med DK-model2003. Baseret på disse vurderinger er det valgt at anvende kriteriet $RMS / \Delta h_{max}$, da dette har kunnet beregnes for alle delmodeller, men der er anvendt et nøjagtighedskriterium svarende til "hi-fi" akvifer simulering. De opstillede nøjagtighedskriterier for potentialerne varierer således mellem de enkelte delmodeller afhængigt af den maksimale variation i de observerede potentialer og fremgår af Tabel 2.

Nøjagtighedskriterierne for den opnåede middelfejl på potentialerne (ME) er på tilsvarende vis relateret til den maksimale variation i de observerede potentialer indenfor de enkelte delmodeller

$$\frac{|ME|}{\Delta h_{\max}} \leq \beta_1$$

hvor der er anvendt en værdi for konservativ akvifer simulering ($\beta_2 = 0,025$). De resulterende kriterier for de enkelte delmodeller fremgår af Tabel 2.

For vandføringsdata udgøres kalibreringsmålene af R^2 -værdien (Nash and Sutcliffe, 1970), der udtrykker modellens forklaringsgrad eller evne til at simulere dynamikken i afstrømningen. Endvidere anvendes vandbalancefejlen (Fbal), der beregnes for såvel hele kalibreringsperioden som for en low-flow situation, repræsenteret ved vandføringen i månederne juni, juli og august. Vurdering af Fbal for low-flow situationen er medtaget, idet den lave sommervandføring ofte er en begrænsende faktor i forbindelse med forvaltningen af det danske grundvand. Hvis modellen skal kunne anvendes til vurdering af denne situation, er det derfor vigtigt, at der medtages et mål herfor i kalibreringen, så modellen dels kan tilpasses denne situation, og der kan opnås et bud på hvor stor usikkerheden er på denne simulerede størrelse. Baseret på erfaringer fra den tidligere DK-model, samt en forventning om at kunne opnå et forbedret resultat med den finere gridsstørrelse, er følgende nøjagtighedskriterier opstillet for alle vandløb i samtlige delmodeller:

- Middel $R^2 \geq 0,65$
- Maks. 25% af stationerne må have en $R^2 < 0,60$
- Middel Fbal $< 10\%$
- Maks 25% af stationerne må have en Fbal $> 20\%$

Da vandføringerne ved low-flow situationerne ofte er tæt på nul, vil den procentuelle vandbalancefejl for denne situation være meget følsom overfor den aktuelle vandføring og kan variere markant for forskellige vandløb, selv i tilfælde hvor både den aktuelle vandføring og den absolutte vandbalancefejl målt i l/s er sammenlignelige. Vandbalancefejlen for sommervandføringen er således velegnet til vurdering af modelperformance for et enkelt vandløb ved anvendelse af forskellige modeller (forskellige model koncepter og/eller modelparametre) men mindre velegnet til en vurdering af performance for forskellige vandløb ved anvendelse af én model. Det er således vanskeligt at opstille et generelt mål for vandbalancefejlen for sommervandføringen, hvilket derfor ikke er forsøgt.

Under kalibreringen er der anvendt en balanceret vægtning, så potentialerne og vandløbsafstrømningen har haft lige stor vægt og dermed betydning under kalibreringen.

Vurdering

I forhold til DK-model2003 er der sket en væsentlig forbedring af kalibreringsgrundlag og – procedure. I forbindelse med amternes nedlukning blev der gennemført en datavask, hvor bl.a. amternes pejledata blev indlæst i Jupiter. Datagrundlaget i Jupiter er således steget drastisk. Ligesom tilfældet er for indvindinger, er der imidlertid registreret nogle mangler og fejl i data, der har gjort det nødvendigt at frasortere nogle data. Mens dette vil have mindre betydning på national skala, kan det have væsentlig betydning for forståelse af grundvandssystemet lokalt.

Erfaringer med stationær hhv. dynamisk kalibrering af modeller har vist, at det er svært/umuligt at kalibrere troværdige parametre for grundvandssystemet på basis af en stationær model, da eksempelvis den simulerede vandløbsdynamik er meget følsom overfor parametrene i specielt de overfladenære magasiner. Med overgangen til en fuld dynamisk kalibrering vurderes det derfor, at der er opnået en væsentlig mere robust kalibrering.

Med overgangen til en dynamisk kalibrering samt udvidelsen af datagrundlaget og kalibreringsmålene vurderes der at være tilvejebragt en langt bedre procedure for modelkalibreringen. Endvidere er det simpelt at udvikle proceduren til også at indbefatte andre kalibreringsmål, der måtte være relevante at inddrage i tilfælde, hvor modellen skal målrettes mod simulering af andre hydrologiske variable.

3.3 Resultater

Resultatet af modelkalibreringerne er summeret i Tabel 2 for potentialerne, mens resultaterne for vandløbsstationerne er angivet i Tabel 3. Som det fremgår, er der generelt opnået en tilfredsstillende simulering af potentialerne. Ligeledes har det generelt været muligt at opnå en tilfredsstillende vandbalance, med undtagelse af modellen for Sydhavsøerne der ikke er kalibreret men anvendt som proxy-basin test med parameterværdier fra Sjælland. Modsat har det ikke været muligt at opnå en tilfredsstillende beskrivelse af vandløbsdynamikken, som udtrykt ved R^2 -værdien.

Tabel 2. Kalibreringsresultat for potentialer

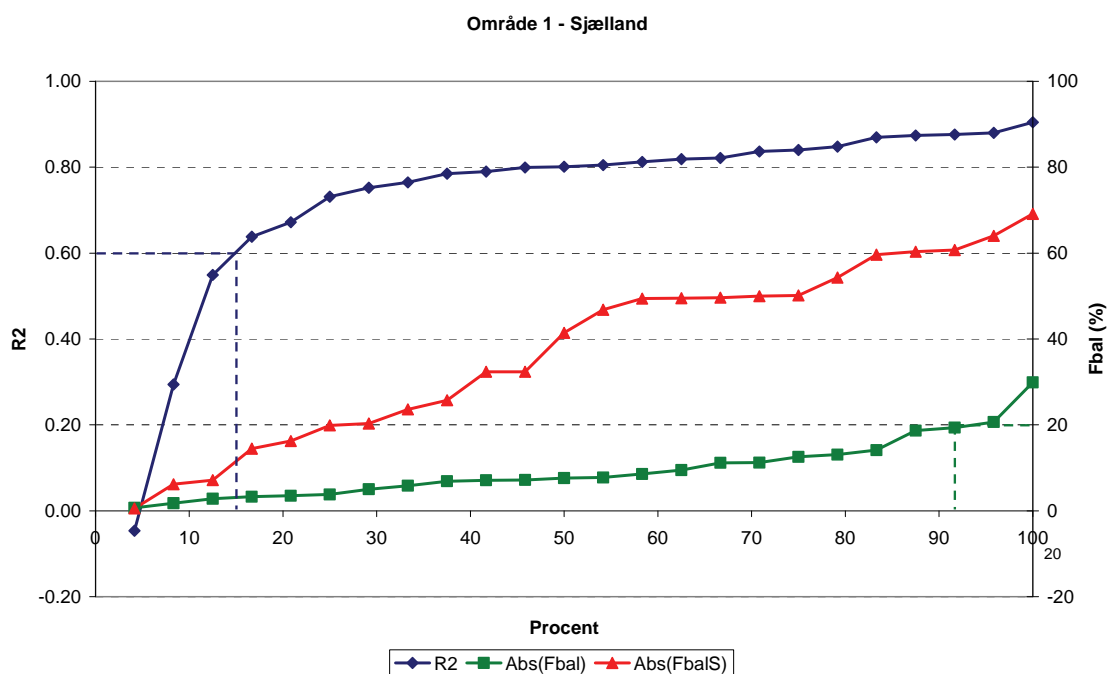
Delmodel	Middelfejl – ME (m)		RMS (m)		Indtag med pejlinger
	Kriterium	Resultat	Kriterium	Resultat	
Område 1 - Sjælland	± 2,45	-1,53	4,89	4,05	3399
Område 2 - Sydhavsøerne	± 1,00	1,27	2,00	2,34	169
Område 3 – Fyn	± 2,37	2,55	4,73	5,40	661
Område 4 - Sønderjylland	± 2,19	-0,49	4,37	5,03	1770
Område 5 - Midtjylland	± 3,86	-0,40	7,73	4,45	2658
Område 6 - Nordjylland	± 1,41	-0,38	2,82	4,03	1784

Tabel 3. Kalibreringsresultat for vandføring angivet som middel for de enkelte delområder.

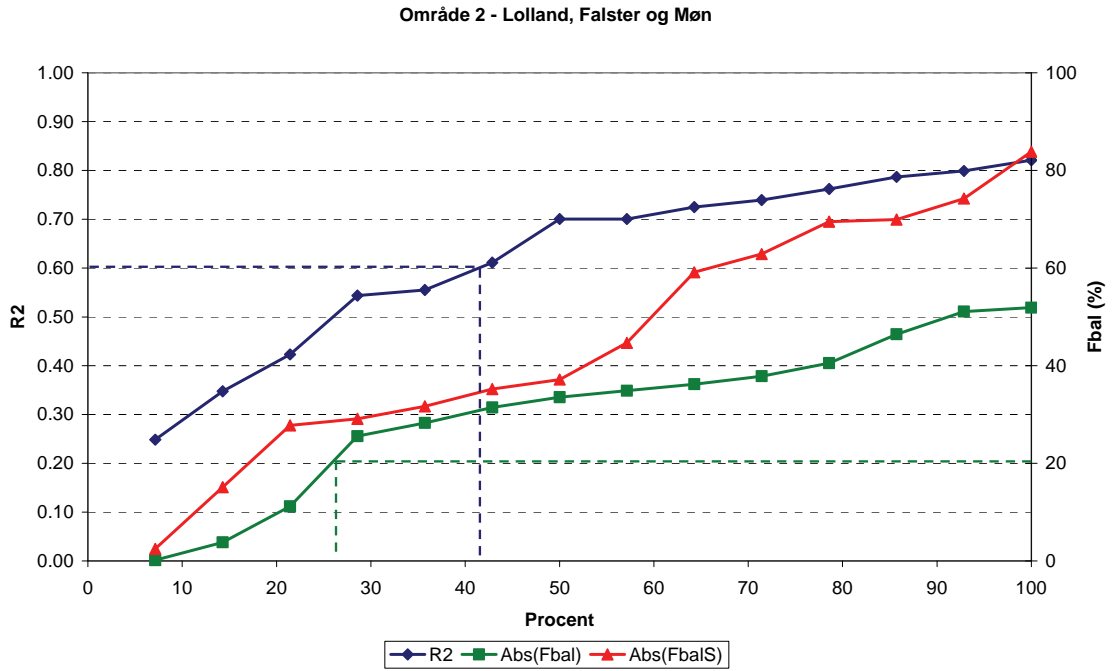
Delmodel	Antal	Kalibrering			Validering		
		R^2	Fbal (%)	FbalS (%)	R^2	Fbal (%)	FbalS (%)
Område 1 – Sjælland	24	0,74	-8	28	0,68	3	35
Område 2 - Sydhavsøerne*	16	0,63	-30	36	0,52	-17	44
Område 3 – Fyn	22	0,39	4	20	0,23	22	50
Område 4 – Sønderjylland	30	0,42	5	10	0,21	10	19
Område 5 - Midtjylland	58	0,30	-4	-10	0,17	-4	-16
Område 6 - Nordjylland	33	0,43	4	5	0,43	9	4
Kriterium		0,65	10	ej opstillet	0,65	10	ej opstillet

* Modellen for Sydhavsøerne er ikke kalibreret, her er der anvendt en proxy-basin test, hvor modelparametrene for Sjælland er overført til modellen for Sydhavsøerne.

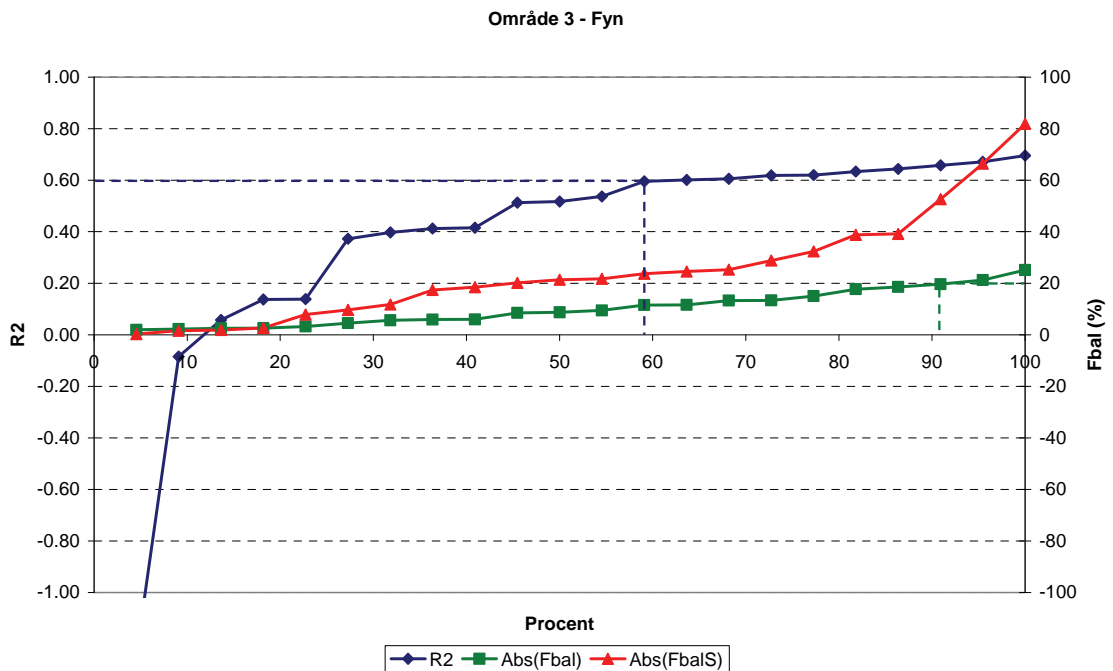
Figur 4 – Figur 9 viser fordelingskurven af kalibreringsresultatet for vandføringsstationerne for de enkelte delmodeller. Som det fremgår af figurene, er det kun modellen for Sjælland, der er i stand til at opfylde de opstillede kriterier med 15% (måltal: maks. 25%) af stationerne, der har en R^2 værdi på under 0.60. De opstillede kriterier for vandløbsdynamikken tager ikke hensyn til, at det generelt er nemmere at opnå en højere R^2 værdi for vandløb beliggende i moræneområder, hvor variansen af afstrømningen er større. Der kan derfor argumenteres for en differentiering af de opstillede krav til R^2 , med et mere lempeligt krav til vandløbene i Vestdanmark, hvor variansen i afstrømningen er væsentligt lavere. En mindre justering af kriterierne for de vstdanske vandløb vil dog ikke resultere i målopfyldelse for de jyske delmodeller. Mht. den samlede vandbalancefejl skiller modellen for Sydhavsøerne sig ud, idet ca. 70% (måltal: maks. 25%) af vandløbene har en vandbalancefejl på mere end 20%. Denne model gennemgik ikke en kalibrering, men blev anvendt som proxy-basin test. For de øvrige modeller er det kun modellen for Sydjylland, der ikke opfylder de opstillede kriterier.



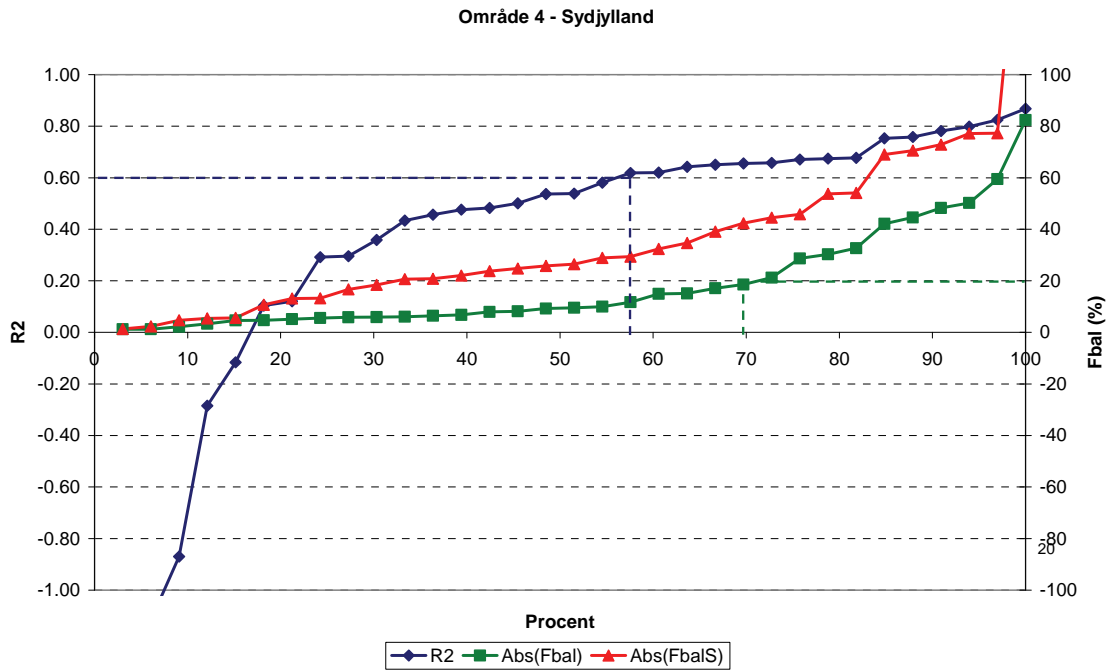
Figur 4. Fordelingskurve af R^2 , samlede vandbalance (Fbal) og vandbalance for sommermånederne juni, juli og august (FbalS) for vandføringsstationerne i delområde 1 - Sjælland.



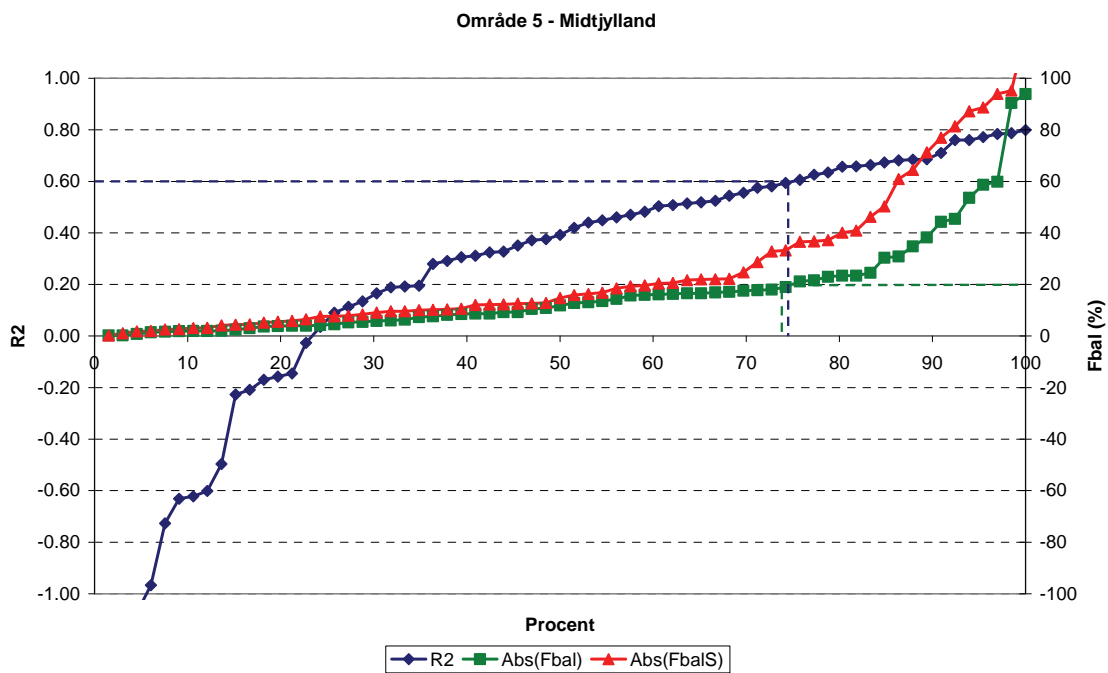
Figur 5. Fordelingskurve af R^2 , samlede vandbalance (Fbal) og vandbalance for sommermånederne juni, juli og august (FbalS) for vandføringsstationerne i delområde 2 - Lolland, Falster og Møn.



Figur 6. Fordelingskurve af R^2 , samlede vandbalance (Fbal) og vandbalance for sommermånederne juni, juli og august (FbalS) for vandføringsstationerne i delområde 3 – Fyn.

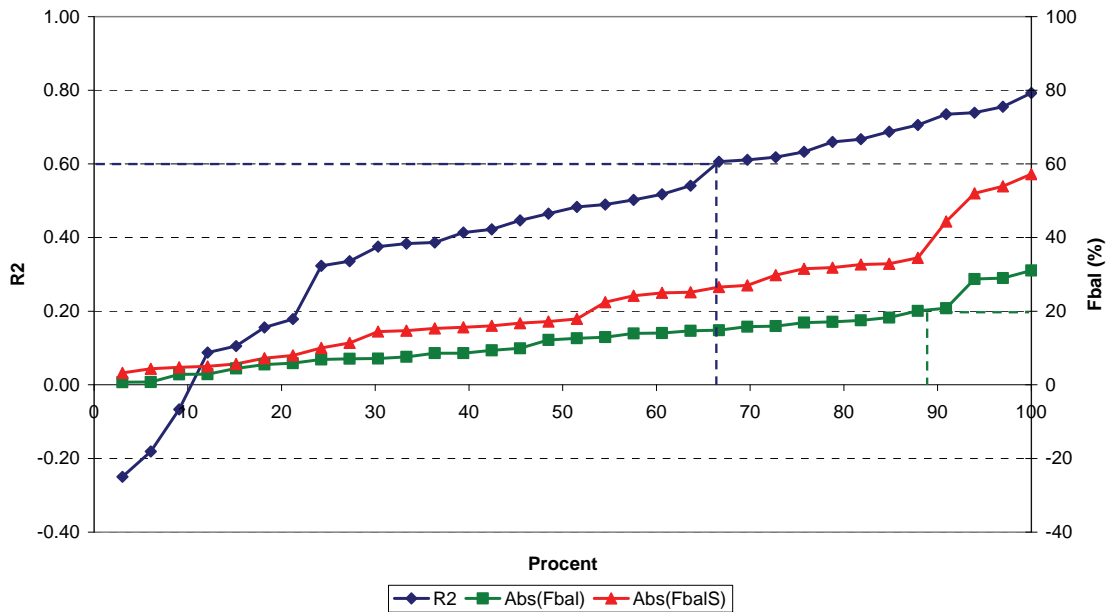


Figur 7. Fordelingskurve af R^2 , samlede vandbalance (Fbal) og vandbalance for sommerrånederne juni, juli og august (FbalS) for vandføringsstationerne i delområde 4 - Sønderjylland.



Figur 8. Fordelingskurve af R^2 , samlede vandbalance (Fbal) og vandbalance for sommerrånederne juni, juli og august (FbalS) for vandføringsstationerne i delområde 5 - Midtjylland.

Område 6 - Nordjylland



Figur 9. Fordelingskurve af R^2 , samlede vandbalance (Fbal) og vandbalance for sommermånederne juni, juli og august (FbalS) for vandføringsstationerne i delområde 6 - Nordjylland.

Vurdering

I forhold til DK-model2003 er der sket en detaljering og opdatering af modelgrundlag og procesbeskrivelse, der vurderes at være en klar forbedring og således forventeligt skulle resultere i et forbedret kalibreringsresultat. Ved sammenligning med DK-model2003 er der generelt sket en væsentlig forbedring af de simulerede trykniveauer. De overvejende årsager hertil vurderes at være relateret til den opdaterede hydrostratigrafiske beskrivelse samt detaljeringen af det numeriske grid fra 1 x 1 km til 500 x 500 m. Mht. simuleringen af vandløbsafstrømningen har det generelt været muligt at opnå en tilfredsstillende samlet vandbalancefejl for de enkelte delmodeller, mens vandløbsdynamikken kun er simuleret tilfredsstillende for modellen for Sjælland.

Den manglende modelperformance for vandløbsdynamikken kan være relateret til en række faktorer såsom den anvendte simplificering med få modelparametre, øvrige antagelser og simplificeringer under modelopstillingen, de anvendte procesbeskrivelser, randbetingelserne, input data osv. Det forholdsvist ensartede billede, der tegner sig for de enkelte delmodeller, med en acceptabel vandbalancefejl men dårlig vandløbsdynamik indikerer, at det anvendte modelkoncept kombineret med de anvendte input data ikke i tilstrækkelig grad er i stand til at simulere det fysiske system. Af Tabel 3 ses endvidere, at resultatet for valideringsperioden generelt er væsentlig dårligere end for kalibreringsperioden. Dette kunne tyde på en "over-fitning" af modellerne, hvor parametrene er tilpasset optimalt til forholdene under kalibreringsperioden, men ikke i samme udstrækning er i stand til at reproducere forholdene under valideringsperioden. Et sådant tilfælde indikerer ligeledes en mulig fejl i modelkonceptet, hvor de optimale parameterverdier kompenserer for denne fejl i kalibreringsperioden.

I DK-model2003 blev der anvendt det simple "stand-alone" rodzonemodul til beregning af nettonedbøren, og det var nødvendigt at reducere nettonedbøren for at få den samlede vandbalance til at gå op. I DK-model2003 blev nedbøren endvidere omfordelt baseret på topografiske højdeforskelle, hvor nedbøren i grids med en middelhøjde på over +50 m blev korigeret op med 10%, mens de lavere liggende grids (< højde +50 m) blev tilsvarende reduceret. Endelige blev der anvendt en UZ-dummy koefficient, der gjorde det muligt at omfordele den andel af nettonedbøren, der genererede overfladisk afstrømning versus den andel der resulterede i en grundvandsdannelse. I DK-model2009 er rodzone modulet erstattet af et ligeledes simpelt men integreret modul til beregning af nettonedbøren. Til forskel for DK-model2003 er der ikke foretaget en reduktion eller omfordeling af nettonedbøren. Det er derfor nærliggende at vurdere, hvorvidt fejlen i den konceptuelle model kan skyldes det anvendte klimainput.

Under forskningsprojektet HOBE er der opstillet en delmodel for Ringkøbing Fjord/Skjern Å baseret på DK-model2009. Delmodellen er kalibreret med alternative klimainput, beregnet ved anvendelse af forskellige metoder til korrektion af den daglige nedbør og med alternative input for referencefordampning (Stisen et al., submitted). To af de alternative metoder til korrektion af nedbøren er anvendelsen af standard korrektion og dynamisk korrektion. Standard korrektionen er anvendt i DK-model2009, hvor nedbørsdata korrigeres med samme korrektionsværdi for de enkelte måneder for hele landet, eksempelvis korrigeres alle nedbørsgrid med samme værdi hver januar måned i hele perioden 1990 – 2008 og tilsvarende for de øvrige måneder. Der er således tale om en middel korrektionsværdi, der ikke tager hensyn til hverken tidslige eller rumlige variationer. Ved dynamisk korrektion korrigeres nedbøren derimod på dagsbasis baseret på lokale klimadata (temperatur og vindhastigheder). Anvendelsen af standard kontra dynamisk korrektion i HOBE projektet viste, at det for Skjern Å's opland er muligt at opnå en tilfredsstillende samlet vandbalance ved anvendelse af de alternative nedbørs- og fordampningsinput. Modsat var vandløbsdynamikken, udtrykt ved R^2 -værdien, markant forskellig, hvor det bedste resultat blev opnået med den dynamiske korrektion.

Detailundersøgelserne for Skjern Å er således i overensstemmelse med den opnåede kalibrering af delmodellerne, hvor det generelt har været muligt at kalibrere den overordnede vandbalance på plads, mens vandløbsdynamikken udtrykt ved R^2 ikke fanges tilfredsstillende. Skjern Å projektet antyder således, at manglende opfyldelse af kalibreringskriterierne for DK-model2009 kan være relateret til vandbalanceproblematikken. En yderligere indikation heraf blev fundet ved proxy-basin testen for Sydhavsøerne. I 2008 blev der foretaget en kalibrering af modellen for Sjælland, hvor nettonedbøren var beregnet på basis af rodzone-modulet med en efterfølgende reduktion. Parameterværdierne blev overført til modellen for Sydhavsøerne, hvilket resulterede i opfyldelse af de opstillede nøjagtighedskrav¹ (Højberg et al., 2008). Resultaterne i Tabel 2 og Tabel 3 stammer fra DK-model2009 med anvendelse af two-layer modulet til beregning af nettonedbøren. Som det fremgår heraf, har det ikke været muligt at overføre modelparametrene fra Sjælland til Sydhavsøerne. Det var således muligt at validere modellen i version 2008 ved en proxy-basin test, mens dette ikke lod sig gøre for version 2009. Da den eneste ændring mellem de to modelversioner er

¹ Kalibreringsresultater af proxy-basin test for modellen for Lolland, Falster og Møn i 2008 udgaven (Højberg et al., 2008): ME = -0,29 m; RMS = 3,08 m, $\langle R^2 \rangle$ = 0.79; Fbal = -6%

nettonedbøren, beregnet med de to forskellige moduler, vurderes det overvejende sandsynligt at nettonedbøren uden korrektion har introduceret en konceptuel fejl.

Samlet set vurderes vandbalanceproblemerne derfor at være en væsentlig årsag til den manglende opfyldelse af de opstillede nøjagtighedskriterier for DK-model2009. Overgangen fra en standard til en dynamisk korrektion af nedbøren vurderes imidlertid ikke alene at kunne løse problemet, idet forskellen i korrigeret nedbør ved de to korrektioner varierer væsentligt regionalt (Scharling og Kern-Hansen, 2002).

Udover bias i nedbørs- og fordampningsdata vurderes det relevant at inddrage andre forhold i en fremtidig omkalibrering af delmodellerne. Med udvidelsen af de enkelte modelområder vil flere af disse spænde over væsentlige større geografiske områder. Hermed er der større chance for, at delmodellerne vil indeholde hydrostratigrafiske enheder af meget varierende art, der ikke kan beskrives tilfredsstillende med antagelsen om én hydraulisk ledningsevne for sand og én værdi for ler. Specielt for de jyske delmodeller, der indeholder såvel de østjyske morænelandskaber som de vestjyske hedesletter og bakkeøer, kan antagelsen om ensartet sand/ler i hele området være problematisk. I forbindelse med en fremtidig kalibrering uden bias i klimainputtet bør behovet for en opdeling af de hydrostratigrafiske enheder derfor vurderes. Den store udfordring i denne opgave ligger i at kunne opstille en parameterisering, der er velbegrundet på basis af geologisk og hydrogeologisk kendskab, og som kan gennemføres på en gennemskuelig og veldokumenteret måde.

4. Modelanvendelse

DK-modellen kommer til naturlig anvendelse indenfor tre emnegrupper:

- Den nationale overvågning – NOVANA
- Den nationale grundvandskortlægning
- Forvaltning af ferskvandsressourcen

Modellens anvendelsesområder indenfor de tre emnegrupper er beskrevet herunder, mens behovet for en videreudvikling af modellen til løsning af fremtidige problemstillinger er vurderet i kapitel 5.

Den nationale overvågning – NOVANA. I forbindelse med den kommende revision af NOVANA programmet (2011) har der været nedsat en projektgruppe, der har haft til formål at vurdere anvendelsen af modeller indenfor NOVANA programmet og give konkrete forslag til specifikke modelanvendelser. Dette arbejde har resulteret i et strategipapir for implementering af modeller i vandforvaltningen (Madsen et al., 2009). Heri forudsættes det, at DK-modellen i stigende grad kommer til anvendelse. Modelanvendelsen tænkes både at kunne understøtte grundvandsovervågningen samt bidrage med en integreret betragtning i forbindelse med overvågning af ferskvandsdelen (vandløb og søer).

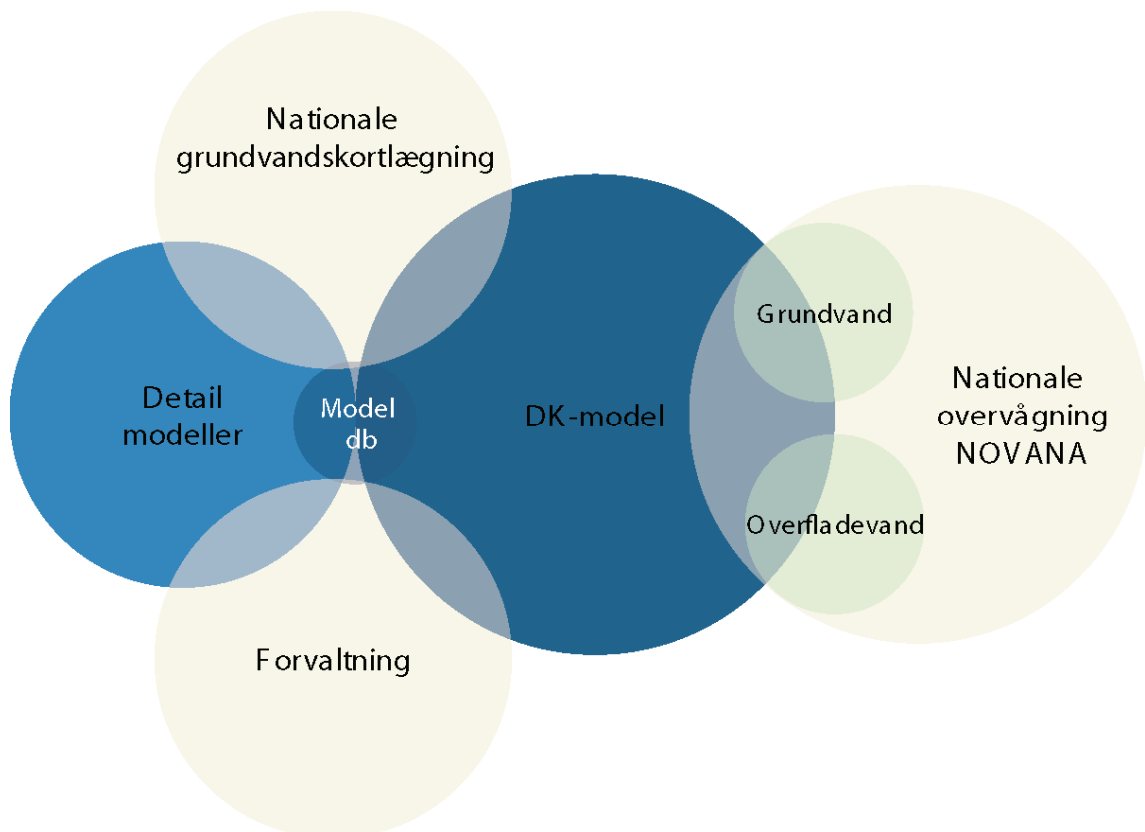
Den nationale grundvandskortlægning. Med den nuværende opdatering integrerer DK-modellen den viden, der er opnået i en række tidligere kortlægningsprojekter. For fremtidige studier vil DK-modellen i første omgang kunne anvendes under indledende screeningsfaser til at danne sig et overordnet overblik over de hydrologiske forhold. Dernæst vil den kunne danne udgangspunkt for opstilling af den konceptuelle forståelse samt det koncept, der skal anvendes under den geologiske og hydrostratigrafiske tolkning. Den geologiske/hydrostratigrafiske del af DK-modellen kan ligeledes anvendes i randområder, hvor der ikke sker en detaljeret tolkning i detailmodellen, men hvor der er behov for en hydrostratigrafisk tolkning for at opnå en troværdig hydraulisk afgrænsning ved opstilling af en hydrologisk model. Med det store detaljeringsniveau, hvormed data er indlagt i DK-modellen, samt udviklingen af et link mellem Jupiter og modellen, vil det være naturligt at anvende DK-model som fundament for fremtidige modelopstillinger, hvor det kun vil være nødvendigt at opdatere den geologiske/hydrauliske del af modellen. Endelig vil DK-modellen kunne bidrage med randbetingelser i de tilfælde, hvor det ikke er muligt at anvende naturlige hydrauliske rande ved opstillingen af en detailmodel.

Forvaltningen. Opgaverne indenfor forvaltningen af det danske grundvand er mangfoldige, ikke blot mht. karakteren af de konkrete problemstillinger men også de forskellige skalaer problemerne er relateret til, samt hvilken myndighed der er ansvarlig for den konkrete opgave. Disse forhold betyder, at der er en stor risiko for, at vandforvaltningen ikke bliver konsekvent på tværs af de forskellige skalaer og administrative skel. DK-modellen vil ikke kunne erstatte opstilling og anvendelse af detailmodeller, men med dens nationale udbredelse danner DK-modellen en naturlig referenceramme, hvor det er muligt at sammenholde overordnede størrelser for DK-model og lokalmodeller og påpege eventuelle divergenser, hvor der vil være behov for detaljestudier og/eller opdatering af en/begge modeller. Med det ensartede koncept der er anvendt under opstillingen af DK-modellen for hele landet, sikres det endvidere, at forvaltningsopgaverne i de forskellige landsdele kan baseres på et sammenligneligt grundlag.

Traditionelt har vidensoverførelsen mellem ovenstående opgavetyper været meget begrænset. Eksempelvis opstilles modeller indenfor forvaltningen som hovedregel ad hoc, styret af aktuelle behov for vurdering af mulige tiltag og forventede effekter. Disse modeller er ofte opstillet på mindre skala, og viden opnået gennem disse modeller er sjældent indarbejdet i grundlaget for overvågningen. Resultater opnået indenfor forvaltningen er således anvendt i meget begrænset omfang i overvågningen, hvilket er påpeget som problematisk af Madsen et al. (2009).

Med DK-modellens potentiale for anvendelse indenfor de forskellige hydrologiske opgavetyper vil den kunne udgøre en samlende platform indenfor overvågningen, forvaltningen og kortlægningen, Figur 10. Modellen vil hermed være et vigtigt og kraftfuldt værktøj til at sikre en konsistent løsning af de forskellige opgavetyper på nationalt niveau.

De enkelte delmodeller er indlæst til den nationale modeldatabase ([www.geus.dk\modeldb](http://www.geus.dk/modeldb)), hvorfra det er muligt at downloade dem vederlagsfrit. Modellerne kan ligeledes rekvireres direkte fra GEUS mod et mindre vederlag, ligesom det er muligt at bestille specifikke udtræk ved GEUS.



Figur 10. DK-model som samlende platform.

4.1 Anvendelse af DK-model2009

Som det fremgår af afsnit 3.3, har det ikke været muligt at opfylde de opstillede kalibreringskriterier for alle delmodellerne. Analysen af kalibreringsresultaterne peger på, at en væsentlig årsag hertil skyldes problemer med det anvendte klimainput, men indenfor opdateringen af DK-modellen under NOVANA 2004-2009 har det ikke været muligt at løse

vandbalanceproblematikken på landsplan. Konsekvensen af den manglende performance og vandbalanceproblematikken betyder, at der vil være nogle begrænsninger mht. en direkte anvendelse af modellen i den foreliggende version.

Muligheden for at dokumentere en models anvendelsesområde er afhængig af de observationer (typer og opløselighed), som er tilgængelig for en vurdering af modellens performance. Ved den udførte kalibrering og validering af modellen er DK-model2009 således dokumenteret anvendelig til belysning af den samlede vandføring ved vandføringsstationer med tilhørende oplande på 50 km² eller derover, med den præcision der blev opnået ved modelvalideringen af de enkelte delmodeller. Tilsvarende er modellen dokumenteret egnet til at beskrive det hydrauliske trykniveau med den opnåede præcision. Delmodellerne er kalibreret og valideret over fire plus fire år, hvori der optræder naturlige klimatiske variationer, mens der ikke er gjort forsøg på at vurdere modellens evne til simulering af egentlige klimaforandringer.

Studiet fra Skjern Å med alternative nedbørsbeskrivelser viste, at det er muligt at kalibrere modellen til en acceptabel samlet vandbalance, men at kalibreringen af de alternative modeller resulterede i forskellige optimale modelparameterverdier. Effekten heraf var, at de forskellige interne strømningskomponenter varierede betragteligt mellem de alternative modeller. Med denne erfaring vurderes det tvivlsomt, om DK-modellen vil kunne anvendes til en detaljeret vurdering af størrelserne af de interne vandflukse, som for eksempel de forskellige bidrag til vandløbene (overfladisk, dræn, grundvand). Ligeledes er delmodellerne kun vurderet på en skala, der generelt er over 50 km², og modellerne vil formentligt have mindre præcision ved anvendelse på mindre skala. Skal delmodellerne anvendes til belysning af enkeltkomponenter eller på lille skala, bør der indledningsvist foretages en analyse af modellen for vurdering af anvendeligheden til løsning af den konkrete problemstilling.

Et eksempel herpå er blevet foretaget for DK-modellen for Sjælland, hvor modellen har været anvendt i forbindelse med vandplansarbejdet i forbindelse med Vandrammedirektivet. Vurderingerne i vandplansarbejdet er i stor udstrækning baseret på nogle delelementer af vandkredsløbet, der ikke har været de primære formål for DK-modellen, såsom median minimumsvandføringer. Endvidere er der i vandplansarbejdet behov for vurderinger på mindre skala end den DK-modellen er opstillet og kalibreret på. Modellen er derfor gennemgået detaljeret af en uvildig rådgiver for vurdering af modellens egnethed som grundlag for vandplansarbejdet. Resultatet heraf påpegede et behov for en detaljering og videreudvikling af modellen, før den med tilstrækkelig sikkerhed kan anvendes på den skala, der generelt efterspørges i forbindelse med vandplansarbejdet. Et behov der ligeledes er erkendt i Madsen et al. (2009).

Med den opdaterede geologi/hydrostratigrafi, vandløbsopsætning og detaljering af input dataene samt den ensartede og sømløse måde delmodellerne er konstrueret på, udgør DK-model 2009 imidlertid et unikt redskab, ikke mindst som udgangspunkt for de detailmodeller, der opstilles p.t. i forbindelse med grundvandskortlægningen. Det vil således være muligt at "klippe" et vilkårligt område ud af DK-modellen, inklusiv de tilhørende datafiler, hvorefter der med en betydelig reduceret indsats kan opstilles en model for et mindre område for eventuel yderligere detaljering af den rumlige opløsning eller hydrostratigrafiske tolkning.

5. Videns- og udviklingsbehov

Analysen af kalibreringsresultaterne fra delmodellerne samt erfaringerne fra Skjern Å delopland peger på, at der med overvejende sandsynlighed er en bias i det anvendte nedbørs- og fordampningsinput. Under modelkalibreringen vil modelparametrene blive justeret, så de bedst muligt kompenserer for denne bias. Det må således forventes, at de kalibrerede parametre giver det optimale fit til observationerne, men ikke nødvendigvis er de optimale for beskrivelse af dynamikken i systemet. Dette har, som påvist i modellen for Skjern Å, den konsekvens, at beskrivelsen af de interne variable er tvivlsomme. Dette vurderes at være meget kritisk, da det forringer modellens anvendelighed betragteligt. Problemer med at lukke den samlede vandbalance blev allerede erkendt under den første version af DK-modellen og resulterede i udarbejdelsen af et konsensusnotat (Plauborg et al., 2002) med anbefalinger til nedbørskorrekationer samt beregning af fordampningen. Disse anbefalinger er anvendt i den nuværende modelopstillingen, men har vist sig ikke at være tilstrækkelige. Monitoring og analyse af de enkelte delkomponenter af den samlede vandbalance på forskellige skalaer er det overordnede formål for forskningsprojektet HOBE. Der vil dog endnu gå adskillige år, inden der kan forventes resultater og anbefalinger herfra. Der vurderes derfor at være et akut behov for en analyse af det anvendte klimainput med henblik på at finde en operationel løsning for beregningen af nedbør samt fordampning, som kan anvendes i tiden frem til der foreligger resultater fra HOBE.

Udover det presserende behov for en analyse af klimainputtet er der behov for en løbende udvikling af DK-modellen. Et kardinalpunkt for modelopstillingen er den geologiske og hydrostratigrafiske tolkning. Med de mange kortlægningsprojekter der igangsættes i disse år, vil der være behov for en regelmæssig opdatering af DK-modellen, så denne i videst mulig omfang integrerer den nyeste viden på dette felt. DK-modellen er opstillet med henblik på at kunne give en overordnet beskrivelse af vandbalancen på stor skala. Med ønsket om en bredere anvendelse af modellen, så denne i endnu højere grad kan anvendes i forvaltningsøjemed (Madsen et al., 2009), er der behov for en yderligere detaljering samt udvikling af modellen. Denne detaljering og videreudvikling omfatter:

- *Detaljering af model.* Dette omfatter en yderligere reduktion af den anvendte gridskala samt en detaljering af vandløbsnetværket. Endvidere er der behov for at kunne tilgodese den regionale/lokale heterogenitet i de hydrauliske egenskaber, ligesom der skal fokus på de terrænnære magasiner med beskrivelse af deres rumlige udstrækning samt interaktion med overfladevandssystemet.
- *Skalering.* Uanset hvilken skala en model opstilles på, vil der forekomme naturlige processer på en skala væsentlig mindre end den, der opløses i modellen. Skalaproblematikken kan således ikke alene løses ved opstilling af modeller med finere diskretisering, og der bør derfor udvikles metoder til håndtering af skalaproblematikken.
- *Udvikling til klimavurderinger.* I forbindelse med en detaljeret vurdering af effekterne af en forventet fremtidig klimaændring, er der behov for en revurdering af de inkluderede processer samt de anvendte procesbeskrivelser. Her vil det bl.a. være relevant med en videreudvikling af repræsentationen af dræneene samt en dynamisk beskrivelse af vandløbsstrømningen, med en mere korrekt beskrivelse af vandstandskoterne.
- *Usikkerhedsvurderinger.* Et tilbagevendende ubesvaret spørgsmål er på hvilken rumlig oplandsskala, DK-modellen kan simulere eksempelvis vandføring, grund-

vandsdannelse eller trykniveauer med en ønsket nøjagtighed. Der er derfor behov for en detaljeret usikkerhedsvurdering til belysning af sammenhænge mellem oplandsstørrelse, detaljering af den rumlige beskrivelse af modelparametre og usikkerheden på forskellige modelresultater.

- *Udvikling af modelkoncept.* Med stigende behov for vurdering af interne variable, for eksempel de forskellige vandløbsbidrag (overfladisk afstrømning, dræn, grundvandstilskud), vil der være behov for en revurdering af det anvendte modelkoncept. Dette kan omfatte overgang til nye procesbeskrivelser, udvikling af nye moduler, eller test af alternative modelkoder.
- *Modelbaseret værktøjer.* For en ensartet tilgang til vurdering og løsning af hydrologiske problemstillinger på tværs af administrative skel, er der behov for udvikling af operationelle modelbaserede forvaltningsværktøjer.

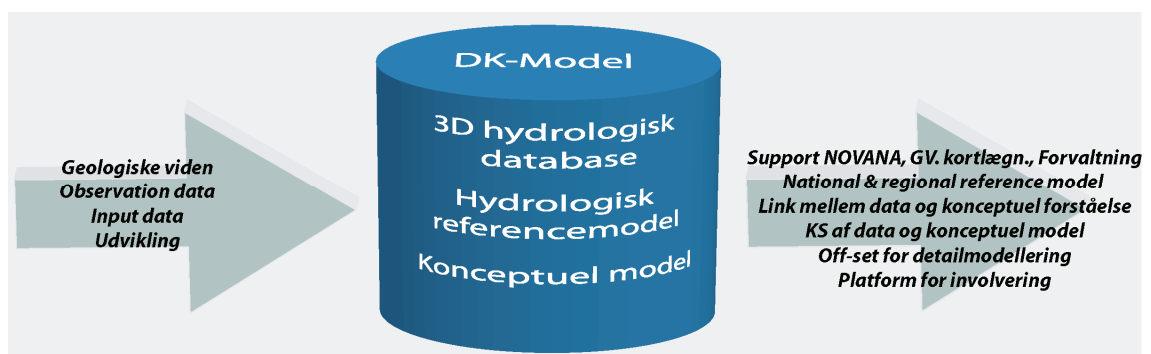
Samlet er der således behov for en regelmæssig opdatering af DK-modellen, der skal sikre at modellen i videst mulig omfang reflekterer den nyeste viden indhentet gennem detailstudier, samt en løbende videreudvikling af modelkonceptet og detaljeringen i takt med at formålene og kravene til modellen ændres.

6. Visioner

DK-modellen er opstillet som en numerisk grundvands-overfladevandsmodel. Det primære formål med opstilling af den landsdækkende hydrologiske model er en transparent og ensartet vurdering af det hydrologiske kredsløb, f.eks. vandbalancen. Med den detaljering data er indlagt i den opdaterede version af modellen, vil denne imidlertid også optræde som en tredimensionel database over hydrologiske datasæt, hvor data sammenkobles med en rumlig forståelse af det naturlige system. Dette er bl.a. udnyttet i et nyligt opstartet projekt "Nøgletabel til kobling mellem indtag og magasiner/ modellag i Jupiter/ Modeldatabasen", der har til formål at etablere en sammenhæng mellem samtlige indtag i Jupiter og grundvandsforekomster og grundvandsmagasiner. Til denne opgave er der behov for en tredimensionel afgrænsning af grundvandsforekomster og –magasiner, der baseres på den hydrostratigrafiske tolkning i DK-modellen.

Visionen for DK-modellen er således, at den ikke alene betragtes som en hydrologisk computermodel, men i langt bredere omfang vil indgå i administrationen af det danske ferskvand. De specifikke visioner for DK-modellen er, at modellen vil (Figur 11):

- optræde som en samlende platform for den danske forvaltning, overvågning og kortlægning af ferskvandsressourcen
- danne referenceramme for den overordnede vandbalance og dermed sikre konsistens i vandforvaltningen på tværs af myndighedsskel og skala
- anvendes indenfor hydrologiske problemstillinger generelt og ikke alene til beregning af vandstrømninger, eksempelvis som 3D database, hvor data linkes til en konceptuel forståelse af ferskvandssystemet
- gennemgå periodisk opdatering og derigennem integrere den nyeste viden
- udvikles løbende så modellens anvendelsesområde gradvist kan udvides
- danne grundlag for opstilling af nye detailmodeller, både mht. den geologiske/hydrostratigrafiske opbygning samt hydrologiske randbetingelser



Figur 11. Løbende opdatering af DK-model og dennes anvendelsesmuligheder.

Problemerne med at få vandbalancen til at gå op blev synliggjort allerede med DK-model2003. I den nuværende version, hvor fordampning løses integreret i modellen, har det været muligt at sandsynliggøre, at der stadig er vandbalanceproblemer, samt at der tilsyneladende er tale om en bias i klimainputtet. For at kunne synliggøre og underbygge et sådant problem, er det nødvendigt med en national vurdering baseret på et ensartet grund-

lag og uden betydende påvirkninger relateret til randbetingelserne, forhold der alene kan tilgodeses af DK-modellen. Vandbalanceproblematikken er yderst relevant for alle hydrologisk betingede opgaver, og DK-model2009 har således allerede bidraget væsentligt til identificering af en problemstilling, der bør løses snarest, og som vil have implikationer for løsning af samtlige hydrologiske problemstillinger på tværs af de forskellige opgavetyper og myndighedsskel.

7. Referencer

- Børgesen C.D. & Schaap M.G. Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils. *Geoderma* 127 (1-2):154-167, 2005.
- Greve M.H., Greve M.B., Bocher P.K., Balstrom T., Breuning-Madsen H. & Krogh L. Generating a Danish raster-based topsoil property map combining choropleth maps and point information. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography* 107 (2):1-12, 2007.
- Henriksen, H.J. and Sonnenborg, A. (2003) Ferskvandets kredsløb. NOVA 2003 Temarapport. GEUS, DMU, DJF og DMI. www.vandmodel.dk
- Højberg A.L., Troldborg L., Nyegaard P., Ondracek M., Stisen S., Christensen B.S.B. & Nørsgaard A. (2008) National Vandressource Model, Sjælland, Lolland, Falster og Møn - Opdatering januar 2008. GEUS rapport 2008/65, København
- Jørgensen F., Kristensen M., Højberg A.L., Klint K.E.S., Hansen C., Jordt B.E., Richardt N. & Sandersen P. (2008) Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering. *GeoVejledning* 3, GEUS.
- Kürstein, J., Andersen, J.A. & Mahrt J. (2009) Sjællandsmodellen – et integreret model-værktøj for det hydrologiske vandkredsløb. Dokumentationsrapport. Miljøministeriet, Miljøcenter Roskilde og Niras.
- Madsen H.B., Pollas K., Sørensen S. M., Hansen K.S., Bendtsen S.Å., Bidstrup J., Thorsen M., Bruhn B., Jensen J.B. & Pedersen S.E. (2009) Implementering af modeller i vandforvaltningen, Strategi og handleplan, version 3, 7. maj 2009.
- Nash J.E. & Sutcliffe J.V. (1970) Riverflow forecasting through conceptual models. Part 1: a discussion on principles. *Journal of Hydrology* 10, 282-290.
- Nyegaard, P., Troldborg, L. & Højberg, AL (2010) DK-model2009 – Geologisk og Hydrostratigrafisk opdatering, GEUS rapport 2010/80, København.
- Olesen J.E. & Heidmann, T. (2002) EVACROP. Et program til beregning af aktuel fordampning og afstrømning fra rodzonen, Version 1.01,
- Plauborg, F., Refsgaard, J.C., Henriksen H.J., Blicher-Mathiesen, G. & Kern-Hansen, C. (2002). Vandbalance på mark- og oplandsskala. DJF-rapport 70, 45 pp.
- PEST. Pest – Model-Independent Parameter Estimation User Manual: 5th Edition, pp. 336 & Addendum to the PEST manual, pp. 206. Watermark Numerical Computing. <http://www.pesthomepage.org/>
- Scharling M. & Kern-Hansen C. (2002) Klimagrid – Danmark, Nedbør og fordampning 1990-2000, Beregningsresultater til belysning af vandbalancen I Danmark. Technical Report 02-03. Dansk Meteorologisk Institut.
- Sonnenborg, T.O. & Henriksen H.J. (eds) (2005). Håndbog i grundvandsmodellering. GEUS rapport 2005/80. Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse, København.
- Stisen S., Sonnenborg T.O., Højberg A.L., Troldborg L. and Refsgaard J.C. Evaluation of climate input biases and water balance issues using a coupled surface-subsurface model.. Submitted to: *Vadose Zone Journal – Special Issue HOBE*.
- Troldborg L., Nyegaard P. & Stisen S. (2009) National Vandressource Model: Opdatering af DK-model Bornholm med data fra detailkortlægningen. GEUS rapport 2009/2, København
- Vandrådet (1992) Danmarks fremtidige vandressource: Rapport fra arbejdsgruppe 1. Ferskvandsressourcens naturlige kvantitet og kvalitet. Miljøstyrelsen, København